

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 967

**INVESTIGAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA RESPOSTA
DE ATERRAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

THIAGO VIRGÍLIO DE MAGALHÃES NETO

DATA DA DEFESA: 22/02/2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS – UFMG
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

**INVESTIGAÇÃO DE METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO DA RESPOSTA
DE ATERRAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

THIAGO VIRGÍLIO DE MAGALHÃES NETO

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

Área de concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

BELO HORIZONTE

FEVEREIRO-2017

*Dedico este trabalho à minha namorada e
companheira de todas as horas, Débora.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares pelo incentivo, suporte, compreensão e carinho ao longo de toda minha vida.

Ao professor Silvério Visacro, pela orientação, apoio técnico, suporte e recursos disponibilizados ao longo de todo este período.

Ao amigo Miguel. Por ser sempre prestativo e capaz de disseminar entusiasmo por todo o ambiente. Pesquisador exemplar, cujas contribuições técnicas foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos demais amigos do LATER, pelos momentos vividos ao longo desta caminhada, pelas discussões técnicas de grande valia e pela ajuda prestada nas diversas montagens experimentais realizadas, em especial a Listz, Rafael Maia, Guilherme, Ronaldo, Felipe Cota e Marcelo Arcanjo.

Aos alunos de iniciação científica do LATER, Pedro, Vivian, Gabriel, João e Richard, por serem sempre prestativos quando solicitados.

A todos os professores do LRC, pelo conhecimento transmitido, em especial ao professor Silvino, que contribuiu diretamente com parte deste trabalho.

Aos porteiros Jayme e Marcelo, pelo companheirismo de sempre.

Ao PPGEE da UFMG e à FAPEMIG, pelo suporte fornecido.

Resumo

Este trabalho apresenta resultados de investigação experimental sobre metodologias de medição da resposta de aterramento de pé de torre de linhas de transmissão. Os testes são realizados em dois tipos de aterramentos: concentrado (pequenas dimensões) e em escala semirreal (cabos contrapesos relativamente curtos).

Em uma primeira abordagem, a resposta impulsiva do aterramento foi avaliada a partir da elevação de potencial nos eletrodos resultante da aplicação de correntes impulsivas, cujos tempos de frentes são representativos de correntes de primeiras descargas e de descargas subsequentes. O principal parâmetro analisado consistiu na impedância impulsiva (Z_P). O foco da investigação foi a análise dos resultados providos pelo emprego de unidades designadas Linhas de Transmissão Artificiais (ATL) para drástica redução das distâncias envolvidas na medição da resposta impulsiva. Tais unidades consistem em condutores longos enrolados em um tubo de PVC. O trabalho concluiu pela possibilidade do uso dessas unidades no circuito de medição de corrente, observados certos cuidados.

Em uma segunda abordagem, avaliou-se a qualidade das medições em baixa frequência realizadas por instrumentos comerciais, cuja resposta consiste na resistência de aterramento (R_{BF}). Nesta avaliação foi verificado o impacto do nível da corrente produzida pelo medidor na resposta do aterramento, diante da influência de sinais espúrios presentes no solo e de efeitos de polarização na superfície solo-eletrodo.

Abstract

This work presents results of an experimental investigation about methodologies of measurement of the grounding response of transmission-line tower footing. The tests involved two types of grounding arrangements: concentrate arrangement (small dimension electrodes) and semi-real scale arrangement (relatively short counterpoise wires).

First, the impulse response of the grounding was evaluated from the grounding potential rise on electrodes resulting from the application of impulsive currents, whose front times are representative of the currents of first and subsequent return strokes. The main analyzed parameter consisted of the impulse impedance (Z_P). The focus of the investigation was the analysis of results provided by the use of so-called 'Artificial Transmission Lines (ATL)' aiming to drastically reducing the distances involved in the measurement. Such units consist of long conductors wrapped around in a PVC pipe. The work concluded that using these units in the current measuring circuit is feasible, once certain cares are observed.

In a second approach, the quality of the low-frequency measurements performed by commercial instruments, whose response consists of the ground resistance (R_{BF}), was evaluated. The impact of the level of current provided by the instruments in the grounding response was assessed in the presence of disturbing effects of spurious signals in the soil and polarization at the soil-electrode interface.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Relevância da Investigação.....	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do Texto	3
2	Aspectos Fundamentais Sobre a Resposta Impulsiva de Eletrodos de Aterramento	5
2.1	Introdução.....	5
2.2	Considerações Básicas Sobre o Comportamento de Aterramentos Elétricos.....	5
2.3	A Composição da Corrente e a Dependência com a Frequência dos Parâmetros do Solo	8
2.4	Os Efeitos de Propagação da Corrente no Solo	10
2.5	A Influência da Forma de Onda da Corrente	11
2.6	O Efeito da Intensidade da Corrente Injetada no Solo	13
3	A Resposta de Aterramentos Elétricos de Estruturas de Linhas de Transmissão	14
3.1	Introdução.....	14
3.2	O Aterramento de Estruturas de Linhas de Transmissão.....	14
3.3	Método da Queda de Potencial.....	16
3.4	Medição da Resistência de Aterramento de Pé de Torre	22
3.4.1	Introdução	22
3.4.2	Uso de Ondas de Frequências Elevadas	24
3.4.3	Uso de Ondas de Tensão Impulsivas Repetitivas.....	27
3.4.4	Prática de Desconexão dos Cabos de Blindagem	29
3.4.5	Prática de Desconexão dos Cabos Contrapeso	30

3.4.6	Uso do Transformador de Corrente	31
3.4.7	Prática de Medição da Corrente Residual.....	32
3.5	Medição da Resposta Impulsiva de Aterramentos de Pé de Torre .	35
3.5.1	Impedância Impulsiva como Parâmetro para Avaliar a Resposta Impulsiva de Aterramentos Elétricos	35
3.5.2	Medição com Uso de Medidor de Impedância Impulsiva.....	37
3.5.3	Medição com Uso de Onda de Degrau de Tensão.....	39
4	Desenvolvimentos Experimentais	44
4.1	Introdução.....	44
4.2	Configurações de Aterramento	45
4.2.1	Hastes Verticais (aterramento concentrado).....	45
4.2.2	Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal).....	46
4.3	Descrição dos Testes Relativos à Medição da Resposta Impulsiva .	46
4.3.1	Arranjo de Referência para Medição da Resposta Impulsiva	47
4.3.2	Arranjo para Medição da Resposta Impulsiva Utilizando Unidades de Linhas de Transmissão Artificiais (ATL)	50
4.3.3	Características dos Componentes Utilizados nos Arranjos Experimentais para Medição da Resposta Impulsiva.....	52
4.3.4	Síntese dos Testes Para Medição da Resposta Impulsiva	57
4.4	Descrição dos Testes Relativos à Medição da Resposta em Baixas Frequências.....	61
4.4.1	Arranjos Experimentais para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	62
4.4.2	Características dos Componentes Utilizados nos Arranjos Experimentais para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	65

4.4.3 Síntese dos Testes Para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	72
5 Resultados Experimentais.....	73
5.1 Introdução.....	73
5.2 Resultados Experimentais Relativos à Medição da Resposta Impulsiva de Aterramentos.....	74
5.2.1 Resultados para o Aterramento Concentrado.....	74
5.2.2 Resultados para o Aterramento Constituído de Cabos Contrapeso (Modelo em Escala Semirreal)	96
5.3 Resultados Experimentais Relativos à Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	118
5.3.1 Resultados para o Aterramento Concentrado.....	118
5.3.2 Resultados para o Aterramento Constituído de Cabos Contrapeso (Modelo em Escala Semirreal)	120
6 Análise dos Resultados Para Fins de Aplicação Prática	123
6.1 Considerações Iniciais.....	123
6.2 Análises Relativas aos Procedimentos de Medição Utilizados Como Referência.....	123
6.2.1 Interferência do Aterramento no Cabo do Circuito de Corrente.....	123
6.2.2 Avaliação do Uso do Cabo do Circuito de Tensão em Aberto...	125
6.3 Avaliações Relativas ao Uso das Unidades de ATL.....	129
6.3.1 Análise da Resposta Impulsiva	129
6.3.2 Análise da Resposta em Baixas Frequências	144
6.4 Análise do Uso de Medidores de Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	147
6.4.1 Síntese de Resultados e Análises.....	147

6.4.2	Considerações Finais Sobre o Uso de Medidores de Resistência de Aterramento em Baixas Frequências.....	152
7	Conclusões e Propostas de Continuidade	153
7.1	Considerações Iniciais.....	153
7.2	Conclusões e Sugestões de Continuidade do Trabalho.....	154
8	Referências Bibliográficas.....	158

1 Introdução

1.1 Relevância da Investigação

As descargas atmosféricas são as principais fontes de desligamentos não-programados de linhas de transmissão de energia elétrica (LTs). Tais desligamentos decorrem da incidência direta de descargas nos condutores de fase ou nos cabos de blindagem da linha, que é responsável por injetar surtos de corrente de amplitudes elevadas e por promover sobretensões nos isoladores, muitas vezes capazes de gerar arcos elétricos de contornamento destes e consequentes curtos-circuitos (VISACRO, 2005).

O desligamento de uma LT pode gerar vários problemas econômicos e sociais como, por exemplo, interrupção de energia para uma determinada macrorregião, com comprometimento da infraestrutura de saúde, transporte público, segurança e da operação de processos produtivos industriais.

Este quadro justifica a necessidade da engenharia em buscar métodos para reduzir o número de desligamentos de LTs causados por descargas atmosféricas.

Sabe-se que quanto menor a impedância de aterramento da torre, maior será a redução da amplitude da sobretensão no topo da torre e na cadeia de isoladores (VISACRO, 2005). Portanto, é de maior interesse a medição precisa desse parâmetro.

A maioria das normas relacionadas com aplicações de proteção contra descargas atmosféricas buscam qualificar o aterramento por meio do valor de resistência, para assegurar uma melhoria na resposta dos eletrodos de aterramentos submetidos a correntes típicas destes eventos. Porém, a qualificação

do desempenho do aterramento frente a descargas por sua resistência é questionável (VISACRO, 2015).

Uma maneira interessante, no domínio do tempo, de expressar a resposta de eletrodos quando percorridos por correntes típicas de descargas atmosféricas é através da impedância impulsiva (Z_p). Entretanto, a medição desta consiste em uma tarefa complexa devido à falta de instrumentos dedicados e de metodologias de medição consolidadas. Recentemente, a equipe do LRC¹ desenvolveu um instrumento original capaz de medir o valor de Z_p de aterramentos, contribuindo para resolver parte do problema (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES e VISACRO, 2014).

Atualmente, para medição da resposta de aterramento de LTs, são utilizados cabos condutores para referência de potencial e de retorno de corrente de comprimentos longos, que podem chegar à ordem de algumas centenas de metros (GUIMARÃES, 2013). Isto torna a medição desta resposta muito difícil. Em princípio, existem técnicas com potencial para reduzir drasticamente as distâncias requeridas para os condutores na medição de impedância (ou resistência estimada) de aterramento de cabos contrapeso de LTs. Entretanto, a aplicação destas requer a necessidade de se avaliar a forma do seu emprego.

Normalmente, se processa a medição da resistência de aterramento. Mesmo a medição deste parâmetro pode apresentar problemas, pois os instrumentos comerciais de medição de resistência de aterramento aplicam sinais de corrente da ordem de miliamperes no aterramento, sofrendo interferências causadas por tensões induzidas e ruídos espúrios em condição de campo, o que, muitas vezes, compromete os resultados das medições e ocasionam resultados muito diferentes para instrumentos distintos.

¹ *Lightning Research Center* ou Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas. Criado em 2001, a partir da cooperação entre a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) e a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), é um centro de pesquisa de destaque internacional, dedicado a pesquisas sobre descargas atmosféricas e sobre técnicas de proteção contra seus efeitos.

Assim, há interesse em aplicações de engenharia em se desenvolver metodologias consistentes e de implementação viável para medição da impedância impulsiva de aterramento de LTs ou, alternativamente, em conferir consistência à medição de resistência de aterramento das torres da linha.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo a prospecção de alternativas para medição da resposta do aterramento de LTs para fins de análises relativas ao seu desempenho frente a descargas atmosféricas.

A implementação desta prospecção compreende o desenvolvimento de algumas realizações específicas, incluindo intensa atividade experimental:

- Síntese das principais práticas de medição de impedância e resistência de aterramento de pé de torre existentes na literatura;
- Investigação de prática para medição de impedância impulsiva de aterramento torre de LT que não requeira o uso de cabos condutores de comprimento muito longo;
- Investigação da eficiência da medição da resistência de aterramento de pé de torre com corrente da ordem de amperes no aterramento, como meio de minimização da influência de sinais espúrios presentes no solo e do efeito de polarização interfacial nos eletrodos.

1.3 Organização do Texto

O texto foi organizado em oito capítulos, incluindo a presente **Introdução**.

No **Capítulo 2**, são apresentados os aspectos fundamentais para que se possa caracterizar de forma consistente a resposta impulsiva de aterramentos elétricos de torres de transmissão.

No **Capítulo 3**, são apresentados e discutidos os aspectos mais relevantes das principais práticas empregadas atualmente para medição de resistência de aterramento e de impedância impulsiva, evidenciado a aplicação das mesmas para medições em torres de LTs. Além disso, são discutidos os cuidados que devem ser tomados para aplicação de cada uma dessas práticas, incluindo suas limitações.

No **Capítulo 4**, são apresentadas as configurações de aterramento testadas nesta dissertação. A primeira configuração consiste de um arranjo concentrado de eletrodos verticais. A segunda configuração consiste de um arranjo com quatro cabos contrapeso, em escala semirreal. São descritos os testes relativos à medição da resposta impulsiva e os testes relativos à medição de baixas frequências, para ambas as configurações de aterramento. Para cada teste, são descritos os arranjos de medição utilizados, além das características de cada componente utilizado.

No **Capítulo 5** é feita a apresentação dos resultados de medição utilizando os arranjos de medição descritos nos **Capítulo 4**.

No **Capítulo 6** é feita uma análise focada em aspectos de aplicação prática dos resultados apresentados no **Capítulo 5**.

As conclusões e as propostas de continuidade deste trabalho são apresentadas no **Capítulo 7**. As referências bibliográficas citadas ao longo do texto são encontradas no **Capítulo 8**.

2 Aspectos Fundamentais Sobre a Resposta Impulsiva de Eletrodos de Aterramento

2.1 Introdução

A resposta de um eletrodo de aterramento submetido a correntes impulsivas é muito distinta da resposta deste em baixas frequências. Para a compreensão deste fato, são realizadas na seção 2.2 considerações básicas sobre o comportamento de aterramentos elétricos. Nas seções 2.3 à 2.6, são explicados os principais aspectos que têm grande influência no desempenho de aterramentos elétricos quando submetidos a correntes impulsivas, sendo eles: a composição da corrente e a dependência com a frequência dos parâmetros do solo, os efeitos de propagação da corrente no solo, a forma de onda da corrente injetada no aterramento e a intensidade da corrente.

A abordagem conceitual realizada neste capítulo é baseada fundamentalmente nos desenvolvimentos apresentados em (VISACRO, 2007), sendo complementada por referências mais recentes indicadas ao longo do texto.

2.2 Considerações Básicas Sobre o Comportamento de Aterramentos Elétricos

Qualquer conexão para a terra apresenta efeitos resistivo, capacitivo e indutivo. Portanto, pode-se realizar uma abordagem simplificada do comportamento de aterramentos elétricos baseada na teoria de circuitos. Na

Figura 2.1 têm-se: (a) as componentes de corrente para um elemento de aterramento (que consiste em uma parcela de um eletrodo enterrado no solo) e (b) o circuito equivalente do elemento de aterramento.

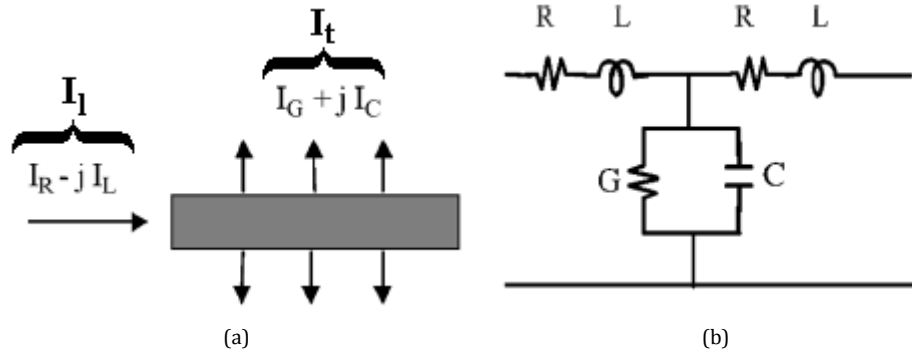


Figura 2.1 – (a) Componentes de corrente em um elemento de eletrodo enterrado no solo e (b) circuito equivalente da parcela de eletrodo. Adaptado de (VISACRO, 2007).

A corrente injetada no eletrodo é composta por duas componentes: longitudinal (I_l) e transversal (I_t). A componente I_l é transferida para o comprimento restante do eletrodo, sendo responsável pelas perdas internas ao condutor e pelo estabelecimento de campos magnéticos no interior e no exterior deste. As energias correspondentes são computadas por meio de uma resistência R e de uma indutância L em série. A componente I_t é dissipada para o solo, sendo estabelecida por um campo elétrico neste meio que determina o fluxo de duas parcelas de corrente: uma condutiva (devido à condutividade não-nula do meio) e outra capacitiva (devido à permissividade não-nula do meio). A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais é computada por meio de uma condutância G e de uma capacitância C , inseridas em paralelo no circuito equivalente.

A descrição acima diz respeito a um único elemento de aterramento representado pelo circuito equivalente da Figura 2.1 (b). O conhecimento completo da resposta do aterramento requer a solução completa de uma rede constituída de um conjunto de circuitos equivalentes de elementos que compõem o aterramento em questão. Os efeitos mútuos (efeitos indutivo, capacitivo e resistivo) entre tais elementos também devem ser considerados.

Numa abordagem generalizada, a solução desta rede vista do ponto de vista de injeção de corrente é a impedância do aterramento. Tal impedância expressa o comportamento do aterramento e é definida pela razão entre a elevação de potencial desenvolvida no aterramento em relação ao terra remoto ou GPR (*grounding potential rise*) e da corrente injetada no aterramento.

Para fenômenos impulsivos, tais como descargas atmosféricas, a resposta do aterramento é comumente expressa, no domínio do tempo, através da impedância impulsiva (Z_P). Tal impedância é definida como razão entre valores de pico do GPR (V_P) e da corrente injetada no aterramento (I_P):

$$Z_P = V_P / I_P \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 ilustra o conceito de impedância impulsiva. Nela são mostradas duas curvas, uma referente à onda de corrente injetada em um eletrodo de aterramento e outra à onda de GPR resultante. As duas ondas possuem forma similar, embora na maioria dos casos os valores de pico não sejam simultâneos devido aos efeitos reativos e de propagação no solo. A despeito da usual não-simultaneidade da ocorrência destes picos, a representação por Z_P é bastante útil quando se deseja obter uma estimativa rápida do valor de tensão máximo resultante no ponto de injeção da corrente através da simples multiplicação do valor de Z_P pelo valor de I_P (VISACRO, 2007).

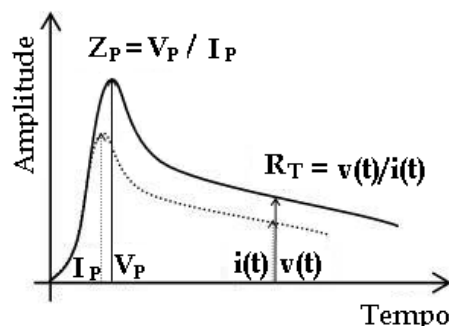


Figura 2.2 – Ilustração da obtenção dos parâmetros impedância impulsiva ($Z_P = V_P/I_P$) e resistência de aterramento em baixas frequências ($R_T = v(t)/i(t)$). Adaptado de (VISACRO, 2007).

Para fenômenos lentos, cujas frequências representativas possuem baixos valores, os efeitos reativos no solo podem ser desprezados. Nestes casos, a aproximação potencial constante para os eletrodos é válida e o circuito equivalente de cada elemento de aterramento pode ser representado simplesmente por uma condutância transversal (ou uma resistência de valor equivalente). Os efeitos mútuos resistivos entre tais elementos também devem ser considerados. O valor da resistência de aterramento (R_T), correspondente ao valor em paralelo das condutâncias equivalentes de cada elemento, é quantificado pela razão entre a elevação de potencial desenvolvida no aterramento em relação ao terra remoto (V_T ou GPR) e a corrente injetada no mesmo (I_T):

$$R_T = V_T/I_T \quad (2.2)$$

É importante destacar que, para fenômenos impulsivos, uma estimativa do valor de R_T pode ser obtida pela razão entre os valores de tensão e de corrente tomados nas caudas das ondas, conforme mostrado na Figura 2.2.

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

Para fenômenos lentos, que possuem baixos valores representativos de frequências, é razoável considerar o solo um meio predominantemente condutivo. Entretanto, para fenômenos rápidos, que possuem componentes de frequência de valores elevados, a corrente capacitiva pode alcançar a mesma amplitude da corrente condutiva (VISACRO, 2007). A relação entre tais correntes é dada por $\sigma/\omega\epsilon$ (onde σ é a condutividade do solo, ω é a frequência angular e ϵ é a permissividade do solo). Em (VISACRO et al., 2011; VISACRO e ALIPIO, 2012; ALIPIO e VISACRO, 2013) verifica-se que esta relação varia amplamente no domínio da frequência, numa faixa entre 10 kHz e 4 MHz, assumindo valores entre

1-100. Portanto, o efeito capacitivo passa a ser relevante e não pode ser desprezado para fenômenos rápidos.

Na maior parte das condições práticas, a permeabilidade magnética do solo é similar à do ar. Entretanto, foi verificado recentemente através de medições em condições de campo que os valores de σ e ε são fortemente dependentes da frequência. Tal dependência se caracteriza pela redução de tais parâmetros com o aumento da frequência e pode ser expressa pelas equações (2.3) e (2.4) desenvolvidas por Visacro e Alipio (2012):

$$\rho = \rho_0 \{1 + [1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0,73}] \cdot [(f - 100)^{0,65}]\}^{-1} \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_r = 7,6 \cdot 10^3 f^{-0,4} + 1,3 \quad (2.4)$$

onde ρ e ε_r são a resistividade e a permissividade relativa do solo na frequência f (em Hz), ρ_0 é a resistividade do solo em 100 Hz. A expressão (2.3) é válida para a faixa de frequências de 100 Hz a 4 MHz, enquanto (2.4) é válida para a faixa de 10 kHz a 4 MHz. Para frequências abaixo de 10 kHz, Visacro e Alipio sugerem o uso de (2.4) em 10 kHz.

Ao se computar (2.3) e (2.4), observa-se que os resultados de simulação da resposta dos eletrodos frente a correntes típicas de descargas atmosféricas ficam muito mais próximos do real, tanto para arranjos concentrados, quanto para arranjos que envolvem a utilização de eletrodos longos enterrados em solos de resistividades alta e moderada, independente da intensidade da corrente. Com o cômputo desta dependência, verifica-se a redução do valor de GPR no eletrodo e, conseqüentemente, de Z_p , como observado em resultados de medições experimentais realizados por Visacro e Alipio. Vale a pena citar que este efeito não é importante para solos de resistividades menores que 300 Ωm (VISACRO, 2015).

2.4 Os Efeitos de Propagação da Corrente no Solo

Quando são injetadas correntes de baixas frequências em um eletrodo de aterramento, tal eletrodo apresenta um comportamento equipotencial ao longo de toda sua extensão. Entretanto, esta condição deixa de existir quando o eletrodo é submetido a correntes impulsivas. Nestes casos, ocorrem os efeitos de atenuação e de distorção das ondas de tensão e de corrente que se propagam ao longo do comprimento do eletrodo, conforme mostrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 – Atenuação e distorção das ondas de tensão e de corrente ao longo do eletrodo. Adaptado de (VISACRO, 2007)

O eletrodo enterrado no solo se comporta como uma linha de transmissão inserida em um meio com perdas. Sendo assim, a perda de energia promove a atenuação (redução da amplitude) das ondas de tensão e de corrente que se propagam ao longo do eletrodo. Além disso, como as componentes de frequência das ondas possuem velocidades de propagação distintas, tem-se que cada componente é submetida a um nível de atenuação diferente. Assim como a perda de energia, tal atenuação aumenta com a frequência e com a condutividade do solo. Como resultado, as ondas de tensão e de corrente sofrem redução de amplitude e distorção ao longo da direção de propagação, caracterizada pela redução da inclinação na frente de onda destas (VISACRO, 2007).

Como consequência da atenuação, tem-se que a corrente dispersa para o solo ao longo do eletrodo apresenta uma distribuição não uniforme e a densidade linear de corrente (A/m) diminui ao longo do eletrodo. O conceito de comprimento efetivo (L_{EF}) é derivado de tais considerações. O alongamento do eletrodo além do L_{EF} não promove redução adicional de Z_p , tem-se apenas redução da resistência de aterramento em baixas frequências (R_{BF}). Tal comportamento é explicado devido ao fato de que, além deste limiar, as componentes de frequência das correntes

associadas à frente de onda estão tão atenuadas que, mesmo havendo disponibilidade de comprimento adicional de eletrodo, praticamente não contribuem mais para dispersão de corrente para o solo.

2.5 A Influência da Forma de Onda da Corrente

A influência da forma de onda da corrente na resposta de um aterramento pode ser constatada pela diferença entre os valores de Z_P de um aterramento ao ser submetido por ondas de corrente representativas de primeira descarga e de descarga subsequente, Figura 2.4. Tal diferença é causada devido ao conteúdo de frequência bastante distinto destas correntes. A maior parte da energia da corrente de tais descargas é associada às componentes ao redor de 10 a 15 kHz. Contudo, as componentes de frequência significativas excedem 400 kHz e 2 MHz, para a primeira descarga e para a descarga subsequente, respectivamente (VISACRO, 2005).

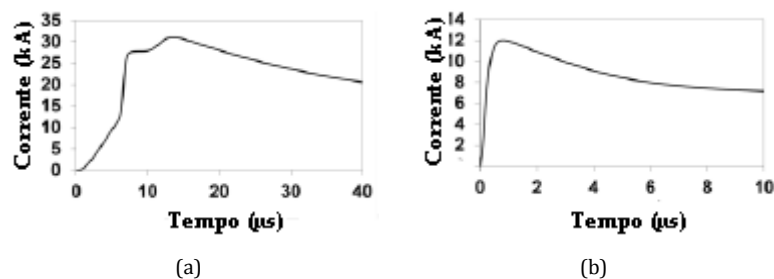


Figura 2.4 - Formas de onda de corrente representativas de (a) primeira descarga (b) descarga subsequente. Adaptado de (DE CONTI e VISACRO, 2007).

Através do programa de modelagem eletromagnética HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*) (VISACRO e SOARES, 2005), Visacro obteve a resposta de um aterramento constituído por um eletrodo horizontal de raio 0,7 cm a uma profundidade de 0,5 m no solo, ao se aplicar as ondas de corrente mostradas na Figura 2.4. O resultado obtido está na Figura 2.5. Verifica-se que ao se aumentar o comprimento do eletrodo (L), tem-se a redução de Z_P e de R_{BF} . Tal redução ocorre até que o valor de L_{EF} seja alcançado e a curva Z_P permaneça com um patamar constante.

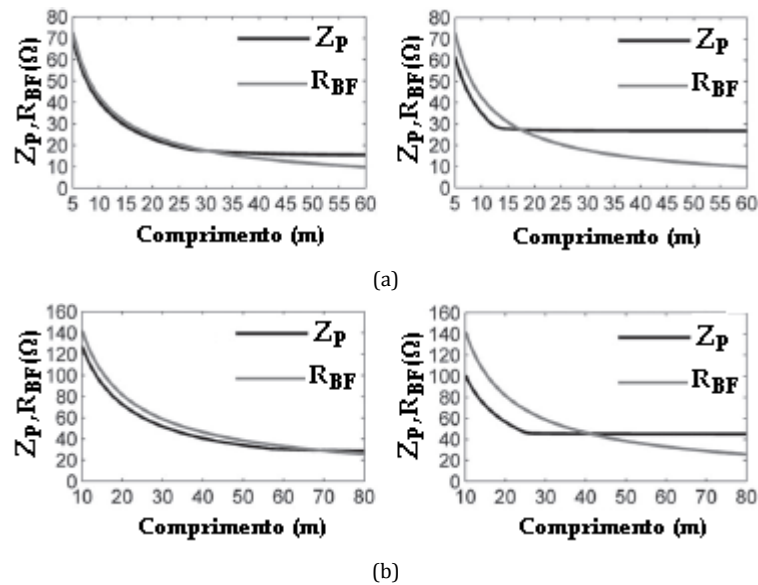


Figura 2.5 - Valores de Z_p e de R_{BF} para um eletrodo horizontal de (0,7 cm de raio e 0,5 m de profundidade) submetido à corrente representativa de primeira descarga (esquerda) e de descarga subsequente (direita) em função do comprimento do eletrodo. Resistividade do solo de (a) 300 Ωm e (b) 1000 Ωm . Adaptado de (VISACRO, 2015).

Fica claro que o valor de L_{EF} é diferente entre descargas primeira e subsequente e, entre solos de baixa e alta resistividade. No caso da Figura 2.5, os valores de L_{EF} são de aproximadamente de 33 m (primeira) e de 12 m (subsequente), para o solo de 300 Ωm , e de 58 m (primeira) e de 23 m (subsequente), para o solo de 1000 Ωm . Conforme explicado anteriormente, tal diferença ocorre devido aos diferentes níveis de atenuação das ondas de corrente que se propagam ao longo do eletrodo, que são dependentes da resistividade do solo e do conteúdo de frequência dessas ondas.

Outras conclusões podem ser ainda obtidas da Figura 2.5. Para eletrodos curtos ($L < L_{EF}$), o valor de Z_p é menor que o de R_{BF} em todos os casos, sendo tais valores muito próximos em solos de baixa resistividade. Considerando solos de mesma resistividade, têm-se ainda que para eletrodos curtos, os valores de Z_p são significativamente menores para eletrodos submetidos a correntes representativas de descargas subsequentes. Para eletrodos longos ($L > L_{EF}$), tem-se Z_p maior que R_{BF} . A diferença torna-se mais acentuada com o aumento do comprimento do eletrodo, pois R_{BF} continua diminuindo e Z_p permanece com valor constante. Nessas condições, o valor de Z_p é maior para correntes representativas de descargas subsequentes.

2.6 O Efeito da Intensidade da Corrente Injetada no Solo

Quando são aplicadas correntes de intensidades elevadas (da ordem de quiloampères) em eletrodos concentrados, a densidade de corrente no meio pode dar origem a um campo elétrico intenso capaz de originar descargas disruptivas que constituem canais de plasma nas proximidades do eletrodo, sendo esse fenômeno conhecido como processo de ionização do solo. Os canais de plasma possuem resistividade muito reduzida se comparados com a região do solo próxima ao eletrodo, dessa forma parte da corrente é dissipada por esses canais contribuindo para a redução da impedância de aterramento. Uma característica importante é que tal redução é não-linear em relação ao aumento da intensidade de corrente a partir do valor limiar de disrupção do meio.

O fenômeno tem sido modelado na literatura por um aumento da área efetiva do eletrodo (BELLASCHI et al., 1942) ou pela redução da resistividade do solo na região próxima circundante ao eletrodo (LIEW e DARVENIZA, 1974).

A intensidade de campo elétrico que dá início à formação dos canais de plasma e conseqüentemente ao processo de ionização do solo é chamado de campo elétrico crítico (E_c). Diversos trabalhos na literatura sugerem valores de E_c em uma faixa ampla, de aproximadamente 0,5 kV/cm a 14 kV/cm (LIMA, 2008). O valor de 400 kV/m é bastante adotado, por exemplo, em (CIGRÉ, 1991).

Correntes de descargas muito elevadas, capazes de gerar efeito de ionização do solo, podem promover melhoria na resposta transitória de eletrodos de aterramento curtos. Entretanto, para eletrodos longos, tais como os de malhas de aterramento de subestações e de cabos contrapeso de LTs, este efeito não é importante (VISACRO, 2015). Nesta dissertação, em todas as medições realizadas foram utilizadas correntes de baixa amplitude, da ordem de poucos amperes, portanto o efeito de ionização do solo pode ser desprezado.

3 A Resposta de Aterramentos Elétricos de Estruturas de Linhas de Transmissão

3.1 Introdução

Neste capítulo é realizada uma revisão bibliográfica com o intuito de apresentar a constituição do aterramento elétrico de estruturas de LTs e os aspectos mais relevantes que envolvem as principais técnicas de medição de R_T e de Z_P utilizadas atualmente, incluindo suas limitações e dificuldades. As principais normas e estudos técnicos internacionais que abordam esses tipos de medições são: *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of Grounding System* (IEEE STD 81, 2012), *IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems* (IEEE STD 81.2, 1991) e *Methods for Measuring the Earth Resistance of Transmission Towers Equipped with Earth Wires* (CIGRÉ, 2005).

3.2 O Aterramento de Estruturas de Linhas de Transmissão

O sistema de aterramento convencional de estruturas de LTs é composto basicamente pelo lançamento de quatro cabos contrapesos radiais a partir do pé da torre, permanecendo dentro da faixa de servidão da LT, conforme mostrado na

Figura 3.1. A função deste aterramento é promover o escoamento para o solo de correntes associadas a falhas como curtos-circuitos ou às descargas atmosféricas. Os cabos contrapesos devem ser instalados a certa profundidade e o comprimento L_1 destes cabos varia de acordo com a resistividade do solo. Ambos os valores são obtidos em normas específicas de cada concessionária. A CEMIG adota a profundidade do arranjo de aterramento de no mínimo 0,50 m e L_1 varia em uma faixa de 20 a 90 m.

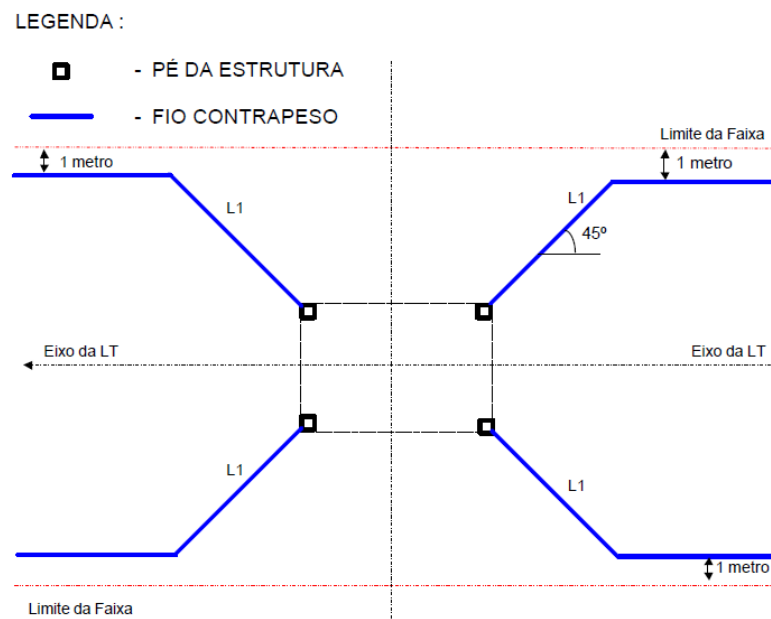


Figura 3.1 - Arranjo de aterramento para estruturas metálicas autoportantes. Adaptado de (CEMIG, 2003).

O sistema de aterramento mostrado na Figura 3.1 ainda pode conter anéis equalizadores e hastes, em casos nos quais se pretende mitigar potenciais de passo e de toque perigosos ao redor das estruturas, devido ao fato da LT atravessar áreas de loteamento e de circulação de pessoas.

Quando a LT é formada por estruturas metálicas, o cabo de blindagem é conectado aos eletrodos de aterramento por meio de cada torre metálica. Quando a LT é formada por estruturas de concreto ou madeira, o cabo de blindagem é conectado aos eletrodos de aterramento através um cabo de descida. Em casos de estruturas de madeira ou concreto, que não possuem cabos de blindagem, o cabo de descida deve ser conectado ao arranjo de aterramento e se posicionar a uma

altura superior de aproximadamente 0,20 m da extremidade do topo do poste. Em todos os casos, os contrapesos de linhas paralelas não devem ser interligados e nem sobrepostos (CEMIG, 2003).

Componentes metálicos enterrados tais como fundações de estruturas de transmissão encapsuladas por concreto ou mesmo grelhas, devem ser considerados partes do sistema de aterramento em conjunto com os cabos contrapesos. Eles também são responsáveis por dispersar parte significativa da corrente de falta ou de uma descarga atmosférica para o solo. Devido às propriedades higroscópicas do concreto, as fundações podem apresentar ainda resistividades próximas ou mesmo menores do que as do solo circundante (THAPAR et al., 1989). Tal fato faz com que, em alguns casos, as fundações possuam valores de resistência de aterramento próximos ou mesmo menores do que os de eletrodos enterrados diretamente no solo próximo.

3.3 Método da Queda de Potencial

O *Método da Queda de Potencial* é uma técnica utilizada em todas as práticas de medição de resistência/impedância de aterramento de estruturas de LTs discutidas nas seções 3.4 e 3.5 desta dissertação. Portanto, para o entendimento de cada uma destas práticas de medição, é necessário compreender esta técnica primeiramente. As considerações de ordem prática realizadas nesta seção são baseadas fundamentalmente em (VISACRO, 2002).

Para implementação do *Método da Queda de Potencial*, realiza-se uma montagem conforme a Figura 3.2. Neste caso, tem-se o aterramento no qual se deseja medir o valor da R_T , representado pelo eletrodo X. O eletrodo auxiliar de corrente (C) é utilizado para o fechamento do circuito e deve ser posicionado em uma distância de pelos menos cinco vezes a maior dimensão linear do aterramento sob teste (IEEE STD 81, 2012). Tradicionalmente, o eletrodo de referência de potencial (P) é posicionado linearmente entre X-C. Na literatura também se encontra o posicionamento de P após C, em sentido oposto a C e ortogonal a X-C.

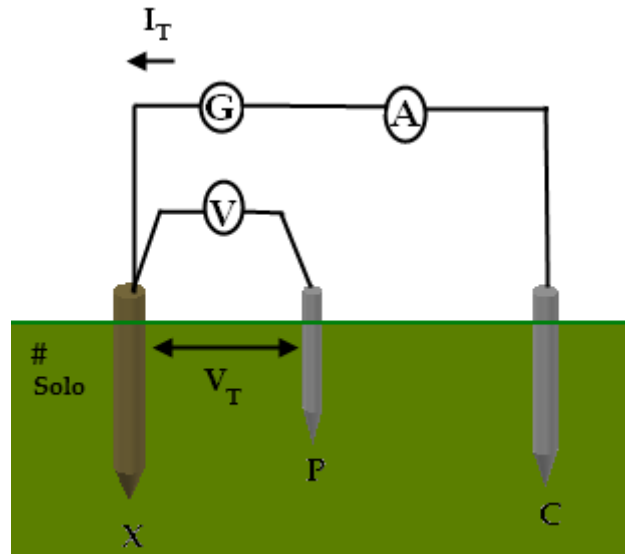


Figura 3.2 - Montagem para implementação do *Método da Queda de Potencial*: X (eletrodo de aterramento), P (eletrodo de referência de potencial) e C (eletrodo auxiliar de corrente).

Através de uma fonte (G), uma tensão é estabelecida entre os eletrodos X-C, o que resulta um fluxo de uma corrente I_T entre estes eletrodos. Tal corrente provoca uma queda de potencial no solo, detectada por um voltímetro conectado entre X-P. A cada deslocamento escolhido de P, um valor de tensão é registrado pelo voltímetro e pode-se obter um perfil de potencial conforme mostrado na Figura 3.3. Quando P está posicionado no patamar de potencial, ou seja, no “terra remoto” onde o potencial de P é idealmente nulo, tem-se que o valor de R_T é dado pela razão entre os valores do potencial de X e de corrente registrados, ou seja, $R_T = V_T/I_T$.

A Figura 3.3 apresenta uma simulação no *MATLAB* do perfil de potencial normalizado utilizando o *Método da Queda de Potencial*. A simulação é baseada em desenvolvimentos analíticos utilizados na formulação do *método de Frank Wenner* (WENNER, 1915), nos quais o solo é considerado um meio semi-infinito homogêneo e os eletrodos X e C são substituídos por fontes pontuais de corrente unitária. O *Método das Imagens* é aplicado para se obter o potencial em um ponto qualquer devido a estas fontes de corrente. Na simulação, o solo possui resistividade de $200 \Omega\text{m}$ e os eletrodos X e C estão nas posições 0 m e 70 m,

respectivamente, ambos em uma profundidade de 0,3 m. O eletrodo P é então deslocado em relação ao eletrodo X.

Na Figura 3.3 (a), ao se deslocar P entre X-C (curva P₁), observa-se que o patamar de potencial foi alcançado entre 30 e 40 m. Pode-se ainda, deslocar P em posições alternativas, como após C (curva P₂). Neste caso, tem-se o patamar de potencial a partir de aproximadamente 110 m (a partir de 40 m após C). Ao se deslocar P em posição oposta a C (curva P₃), tem-se o patamar de potencial a partir de aproximadamente -30 m (a partir de 30 m antes de X). Na Figura 3.3 (b), ao se deslocar P em posição ortogonal a X-C, (curva P₄) tem-se o patamar de potencial a partir de aproximadamente 30 m.

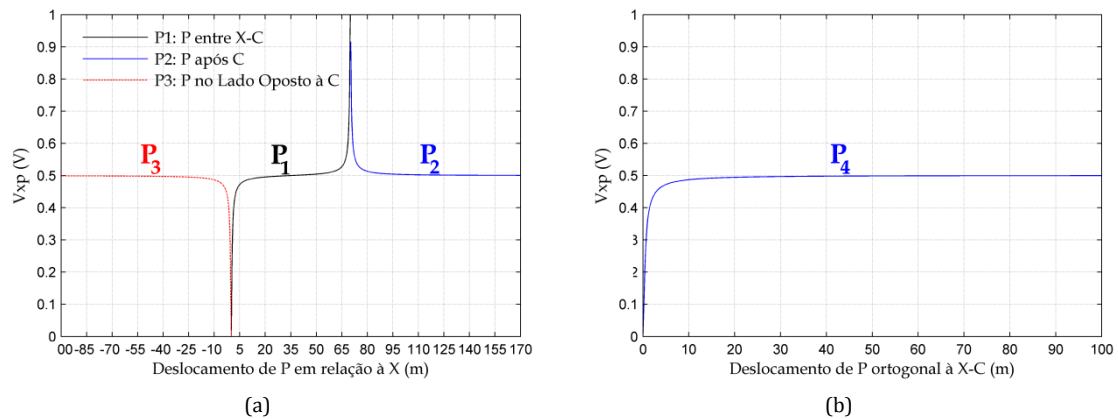


Figura 3.3 - Perfil de potencial normalizado devido ao deslocamento de P. (a) P₁: entre X-C, P₂: após C, P₃: no lado oposto a C (na mesma reta que contém X-C); (b) P₄: P ortogonal a X-C.

É interessante observar que para os casos P₃ e P₄, as curvas de perfil de potencial não ultrapassam o valor do patamar de potencial, pois nestas curvas não se tem o efeito das quedas de tensão na área do eletrodo C, desta forma pode-se obter um patamar mais bem definido. Além disso, no caso P₄, tem-se a minimização do acoplamento magnético entre estes cabos devido ao posicionamento ortogonal entre os cabos de referência de potencial e de retorno de corrente.

Na aplicação do *Método da Queda de Potencial*, sugere-se que o eletrodo de corrente C deva ser colocado a uma distância de pelo menos cinco vezes a maior dimensão linear do aterramento (VISACRO, 2002). A motivação para isto é minimizar os efeitos de acoplamento condutivo entre o aterramento e C.

O eletrodo de potencial P deve ser inicialmente colocado a cerca de 60% da distância entre o centro geométrico do aterramento e C (VISACRO, 2002), estando em linha com estes, em sentido oposto a C ou ortogonal a X-C. Dessa forma, normalmente P está na região do patamar de potencial. O eletrodo P é deslocado ao longo de uma direção escolhida e é realizada uma medição de potencial para cada posição, de forma a gerar uma curva de perfil semelhante às da Figura 3.3.

Na prática são necessárias apenas três medições para se avaliar o posicionamento sobre o patamar. Variando-se de 10% de X-C a posição de P (a partir do ponto inicial de medição), caso o valor R_T medido tenha uma variação inferior a 2%, considera-se que o patamar de potencial foi alcançado. Dessa forma, toma-se o valor médio como sendo o valor de R_T (VISACRO, 2002).

Alguns autores dedicam trabalhos sobre o posicionamento ideal de P para que se alcance o patamar de potencial. Dawalibi e Mukhedkar (1974, 1979) trabalham com eletrodos enterrados em modelos não-uniformes de solos de duas camadas de resistividade, mas a posição ideal de P é definida apenas para casos simples como eletrodos pequenos ou hemisféricos. Curdts (1958) e Tagg (1964, 1969, 1970) trabalham com eletrodos de grandes dimensões, mas em solos uniformes assumindo uma distribuição de densidade de corrente uniforme nos condutores. Entretanto, muitas vezes os sistemas de aterramento reais possuem configurações complexas, apresentando hastes verticais em conjunto com eletrodos horizontais enterrados em solos não-uniformes (IEEE STD 80, 2013). Portanto, deve-se ter muito cuidado, por exemplo, ao se utilizar a *regra de 61,8%* (no qual P deve ser posicionado a 61,8% entre X-C) comumente citada na literatura (CURDTS, 1958; TAGG, 1964), pois a posição do patamar pode ser muito diferente desta. O que efetivamente importa é que a medição seja realizada no patamar. Variando a posição de P conforme anteriormente explicado nesta dissertação, pode-se identificar o patamar e efetuar as medições de R_T corretamente.

Caso a curva de potencial não apresente o patamar, provavelmente o aterramento e o eletrodo C estão muito próximos, portanto C deve ser afastado ainda mais. Em algumas malhas de aterramento, por exemplo, são requeridas

distâncias de 500 m. Outro cuidado a ser tomado diz respeito à presença de um condutor enterrado no solo, estendido na direção de medição. Tal condutor pode provocar uma falsa identificação do patamar de potencial, pois ele modifica a distribuição de potencial no solo, tendendo a “equipotencializar” a região próxima ao seu comprimento (VISACRO, 2002). Portanto, é aconselhável a aplicação do *Método da Queda de Potencial* em mais de uma direção, para verificar a consistência das medições de R_T .

Com relação aos eletrodos de prova P e C, ambos devem estar cravados firmemente no solo. No caso de C, recomenda-se que esteja em uma profundidade superior a 0,50 m, para se assegurar uma baixa resistência de aterramento para o mesmo (VISACRO, 2002). Entretanto, quando o sistema de aterramento possui um baixo valor de R_T , muitas vezes torna-se necessário utilizar configurações que utilizam várias hastes em paralelo no retorno auxiliar de corrente, para reduzir o valor da resistência de aterramento deste retorno auxiliar. Portanto, para estes casos, C é constituído não de apenas um eletrodo, mas de vários em paralelo. Esta consideração é importante, pois como o valor da resistência de C é usualmente muito superior àquele do aterramento sob teste, tal fato faz com que C se torne um elemento limitador da corrente fornecida pelo instrumento de medição, com possível comprometimento dos resultados alcançados (VISACRO, 2002). No caso de P, a corrente que o percorre é muito reduzida, deste modo a queda de tensão que nele ocorre não é importante, não sendo necessário cravá-lo tão profundamente no solo (VISACRO, 2002).

Com relação à fonte empregada na montagem mostrada na Figura 3.2, esta constitui-se em um gerador a manivela ou em um circuito oscilador eletrônico e amplificador alimentados por baterias. A forma de onda é geralmente senoidal para o gerador a manivela e quadrada para o segundo. Testes realizados mostram que correntes de alguns miliamperes até algumas centenas de amperes apresentam valores de R_T medidos que praticamente não dependem da intensidade da corrente injetada no solo (VISACRO, 2002). Porém, em muitas situações onde se tem ruídos espúrios no solo, torna-se necessário obter correntes

de intensidades da ordem de amperes para minimizar o efeito desses ruídos no sinal de corrente.

Outra série de testes mostrou que, ao se utilizar uma fonte de corrente contínua, potenciais de origem galvânica são estabelecidos no solo, tendendo a fornecer falsos resultados. Nesses casos, a medição deve ser efetuada em um período reduzido, pois este processo se intensifica quanto maior for o tempo de medição. Tal processo também ocorre em corrente alternada, mas este processo é minimizado devido à mudança de sentido do potencial a cada meio período. Quanto maior a frequência da onda gerada na fonte de potência, menor a polarização (VISACRO, 2002).

Entretanto, deve-se tomar cuidado ao se utilizar fontes que geram ondas de corrente alternada de elevadas frequências, pois isto aumenta a probabilidade da ocorrência de efeito pelicular no cabo condutor de corrente e intensifica o efeito de acoplamento magnético entre este cabo e o cabo de referência de potencial. Portanto, a escolha da frequência deve ser um compromisso no qual se deve minimizar a existência de potenciais galvânicos e tais efeitos. O valor de R_T medido em altas frequências (R_{AF}), por exemplo 150 kHz, pode também ser bem distinto do valor em baixa frequência (R_{BF}), como por exemplo 100 Hz. É necessário verificar inclusive se em frequências elevadas, o aterramento ainda se comporta como uma resistência pura.

Filtros de onda também são bastante utilizados devido a situações práticas nas quais estão presentes no solo sinais espúrios como os de corrente contínua (estabelecidas por potenciais galvânicos ou retorno de circuitos elétricos), de corrente transitórias (devido ao chaveamento de motores de passo), de correntes alternadas de baixa frequência (devido a correntes de fuga ou retorno de sistemas de energia) e de correntes alternadas de alta frequência (oriundas de sistemas de telecomunicações) (VISACRO, 2002). A função desses filtros é assegurar que apenas a corrente gerada pela fonte influa na medição, atenuando as frequências diferentes da desta corrente.

Por fim, convém ressaltar que a fonte geradora, o voltímetro e o amperímetro, mostrados na Figura 3.2, além dos filtros de onda, compõem em muitos casos um único instrumento de medição. A corrente é geralmente detectada em um transformador de corrente ou por uma queda de tensão em um resistor *shunt*. A tensão é amostrada pelos dois terminais do voltímetro e devido à alta impedância deste, um valor de corrente muito pequeno o percorre, minimizando assim as quedas de tensão nos cabos do circuito voltimétrico. Os instrumentos de medição que trabalham com sinais de baixa frequência são chamados de medidor de resistência de aterramento, terrômetro, megôhmetro ou *megger*. E a indicação da razão entre V_T e I_T medidos, ou seja, o valor de R_T , também é comumente realizada por tais instrumentos.

3.4 Medição da Resistência de Aterramento de Pé de

Torre

3.4.1 Introdução

O *Método da Queda de Potencial*, conforme descrito na seção 3.3, deve ser utilizado para medição de R_T em situações nas quais a corrente injetada pelo gerador no sistema é a mesma corrente injetada no aterramento deste sistema. No caso de um sistema de transmissão, constituído de torres interconectadas via cabo de blindagem, como mostrado na Figura 3.4, a corrente injetada pelo gerador (I_{IN}) se divide em duas parcelas: a que flui da torre para os cabos de blindagem (I_{T1}) e a que flui para o aterramento da torre (I_{F1}). A corrente I_{T1} , ao alcançar o topo da torre, ainda se divide em duas parcelas (I_{CB1} e I_{CB2}), que se propagam para as torres adjacentes via cabo de blindagem.

Percebe-se claramente, que a corrente I_{IN} , convencionalmente medida, não é a corrente que flui para a fundação e para o aterramento da torre. Consequentemente, o que é medido não é o valor da resistência de aterramento da torre em questão, mas o valor da resistência de aterramento equivalente do

conjunto de torres do sistema de transmissão. Portanto, torna-se necessário utilizar outras práticas de medição para contornar este problema.

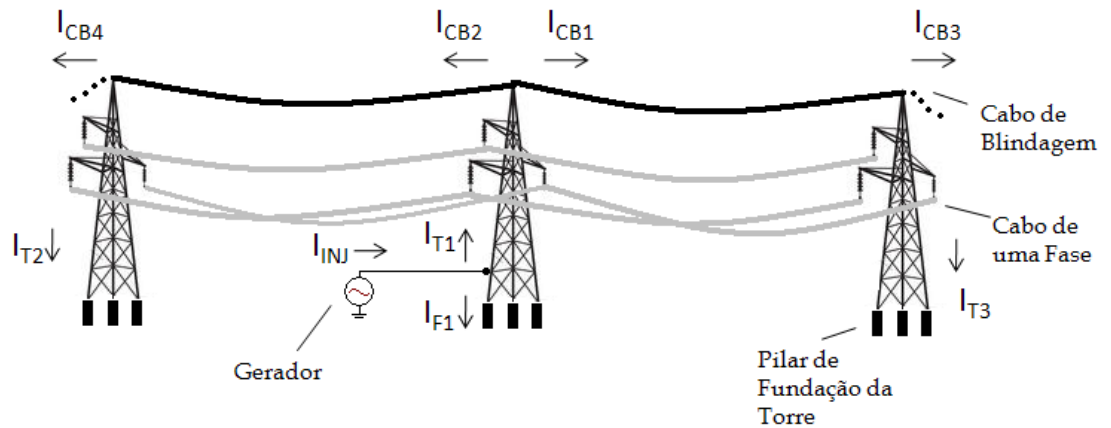


Figura 3.4 - Parcelas de corrente que percorrem um sistema de transmissão constituído por torres interconectadas via cabo de blindagem.

Basicamente, a literatura cita seis práticas diferentes de medição:

- *Uso de Ondas de Frequências Elevadas* (seção 3.4.2) e *Uso de Ondas de Tensão Impulsivas Repetitivas* (seção 3.4.3), que buscam tornar a corrente desviada para as torres adjacentes desprezível;
- *Prática de Desconexão dos Cabos de Blindagem* (seção 3.4.4), *Prática de Desconexão dos Cabos Contrapeso* (seção 3.4.5), *Uso do Transformador de Corrente* (seção 3.4.6) e *Prática de Medição da Corrente Residual* (seção 3.4.7), que buscam medir diretamente a corrente que flui para o aterramento da torre.

Cada uma dessas práticas é detalhada a seguir, incluindo os cuidados que devem ser tomados para implementação das mesmas.

3.4.2 Uso de Ondas de Frequências Elevadas

Esta prática consiste na aplicação do *Método da Queda de Potencial* utilizando-se um instrumento de medição cujo gerador associado injeta uma corrente de frequência elevada. Devido à frequência elevada, tem-se efeito pelicular intenso no cabo de blindagem com aumento do valor da impedância do cabo, que fica muito superior ao valor da R_T da torre. Apenas uma parcela desprezível de corrente é desviada para as torres adjacentes.

Os circuitos de aterramento das torres e dos cabos de blindagem de um sistema, como o da Figura 3.4, podem ser modelados através da teoria de linhas de transmissão em um circuito equivalente, conforme mostrado na Figura 3.5.

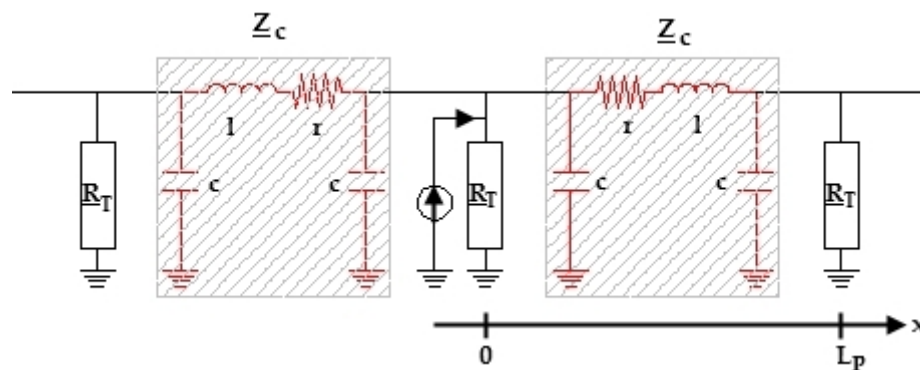


Figura 3.5 – Circuito equivalente da Figura 3.4 baseado na teoria de linhas de transmissão.

Na figura acima, têm-se que: L_p (m) é o comprimento do vão, R_T (Ω) é a resistência do aterramento da torre e Z_c é a impedância característica do circuito de cabo de blindagem com retorno para a terra, sendo esta última calculada pela equação (3.1)

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j \cdot \omega \cdot l}{j \cdot \omega \cdot c}} \quad (3.1)$$

onde: r (Ω/m), l (H/m) e c (F/m) são parâmetros por unidade de comprimento do circuito de cabo de blindagem com retorno para a terra, sendo resistência, indutância e capacitância, respectivamente.

A impedância de um vão vista de sua origem é dada pela equação (3.2)

$$\underline{Z}_0 = \underline{Z}_C \cdot \frac{\underline{R}_T + \underline{Z}_C \cdot \tanh(\gamma \cdot L_P)}{\underline{Z}_C + \underline{R}_T \cdot \tanh(\gamma \cdot L_P)} \quad (3.2)$$

onde: $\gamma = \sqrt{(r + j \cdot \omega \cdot l) \cdot (j \cdot \omega \cdot c)}$ é a constante de propagação.

Torna-se então possível representar o circuito da Figura 3.5 em um circuito equivalente reduzido, no qual cada circuito de cabo de blindagem e de resistência de aterramento da torre é representado por seu respectivo valor de \underline{Z}_0 . Ao se calcular a impedância equivalente do lado esquerdo (\underline{Z}_E) e do lado direito (\underline{Z}_D) do ponto de injeção de corrente, tem-se o circuito equivalente conforme mostrado na Figura 3.6 (a). Tal circuito pode ser simplificado ainda mais, ao se realizar o paralelo entre \underline{Z}_E e \underline{Z}_D , resultando na impedância equivalente \underline{Z}_{eq} , conforme mostrado na Figura 3.6 (b).

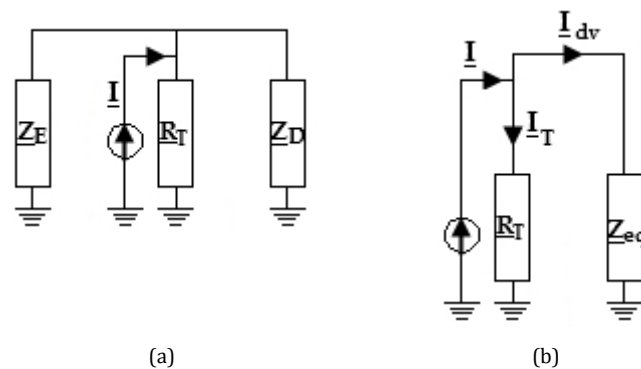


Figura 3.6 – Circuito equivalente da Figura 3.5. (a) Os aterramentos das torres e os cabos de blindagem a partir dos vãos adjacentes são representados pelas impedâncias equivalentes \underline{Z}_E e \underline{Z}_D . (b) Circuito equivalente final, no qual $\underline{Z}_{eq} = \underline{Z}_E // \underline{Z}_D$.

O objetivo do *Uso de Ondas de Frequências Elevadas* é determinar a frequência na qual o módulo de \underline{Z}_0 (e, conseqüentemente, o de \underline{Z}_{eq}) assume um valor muito maior que \underline{R}_T . Existe um valor de frequência ótimo, no qual esta diferença é máxima e que pode ser determinado através do valor de frequência que leva ao máximo valor do módulo de \underline{Z}_0 na equação (3.2). Tal valor ótimo deve ser o valor da frequência da onda de corrente injetada no sistema (I) e resulta no valor mínimo de corrente desviada (I_{dv}) para as demais torres do sistema transmissão.

Em (CIGRÉ, 2005) é apresentado um exemplo de simulação deste método para uma LT de 400 kV que possui apenas um cabo de blindagem. São realizados dois estudos para o cálculo da resistência de aterramento de pé de torre: para uma torre distante da subestação e para uma próxima à saída dessa subestação (150 m). A simulação contemplou ainda a avaliação do uso de dois valores de frequência, do valor ótimo obtido e de um valor bem inferior, 150 e 26 kHz, respectivamente. São realizadas simulações para seis diferentes valores de R_T : 1, 5, 10, 20, 30 e 50 Ω . Os resultados são sintetizados na Tabela 3.1.

Para ambos os casos, distante e próximo à saída da subestação, utilizando-se a frequência de 150 kHz, o erro máximo obtido foi de 2% (para o caso próximo à subestação e R_T igual a 50 Ω). Já para a frequência de 26 kHz, verifica-se que os erros foram significativos para os casos distante e próximo à subestação a partir de R_T igual a 30 Ω e 20 Ω , respectivamente.

Tabela 3.1 – Resumo dos resultados apresentados em (CIGRÉ, 2005). As distâncias D e S se referem às distâncias para uma torre distante e para uma torre na saída da subestação, respectivamente.

R_T (Ω)	1		5		10		20		30		50	
Distância	D	S	D	S	D	S	D	S	D	S	D	S
ϵ (%) para 150 kHz	0	0	≈ 0	0	≈ 0	0	0,25	0,5	0,5	1	1,5	2
ϵ (%) para 26 kHz	≈ 0	0	0,5	1	2	5	5	10	10	20	20	35

Os resultados apresentados da Tabela 3.1 mostram claramente a importância de se escolher o valor ótimo de frequência do sinal injetado na torre para a medição correta de R_T . Cabe ressaltar que cada LT possui um valor ótimo em particular, que depende dos tipos de estruturas de torres, dos parâmetros (r , l e c) dos cabos de blindagem, dos próprios valores de resistência de aterramento das torres e do comprimento dos vãos. Portanto, para a implementação prática do *Uso de Ondas de Frequências Elevadas*, é preciso ter um instrumento capaz de injetar sinais de corrente em um amplo espectro de frequências para identificação do valor ótimo para diferentes configurações de LTs.

Outra questão prática é que devido às altas frequências utilizadas é recomendado que o circuito de corrente seja ortogonal ao circuito de tensão, para minimizar o acoplamento magnético entre os cabos de retorno de corrente e de referência de potencial, conforme explicado na seção 3.3. Na impossibilidade desta disposição ideal dos cabos, recomenda-se que os circuitos de corrente e de tensão sejam dispostos de 180 graus entre si, que é uma configuração muito usual para medições em torres de LTs.

Em (CIGRÉ, 2005) relata-se que um instrumento de medição baseado no princípio apresentado nesta seção estava sendo desenvolvido na França e na África do Sul. Tal instrumento usaria uma fonte geradora que faria uma varredura numa faixa de espectro de frequências, até encontrar em qual valor de frequência a impedância do restante da LT possui valor mais elevado, resultando no valor mínimo de corrente desviado do aterramento no qual se pretende medir sua resistência. Entretanto, o instrumento não foi implementado na África do Sul. Na França foi desenvolvido apenas um protótipo. Atualmente, até a publicação desta dissertação, não foram encontradas novidades sobre o assunto.

3.4.3 Uso de Ondas de Tensão Impulsivas Repetitivas

Por utilizar a injeção de um sinal com componentes de frequências elevadas, esta prática utiliza o mesmo princípio do *Uso de Ondas de Frequências Elevadas* (seção 3.4.2). Porém, ao invés de utilizar o sinal senoidal, consiste na aplicação de ondas de tensão impulsivas.

Os aterramentos de torres que possuem valores de R_T menores que 25Ω podem ser considerados concentrados e as impedâncias de surto destas torres podem ser desprezadas (CIGRÉ, 2005). Dessa forma, a impedância vista pelo gerador de ondas impulsivas consiste do valor equivalente entre o paralelo de R_T e das impedâncias de surto dos cabos de blindagem Z_{CB} (valor de aproximadamente 500Ω).

Em termos práticos, o gerador de ondas impulsivas aplica centenas de impulsos de tensão por segundo, com tempo de frente da ordem de 1 μ s e 1000 V de pico, alternadamente na torre e em uma resistência R_X de valor variável (2, 5, 10, 20, 50 e 100 Ω) inserida dentro do próprio instrumento de medição. As tensões medidas são comparadas entre si através de um osciloscópio.

O valor de R_T para uma torre distante da subestação é obtida pela equação (3.3):

$$R_X = R_T \cdot \frac{1}{1 + 2 \cdot R_T / Z_{CB}} \quad (3.3)$$

É perceptível que mesmo com todas as simplificações realizadas, ainda é imprescindível o conhecimento do valor de Z_{CB} . Além disso, R_X assume somente alguns poucos valores inteiros, de modo que a onda de tensão que o percorre é no máximo uma aproximação razoável da elevação de potencial promovida no aterramento. Na Tabela 3.2 estão os valores obtidos de R_T , ao se utilizar (3.3), para cada valor possível de R_X supondo $Z_{CB} = 500 \Omega$. São verificadas diferenças percentuais grandes de 25% e 66,7% para R_X igual a 50 Ω e 100 Ω , respectivamente. Tais valores são comuns em resistências de aterramento de pé de torre no Brasil, de modo que a aplicação deste método pode resultar em erros grosseiros de medição deste parâmetro.

Tabela 3.2 – Valores obtidos de R_T para cada valor possível de R_X , ao se utilizar (3.3) considerando $Z_{CB} = 500 \Omega$.

$R_X (\Omega)$	2	5	10	20	50	100
$R_T (\Omega)$	2,02	5,10	10,42	21,74	62,50	166,67
$\varepsilon (\%)$	1	2	4,2	8,7	25	66,7

Para uma modelagem mais precisa, têm-se ainda que levar em conta as impedâncias de surto das torres e as resistências de aterramento das torres adjacentes, o que torna este método complexo e inviável para ser aplicado de maneira operacional.

Segundo (CIGRÉ, 2005), um instrumento de aplicação foi desenvolvido na Polônia, mas não existem evidências da precisão do método. É relatado ainda que

um equipamento similar foi testado na Bélgica há mais de 30 anos atrás e abandonado devido a falta de resultados satisfatórios. Na França, o método foi testado com sucesso, contudo realizando a desconexão dos cabos de blindagem. Atualmente, até a publicação desta dissertação, não foram encontradas novidades sobre o assunto.

3.4.4 Prática de Desconexão dos Cabos de Blindagem

Ao se realizar a desconexão do cabo de blindagem, pode-se utilizar o *Método da Queda de Potencial* para medir a R_T de uma torre específica utilizando-se um medidor de resistência de aterramento convencional, conforme descrito na seção 3.3. Em linhas energizadas, as hastes devem estar em alinhamento perpendicular ao eixo longitudinal da LT para se evitar a ocorrência de induções eletromagnéticas (CEMIG, 2003), conforme mostrado na Figura 3.7.

Apesar de esta prática obter resultados satisfatórios, a desconexão do cabo de blindagem é uma tarefa indesejada. Para linhas energizadas, torna-se uma tarefa perigosa, que consome muito tempo, necessita de uma equipe especializada e possui custo elevado. Outra opção seria trabalhar com a linha desenergizada, o que causa perdas econômicas para a concessionária e falta de energia elétrica para os consumidores. Portanto, tal prática deve ser evitada. Entretanto, conforme relatado em (CIGRÉ, 2005), países como Estados Unidos, Finlândia e República Tcheca fazem uso desta prática para medição de R_T .

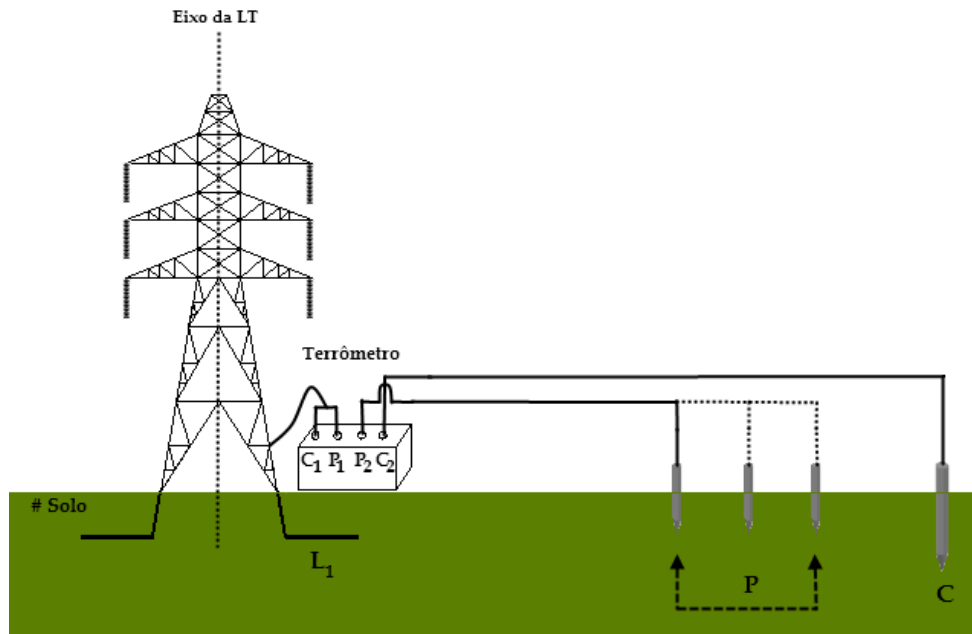


Figura 3.7 - *Prática de Desconexão dos Cabos de Blindagem*: esquema de medição de resistência de aterramento utilizando um medidor convencional. O eletrodo auxiliar de corrente C deve ser posicionado a uma distância pelo menos cinco vezes maior do que a distância entre o eixo da LT e a extremidade do cabo contrapeso de comprimento L_1 . O eletrodo de potencial P deve ser posicionado inicialmente a 60% da distância a qual C está posicionado. Em seguida a posição de P é variada de 10% do valor da distância de C, até ser encontrada uma diferença de medição de resistência de aterramento menor que 2%.

3.4.5 *Prática de Desconexão dos Cabos Contrapeso*

Nesta prática, cada cabo contrapeso é desconectado da estrutura da torre e são interligados por um ponto em comum. As considerações quanto à medição são as mesmas da *Prática de Desconexão do Cabo de Blindagem* (seção 3.4.4). Porém, acrescenta-se, ainda, o fato dessa prática desprezar o papel do aço e do concreto presentes nas fundações das torres, que atuam de fato como elementos constituintes do aterramento. O valor da resistência de aterramento de algumas fundações chega a ser comparável com a resistência dos eletrodos de aterramento do sistema, conforme explicado na seção 3.2. Portanto, pode-se ocorrer um erro muito significativo ao se desprezar as fundações da torre e esta prática deve ser evitada. A desconexão dos cabos contrapeso nem sempre é possível, notadamente quando se tem a conexão da torre e eletrodo interna ao concreto da fundação.

3.4.6 Uso do Transformador de Corrente

Conforme descrito na seção 3.4.1, o uso de um medidor comercial para medição de resistência de aterramento de uma torre não apresenta resultados precisos, pois somente uma parcela da corrente flui para o aterramento, o restante flui em direção às torres adjacentes via cabo de blindagem. Uma solução possível para este problema é realizar a medição da corrente que de fato flui para o aterramento, utilizando um transformador de corrente acoplado ao redor da perna da torre, conforme mostrado na Figura 3.8. Dessa forma, o valor da resistência de aterramento da perna da torre é obtido pelo *Método da Queda de Potencial*, dado pela simples razão dos valores de tensão e corrente medidos.

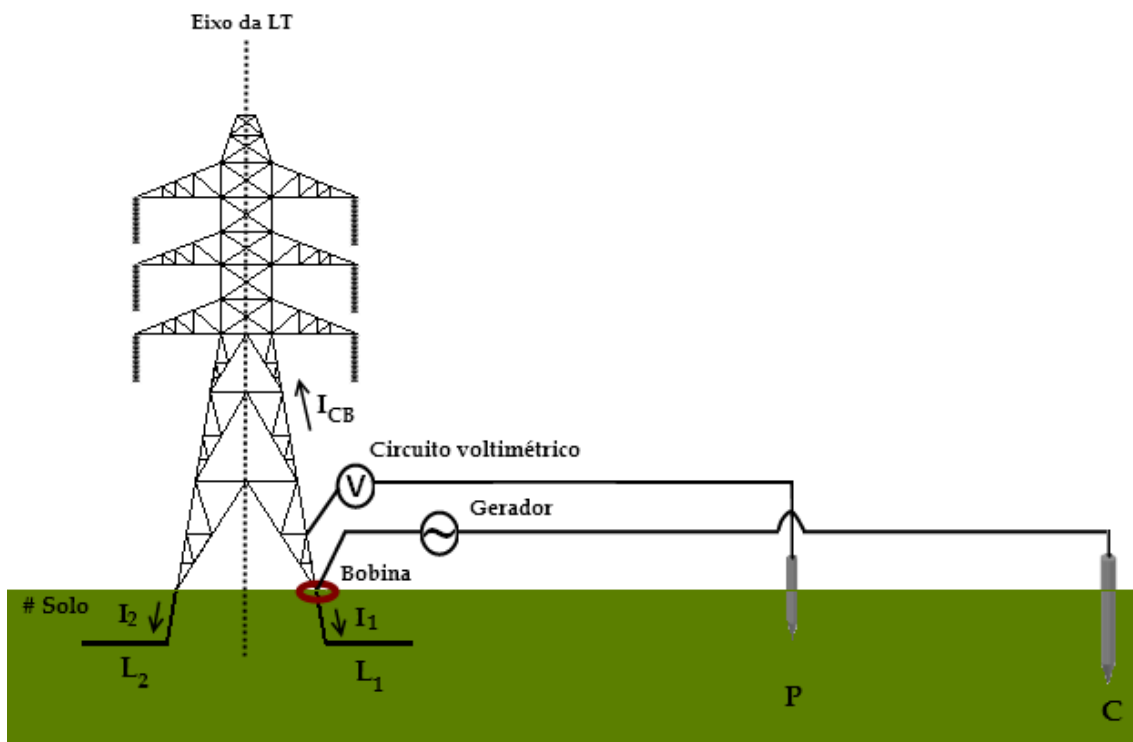


Figura 3.8 – *Uso do Transformador de Corrente*: esquema básico de aplicação. As correntes I_1 e I_2 partem em direção aos cabos contrapeso L_1 e L_2 , respectivamente. A corrente I_{CB} parte em direção ao cabo de blindagem. No caso em questão, I_1 é a corrente que está sendo medida.

Como a torre de transmissão possui quatro pernas, torna-se necessário repetir a medição para cada uma delas. O valor da resistência de aterramento da torre é dado pelo valor resultante da conexão em paralelo das medições individuais de cada uma das pernas, conforme mostrado na equação (3.4):

$$R_T = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^{-1} \quad (3.4)$$

Outra opção para medição da R_T da torre é utilizar quatro transformadores de corrente (um para cada perna da torre) e realizar a medição simultaneamente.

Em (IEEE STD 81, 2012) é relatado que ruídos de alta frequência podem interferir nos resultados neste tipo de medição. Em (CIGRÉ, 2005) é relatado que para minimizar interferências causadas por correntes de 50 Hz (e harmônicos) e por outras correntes de diferentes frequências deve-se utilizar ou um gerador capaz de injetar uma corrente de amplitude elevada ou trabalhar com um gerador de frequências elevadas. Relata-se ainda que para sistemas de potência, o uso de bobinas de *Rogowski* em substituição aos transformadores de corrente pode ser mais adequado.

3.4.7 Prática de Medição da Corrente Residual

Esta prática consiste em uma aplicação do *Método da Queda de Potencial*, entretanto sem a utilização de um circuito gerador. Em substituição a tal circuito, é utilizada a corrente que circula naturalmente do cabo de blindagem para o sistema de aterramento através das torres metálicas, como fonte. Tal corrente é designada corrente residual. A resistência de aterramento é calculada pelas medições da corrente residual na base da torre e da elevação de potencial na torre em relação ao terra remoto.

Embora não seja necessário um circuito gerador de corrente, a medição da corrente residual representa um enorme desafio devido a sua baixa magnitude (da ordem de dezenas a centenas de miliamperes) e pelo fato de ser suscetível a interferências magnéticas do ambiente (SALAMANCA et al., 2016a).

Na aplicação da *Prática de Medição da Corrente Residual*, o sistema de medição de GPR é composto por um módulo analógico de 24 bits de resolução, com uma taxa de amostragem de 50 kS/s e faixa de medição de +10 V. Utiliza-se ainda um circuito para filtragem de componente contínua. O sistema de medição de

corrente é composto por um conjunto de quatro sensores comerciais do tipo bobina de *Rogowski*, circuitos de amplificação e filtragem, além de um módulo analógico com quatro canais de entrada simultâneos, com mesma resolução e taxa de amostragem do sistema de medição de GPR (SALAMANCA et al., 2016b). A corrente residual é dada pelo somatório das quatro correntes medidas em cada uma das pernas da torre, então a resistência de aterramento é calculada como a razão entre os valores eficazes de GPR e da corrente residual.

Em (SALAMANCA et al., 2016b) é realizado um estudo experimental comparativo entre implementações da *Prática de Medição da Corrente Residual*, do *Uso de Ondas de Frequências Elevadas* e do *Uso do Transformador de Corrente*. A primeira prática é descrita no parágrafo anterior. Na segunda, utiliza-se um gerador de ondas quadradas de corrente de frequência de 25 kHz e um voltímetro. Na terceira, utiliza-se um gerador de corrente de frequência 128 Hz, um voltímetro e um medidor de corrente de 4 canais que utiliza bobinas de *Rogowski*. Para ambas as práticas, o eletrodo do circuito de tensão foi submetido a deslocamentos sucessivos e registrava-se o valor da resistência a cada deslocamento. Desse modo, foi possível obter uma curva de resistência em função do deslocamento da haste. O valor adotado da resistência de aterramento foi referente ao valor no qual a curva de resistência tornava-se aplanada.

Os resultados comparativos apresentados em (SALAMANCA et al., 2016b) foram realizados em quatro torres de diferentes LTs da Copel Geração e Transmissão, mostrados na Figura 3.9. As correntes residuais medidas estão na faixa de 250-900 mA.

Verifica-se pela Figura 3.9 (a) que os resultados obtidos pelo *Uso do Transformador de Corrente* (FOP/Clamp-on) e pelo *Uso de Ondas de Frequências Elevadas* (HFM) foram muito próximos, apresentando uma diferença no valor da resistência de aterramento de 9%. O resultado obtido pela *Prática de Medição da Corrente Residual* (RCM) apresentou uma diferença muito grande em relação aos anteriores, de cerca de 40%.

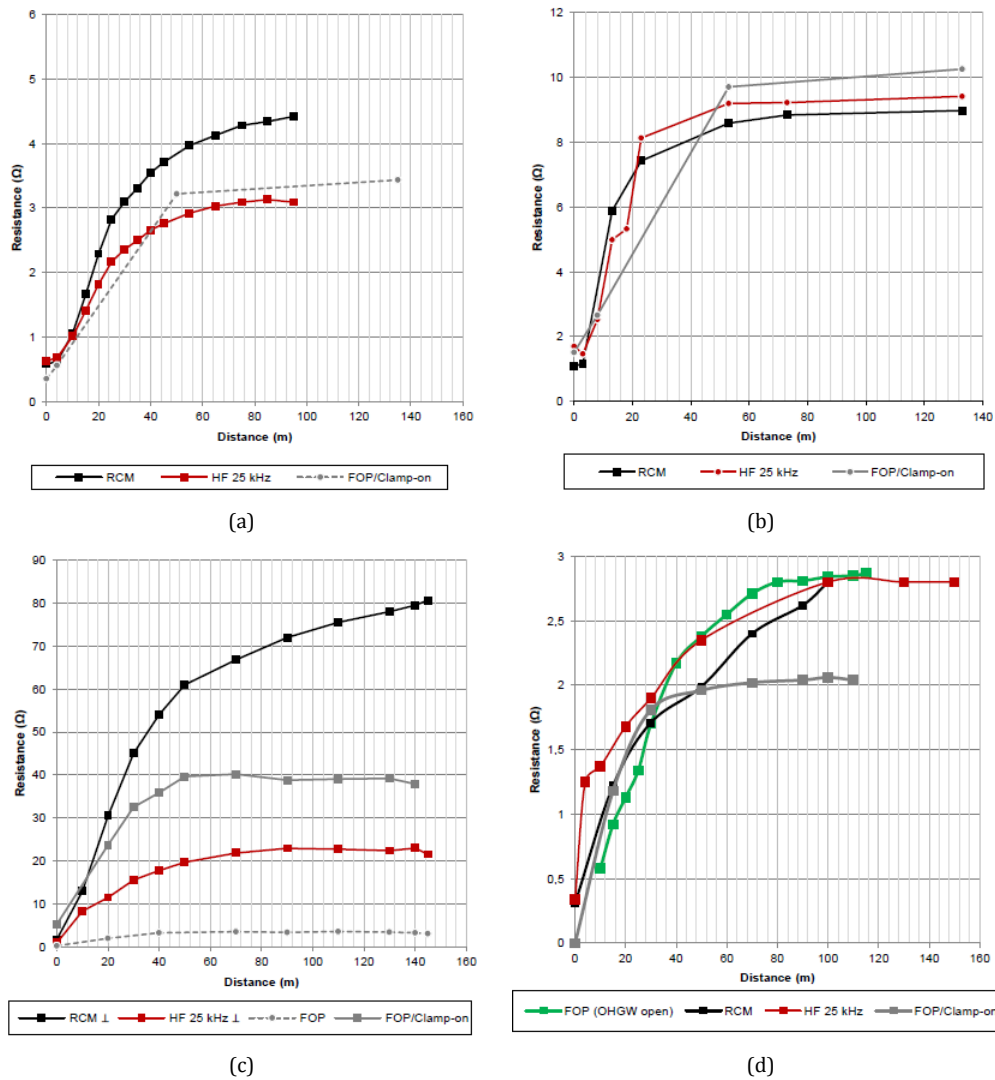


Figura 3.9 – Curvas de resistência em função do deslocamento da haste de potencial para as torres: (a) CTL SMC 011, (b) JGI SEG 003, (c) JGI BTA 297 e (d) CTA CTL 068. Retirado de (SALAMANCA et al., 2016b).

Verifica-se pela Figura 3.9 (b) que os resultados obtidos por todas as práticas se mostraram satisfatórios.

Na Figura 3.9 (c) foram verificadas diferenças muito significativas entre os valores de resistência obtidos pelas práticas. Em (SALAMANCA et al., 2016b) relata-se que pelo fato da resistividade do solo ser elevada, o desempenho do HFM é comprometido, pois grande parte da corrente é desviada para as torres adjacentes via cabos de blindagem. Outras conclusões do autor são que o *Método da Queda de Potencial (FOP)* não pode ser utilizado, pois leva a erros enormes e, que o valor de corrente injetado pelo instrumento na prática FOP/Clamp-on foi

muito menor que o da corrente residual medida (de 250 mA), o que compromete a confiabilidade da medição desta prática.

Na Figura 3.9 (d) é mostrado também um resultado específico, não apresentado nas figuras anteriores, no qual é utilizado o *Método da Queda de Potencial* (FOP/OHGW open) no qual o cabo de blindagem estava desconectado da torre, portanto este caso foi utilizado como referência. Verifica-se que as práticas RCM e HFM convergiram para o mesmo valor do FOP/OHGW open. Entretanto, o FOP/Clamp-on apresentou uma diferença considerável em relação às outras práticas. Em (SALAMANCA et al., 2016b) tal diferença é atribuída pelo fato do FOP/Clamp-on ter sido afetado pelo alto valor de corrente residual (800 mA) e pelo equipamento não ter conseguido aplicar o filtro corretamente na corrente injetada.

3.5 Medição da Resposta Impulsiva de Aterramentos de Pé de Torre

3.5.1 Impedância Impulsiva como Parâmetro para Avaliar a Resposta Impulsiva de Aterramentos Elétricos

Conforme descrito no Capítulo 2 desta dissertação, quando eletrodos de aterramento são submetidos a correntes impulsivas (tais como correntes de descargas atmosféricas), eles apresentam um comportamento bem distinto do apresentado para correntes de baixa frequências (tais como correntes de curto-circuitos).

Para fenômenos de baixas frequências, a resposta do eletrodo pode ser sintetizada pelo valor de sua resistência de aterramento, R_{BF} . Para correntes de descargas atmosféricas, muitas normas relacionadas com aplicações de proteção recomendam também apenas um baixo valor de R_{BF} para assegurar melhorias na resposta de eletrodos de aterramento frente a correntes impulsivas. Entretanto,

tem-se de maneira geral, que para fenômenos rápidos, o valor de R_{BF} não é um bom parâmetro para descrever a resposta de um aterramento (VISACRO, 2015).

Na literatura, diversos parâmetros têm sido utilizados para expressar o comportamento de eletrodos submetidos a correntes impulsivas. Ainda não existe um consenso entre os autores sobre quais parâmetros devem ser utilizados para caracterizar tal comportamento. Entretanto, o parâmetro Z_P tem ganhado um destaque em grande parte das publicações. Através dele, pode-se determinar rapidamente o máximo valor de GPR ao qual o eletrodo é submetido pela passagem da corrente, dado pelo produto de Z_P pelo valor de pico de corrente.

Verifica-se que um baixo valor de R_{BF} não implica em um baixo valor de Z_P , exceto para eletrodos muito curtos. Eletrodos longos ($L \gg L_{EF}$) possuem sempre um valor de R_{LF} menor que o de Z_P (VISACRO, 2015), conforme mostrado na Figura 2.5. Resultados recentes mostram que o uso de R_{BF} para a representação de eletrodos de aterramento de LTs leva a erros na avaliação do desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas de 20% a 50% para solos de resistividade iguais ou maiores que $300 \Omega m$ (VISACRO e SILVEIRA, 2016).

Outro aspecto relevante, verificado recentemente por Visacro e Silveira, é que o uso de Z_P como parâmetro concentrado, para a representação de eletrodos de pé de torre no cálculo do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, leva a resultados praticamente idênticos ao se utilizar a representação física desses eletrodos. Dessa forma, pode-se utilizar um número real simples, correspondente ao valor de Z_P , para representar os eletrodos de pé de torre e obter uma avaliação consistente do desempenho de linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas (VISACRO e SILVEIRA, 2016).

São descritas nas subseções seguintes dois dos principais métodos atualmente utilizados para medição de Z_P de estruturas de LTs.

3.5.2 Medição com Uso de Medidor de Impedância Impulsiva

A partir de concepção de Visacro (VISACRO, 2007), foi recentemente desenvolvido no LRC um medidor portátil de impedância impulsiva (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES e VISACRO, 2014), Figura 3.10 (a). Tal medidor possui dimensão de 25 x 10 cm, peso de aproximadamente 1,5 kg e é alimentado por duas pequenas baterias de 12 V, que plenamente carregadas garantem cerca de 4 horas de medições contínuas em campo. Os resultados das medições são armazenados em um módulo de memória não volátil e consistem de GPR, corrente, Z_p e estimativa de R_{BF} obtidos pela aplicação de ondas impulsivas de aproximadamente 500 V de amplitude geradas pelo próprio aparelho medidor: 0,4/500 μ s e 3,5/500 μ s, representativas de primeira descarga e de descarga subsequente, respectivamente. Na Figura 3.10 (b) têm-se os resultados obtidos na aplicação da onda de 3,5/500 μ s. Os tempos de frente e de duração total das ondas podem ainda ser alterados facilmente com a escolha de capacitores e resistores adequados.

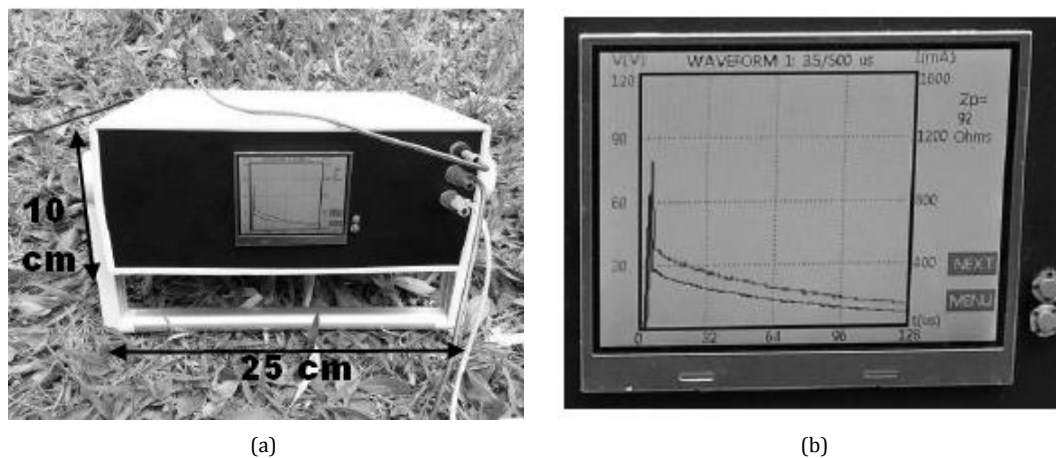


Figura 3.10 – Medidor de Impedância Impulsiva. (a) Vista frontal com as dimensões do medidor e (b) exemplo de resultados exibidos na tela LCD: GPR, corrente e Z_p . Retirado de (RODRIGUES, 2014).

Os dados de todas as medições realizadas pelo aparelho e armazenadas em memória não volátil podem ser transferidos para um computador via interface serial. Dessa forma, tais dados podem ser trabalhados de diversas formas pelo usuário. Detalhes construtivos do medidor e a validação dos resultados obtidos em condição de campo para aterramentos compostos de hastes verticais, de eletrodos horizontais e por uma malha de aterramento podem ser consultados em (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES e VISACRO, 2014).

O método de medição proposto por Visacro baseia-se no uso do medidor de impedância impulsiva aplicado ao *Método da Queda de Potencial*, conforme mostrado na Figura 3.11.

O medidor possui três terminais, numerados de 1 a 3:

- O terminal 1 deve ser conectado ao aterramento sob teste. Através desta conexão, ondas impulsivas de corrente são injetadas no aterramento promovendo a elevação de potencial deste em relação ao terra remoto. Caso a corrente injetada pelo instrumento seja a mesma corrente injetada no aterramento, o registro da forma de onda dessas correntes é realizado através de um resistor *shunt* interno. Caso contrário, a medição de corrente é realizada por uma bobina de *Rogowski*, conforme mostrado na Figura 3.11, sendo o resistor *shunt* desconectado automaticamente pelo *software*.
- O terminal 2 deve ser conectado ao eletrodo auxiliar de referência de potencial localizado no terra remoto.
- O terminal 3 deve ser conectado aos eletrodos auxiliares de corrente para formar um percurso fechado para circulação da corrente injetada.

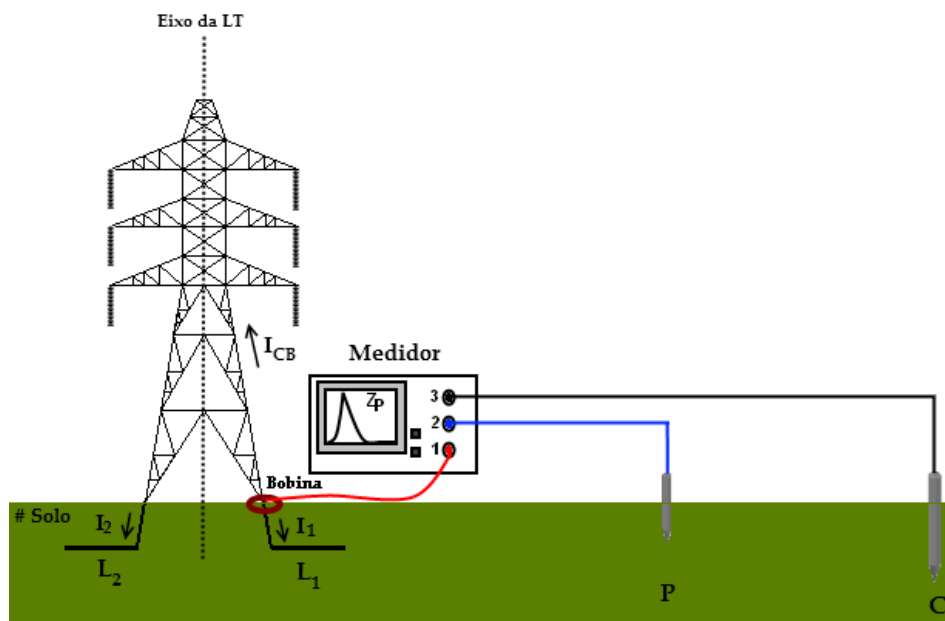


Figura 3.11 – Aplicação do método medição de impedância impulsiva proposto por Visacro para uma torre de LT: uso do medidor de impedância impulsiva com bobina de *Rogowski*.

Um aspecto importante que convém ser enfatizado é que a disposição dos eletrodos P e C na Figura 3.11 foi realizada apenas para uma melhor visualização. Na prática, para minimizar o acoplamento magnético entre os cabos condutores de potencial e corrente, tais eletrodos devem ser dispostos em uma linha imaginária em direção oposta (quando a torre não apresenta cabos contrapeso) ou ortogonalmente entre si (quando há presença de cabos contrapeso).

3.5.3 Medição com Uso de Onda de Degrau de Tensão

Em 2008 foi desenvolvido pelo EPRI (*Electric Power Research Institute*), com ativa participação do pesquisador Chisholm, o *Zed-Meter* (EPRI, 2008), um instrumento que obtém a impedância de um aterramento devido à aplicação de uma onda impulsiva. A vista externa e os componentes internos do instrumento são mostrados na Figura 3.12 (a) e (b), respectivamente. Tal instrumento possui dimensões de 450 x 300 x 200 mm (comprimento x altura x profundidade), peso de 30 kg e tempo de operação de 1-8 horas (dependendo da temperatura ambiente).

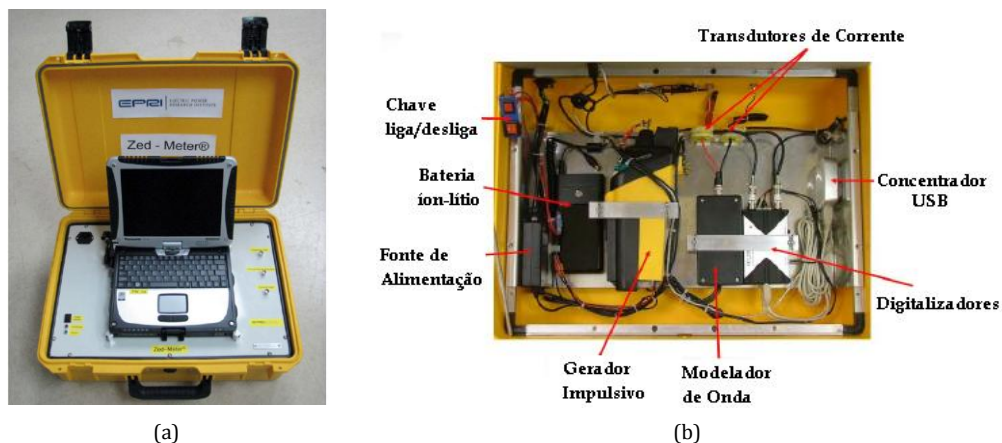


Figura 3.12 – *Zed-Meter*: (a) vista externa e (b) componentes internos. Adaptado de (EPRI, 2008).

Os resultados das medições consistem de GPR, corrente e $z(t)$ (calculada como a razão dos valores instantâneos de tensão e corrente) devido à aplicação de um impulso de tensão (Figura 3.13). Eles são exibidos e armazenados em um computador portátil, componente do *Zed-Meter*, através de um *software* desenvolvido em plataforma *Labview 8.1*.

O *Zed-Meter* não realiza o cálculo de Z_p , mas o mesmo pode ser obtido através dos valores de pico das curvas de GPR e de corrente exibidos pelo instrumento. Na realidade, o *Zed-Meter* obtém a curva de $z(t)$ e calcula o valor médio desta impedância em uma faixa de tempo determinada pelo usuário, na qual o valor de $z(t)$ se estabiliza.

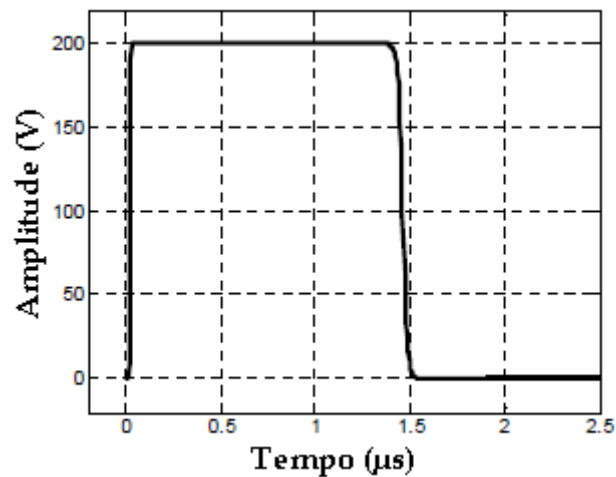


Figura 3.13 – Onda impulsiva de tensão típica gerada pelo *Zed-Meter*. Adaptado de (EPRI, 2008).

O esquema do método de medição de $z(t)$ proposto por Chisholm é mostrado na Figura 3.14. Neste esquema, o *Zed-Meter* é representado pelo conjunto que inclui o gerador de onda impulsiva, voltímetro e dois transdutores para medição de corrente.

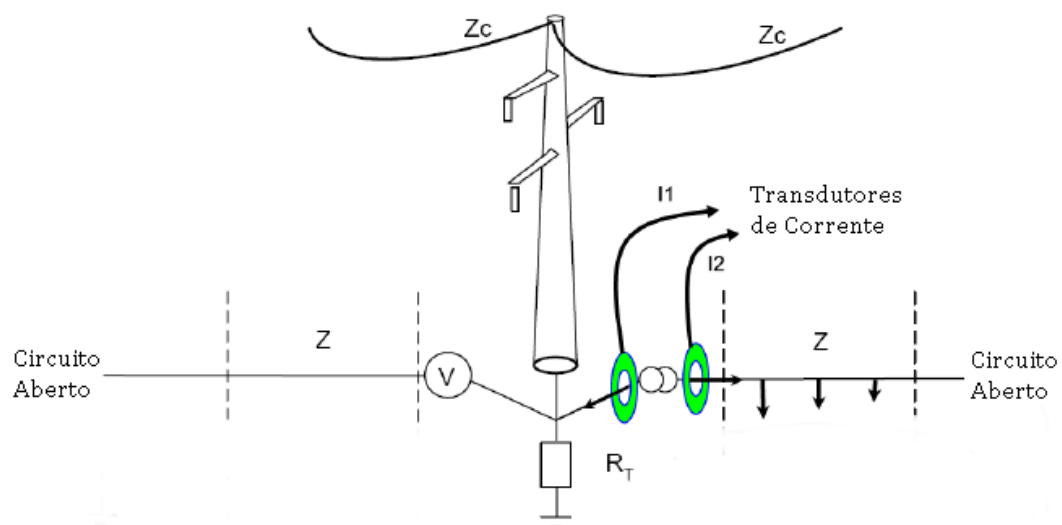


Figura 3.14 – Circuito equivalente do método de medição de impedância de torre de transmissão para um solo congelado, proposto por Chisholm, onde: R_T é a resistência de aterramento da torre, Z_c é a impedância de surto do cabo de blindagem, Z é a impedância dos cabos de medição. Adaptado de (EPRI, 2008).

O princípio básico de funcionamento consiste na aplicação de um determinado número de impulsos de tensão (conforme mostrado na Figura 3.13) no sistema de aterramento através de um gerador de ondas. São realizadas as medições de GPR e das correntes injetada no sistema (I_1) e de retorno (I_2). A medição dessas duas correntes é realizada para controle de qualidade do medidor. Em uma situação normal, inicialmente elas devem apresentar valores diferentes, mas se estabilizam em um mesmo valor por volta de 200 ns. Para cada impulso, as ondas digitalizadas de GPR, I_1 e I_2 são transferidas para o computador do *Zed-Meter* via cabo USB. Em seguida, o *Labview* realiza a média de cada um desses três parâmetros de acordo com o número de impulsos escolhido pelo usuário.

Após a média, são gerados dois vetores de impedância transitória: o primeiro, dado pela razão entre o GPR e a corrente $i_1(t)$, ou seja, $z_1(t) = v(t)/i_1(t)$ e, um segundo, dado pela razão entre o GPR e a corrente $i_2(t)$, ou seja, $z_2(t) = v(t)/i_2(t)$. Por fim, são calculados os valores médios de $z_1(t)$ e $z_2(t)$ para o intervalo de tempo no qual as oscilações tenham se estabilizado e o efeito de reflexão causado pela terminação do cabo de retorno de corrente não tenha chegado ao ponto de medição.

Os cabos de retorno de corrente e de referência de potencial mostrados na Figura 3.14 possuem comprimento de 90-125 m. De acordo com (EPRI, 2008), esses cabos devem estar dispostos entre si em um ângulo de 180° para casos de torres sem cabos contrapeso ou cabos radiais enterrados, e de 90° para casos em que há cabos contrapeso. Ainda de acordo com a mesma referência, tais cabos não precisam ter suas extremidades aterradas por um eletrodo, exceto em casos nos quais potenciais ou correntes de valores elevados são induzidos nesses cabos. A justificativa para isso foi que testes realizados mostraram que os resultados obtidos de $z(t)$ para a faixa de 500-1000 ns são muito parecidos aterrando ou não tais cabos, quando um número suficiente de impulsos é aplicado para se obter a média.

Verifica-se ainda pela Figura 3.13 que somente parte da corrente I_1 é de fato injetada no aterramento. A outra parte flui pela torre em direção aos cabos de blindagem. Portanto, para uma medição mais precisa, utilizando-se o *Zed-Meter*, é

recomendando que os cabos de blindagem sejam desconectados da estrutura. Caso contrário, haverá um erro de medição devido à parcela da corrente que flui pela torre.

Nas Figuras 3.14 (a), 3.14 (b) e 3.15 têm-se os resultados das medições das impedâncias transitórias $z_1(t)$ e $z_2(t)$ de torres reais obtidos pelo *Zed-Meter*. Para os dois primeiros casos, são apresentados também os valores de R_{BF} medidos utilizando-se um instrumento convencional.

A Figura 3.15 (a) apresenta resultados relativos a uma torre treliçada. O valor medido de R_{BF} foi de 23Ω e o valor médio de $z(t)$ na região de patamar entre 300-1000 ns foi de $12,2 \Omega$. Na Figura 3.15, tem-se o caso de uma torre tipo poste de aço. O valor medido de R_{BF} foi de 40Ω e o valor médio de $z(t)$ na região de patamar entre 500-1000 ns foi de $15,1 \Omega$. Para ambos os casos, as curvas de desvio padrão apresentaram valores relativamente pequenos nas regiões analisadas, o que caracteriza que as diferenças entre os valores de $z_1(t)$ e $z_2(t)$ são pequenas nessas regiões.

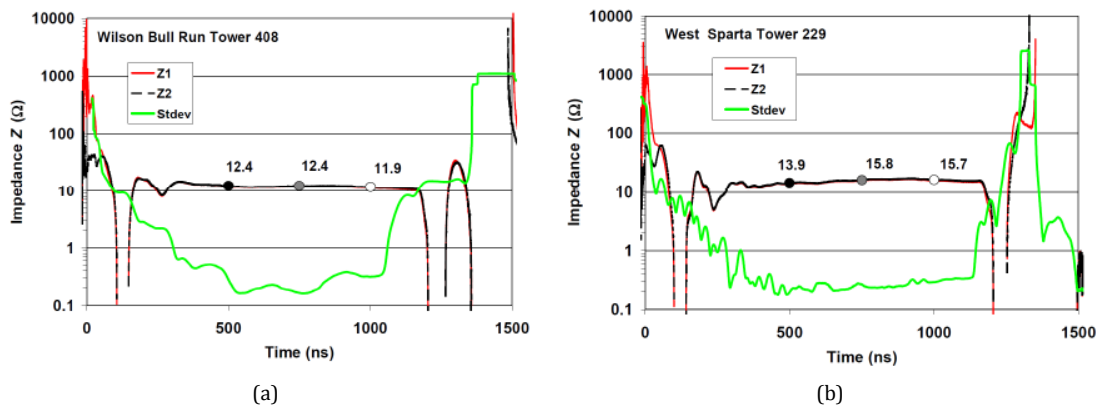


Figura 3.15 – Medição de $z(t)$ com o *Zed-Meter*. Casos: (a) torre treliçada isolada de 500 kV e $R_{BF} = 23 \Omega$ (b) torre tipo poste de aço de 161 kV e $R_{BF} = 40 \Omega$. Retirado de (CHISHOLM et al., 2009).

Na Figura 3.16, tem-se o caso de uma torre em formato H estaiada com 16 cabos de sustentação. Para este caso, as curvas de $z_1(t)$ e $z_2(t)$ apresentaram oscilações significativas e a curva de desvio padrão apresentou valores elevados até aproximadamente 700 ou 750 ns. Segundo (CHISHOLM et al., 2009), torres com múltiplos cabos de sustentação apresentam oscilações na curva $z(t)$ e a torre em formato H constitui o pior caso dentre as testadas.

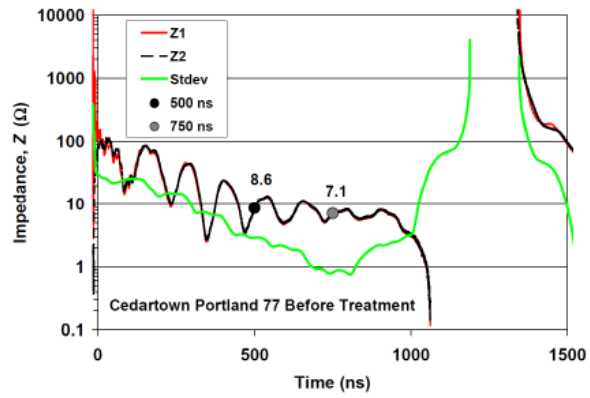


Figura 3.16 – Medição de $z(t)$ com o Zed-Meter. Caso torre em formato H estaiada com 16 cabos de sustentação e tensão de operação de 230 kV. Retirado de (CHISHOLM et al., 2009).

4 Desenvolvimentos Experimentais

4.1 Introdução

Neste Capítulo são apresentados detalhes sobre os testes desenvolvidos nesta dissertação, cujos resultados estão contidos no Capítulo 5.

Na seção 4.2 são apresentadas as configurações de aterramento utilizadas para testes. Estas consistem em um aterramento concentrado, constituído por pequenas hastes verticais, e um modelo em escala semirreal de aterramento de LTs, constituído por hastes verticais e cabos contrapesos.

Na seção 4.3 são descritos os testes para obtenção da resposta impulsiva para os aterramentos da seção 4.2. É utilizada uma técnica não-convencional, que consiste no uso de condutores curtos nos circuitos de corrente e/ou tensão, que funcionam como linhas de transmissão artificiais de baixa velocidade de propagação. É utilizada também uma configuração de referência, que consiste no uso de cabos comuns de comprimentos longos nos circuitos de corrente e de tensão. São mostrados os arranjos experimentais utilizados para obtenção das formas de onda de GPR e de corrente injetada. A partir dessas formas de onda, são obtidas as curvas de $z(t)$ e os valores de Z_p , mostrados no Capítulo 5.

Na seção 4.4 são descritos os testes para obtenção da resposta em baixas frequências para os aterramentos da seção 4.2. São mostrados os arranjos experimentais utilizados para obtenção das formas de onda de GPR e de corrente injetada, para um gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas

implementado. O valor de R_{BF} é obtido através da razão dos valores de pico de GPR e de corrente injetada, como mostrado no Capítulo 5. Ainda na seção 4.4, são mostrados os arranjos experimentais para obtenção dos valores de R_{BF} obtidos para quatro instrumentos comerciais. Nesses testes são inseridos resistores em série no circuito de corrente com o intuito de avaliar os efeitos de erros de leitura nos instrumentos de baixa frequência devido à atenuação do sinal e à presença de ruídos espúrios.

4.2 Configurações de Aterramento

Foram testadas duas configurações típicas de aterramentos. A primeira era composta por hastes curtas verticais interconectadas, compondo um aterramento concentrado. Nos testes desta configuração simplificada seriam experimentadas e superadas as diversas dificuldades envolvidas na complexa medição envolvendo ondas impulsivas de corrente. Isto facilitaria o enfrentamento posterior das dificuldades de medição no caso mais próximo do aterramento de uma linha real.

A segunda configuração era composta por cabos contrapeso (típica de torres de LTs). Detalhes dos aterramentos sob teste são apresentados abaixo.

4.2.1 Hastes Verticais (aterramento concentrado)

O aterramento concentrado consiste em cinco hastes verticais de 0,7 cm de raio e 0,5 m de comprimento interconectadas por cabos de cobre de 0,50 mm² e espaçadas de aproximadamente 1,20 m, conforme mostrado na Figura 4.1.

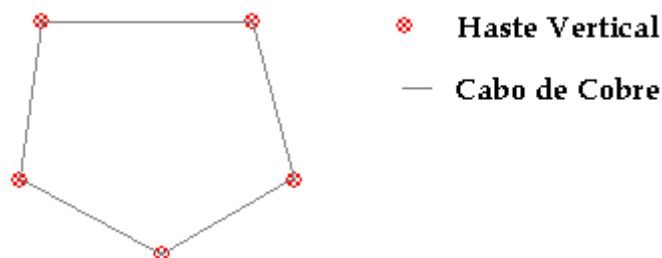


Figura 4.1 – Arranjo de aterramento concentrado composto por pequenas hastes verticais.

4.2.2 Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal)

O aterramento em escala semirreal consiste de quatro cabos radiais de aço galvanizado de 3/8" e 10,6 m de comprimento, enterrados a uma profundidade de 30 cm e conectados a quatro hastes verticais de 1 m de comprimento e 3/4" de diâmetro como mostrado na Figura 4.2. As hastes verticais são separadas por uma distância de 1,75 m e são conectadas entre si por cabos de cobre de 0,50 mm².

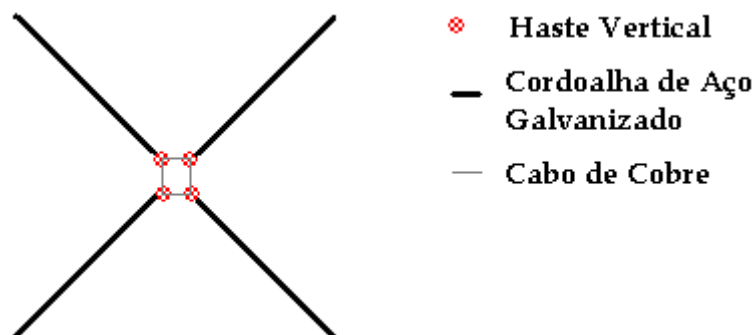


Figura 4.2 – Arranjo de aterramento em escala semirreal composto por cabos contrapeso e hastes verticais.

4.3 Descrição dos Testes Relativos à Medição da Resposta Impulsiva

São realizados testes de aplicação do uso de unidades de condutores formados por fios enrolados curtos, chamados de ATL nesta dissertação, nos circuitos de corrente e/ou tensão, para os aterramentos apresentados na seção 4.2. Detalhes construtivos de tais unidades são apresentados na seção 4.3.3.1 e os resultados são apresentados no Capítulo 5.

Entretanto, para verificar a aplicabilidade do uso das unidades de ATL e a consistência dos resultados, torna-se necessário utilizar um arranjo de referência.

Na aplicação do arranjo de referência são utilizados cabos condutores de comprimentos longos. O comprimento do cabo utilizado no circuito de corrente deve ser de pelo menos cinco vezes o comprimento da maior dimensão linear do aterramento (IEEE STD 81, 2012; CIGRÉ, 2005), para evitar efeito de acoplamento

condutivo entre os aterramentos sob teste e auxiliar. Já o cabo do circuito de tensão deve ser de tamanho suficiente para posicionar o eletrodo de referência no patamar de potencial. São relatados na literatura, em medições de torres de transmissão, comprimentos para o cabo condutor de corrente de 75 m (CIGRÉ, 2005), em uma faixa de 90-150 m (CHISHOLM et al., 2014), de 150 m (CHOI e LEE, 2012), em uma faixa de 150-300 m (XEMARD et al., 2008) e de 600 m (MOTOYOMA, 2007). Para os cabos condutores de referência de potencial, são relatados na literatura comprimentos de 40 m (CIGRÉ, 2005), em um faixa de 25-100 m (CHISHOLM et al., 2010), de 150 m (CHOI e LEE, 2012), de 280 m (MOTOYOMA, 2007).

A montagem de arranjos experimentais de medição utilizando cabos condutores da ordem usual de centenas de metros é uma tarefa dispendiosa e que em alguns casos pode não ser realizada devido a limitações espaciais do terreno. Em um trabalho recente (LIMA, 2015) foi proposto o uso de unidades de ATL no circuito de corrente para a medição de $z(t)$. Entretanto, os correspondentes desenvolvimentos foram bastante limitados e específicos, sendo aplicados apenas a arranjos de eletrodos reduzidos (hastes verticais de 2,4 m e eletrodos horizontais de 6, 12 e 18 m). Isto não permite concluir quanto a viabilidade e eficiência de aplicação da técnica.

Nesta presente dissertação, tais unidades são utilizadas em circuitos de corrente e de tensão para avaliação sistemática da sua viabilidade de aplicação tanto em aterramentos concentrados, quanto em aterramentos mais extensos para a medição de Z_P e $z(t)$.

4.3.1 Arranjo de Referência para Medição da Resposta Impulsiva

O arranjo de referência utilizado consiste na aplicação do *Método da Queda de Potencial*, descrito na seção 3.3, porém utilizando-se como fonte um gerador de ondas impulsivas, conforme (VISACRO e ROSADO, 2009; VISACRO e ALIPIO, 2012; VISACRO et al., 2015). Detalhes da aplicação deste arranjo para os aterramentos

compostos por hastes verticais e por cabos contrapeso são mostrados na sequência.

4.3.1.1 Arranjo para as Hastes Verticais (aterramento concentrado)

Para o aterramento concentrado, constituído por cinco pequenas hastes, foi verificado em ensaios sistemáticos que um cabo de 25 m de comprimento para o circuito de corrente é suficiente para que não haja efeito de acoplamento condutivo entre o aterramento sob teste e os eletrodos auxiliares. Além disso, um cabo de 10 m de comprimento no circuito de tensão já garante que o eletrodo de potencial esteja posicionado no patamar. Entretanto, visando assegurar a qualidade das medições, foram utilizados cabos de comprimentos maiores no arranjo de referência, como mostrado na Figura 4.3. Os cabos do circuito de corrente são aterrados em suas extremidades por três eletrodos verticais de aproximadamente 30 cm de profundidade e espaçados de 1 m, dispostos em forma de triângulo, chamados de eletrodos auxiliares.

Resistores de casamento de impedância (R_M) de valor 115Ω são dispostos entre a extremidade final do cabo de corrente e os eletrodos auxiliares para reduzir o efeito das reflexões das ondas que se propagam por este cabo. Os cabos do circuito de tensão são aterrados em suas extremidades por apenas uma haste de aproximadamente 30 cm de profundidade.

Como mostrado na Figura 4.3, um gerador injeta uma onda impulsiva de tensão no aterramento sob teste e estabelece uma diferença de potencial entre tal aterramento e os eletrodos auxiliares, resultando no fluxo de uma corrente impulsiva (I_G) entre eles. As formas de onda de corrente injetada e de GPR são medidas através de um osciloscópio de dois canais. A corrente é medida através da queda de tensão (ΔV_R) em um resistor *shunt* (R_S), constituído de filme de carbono, de valor conhecido igual a 20Ω , posicionado na saída positiva do gerador de impulsos. A medição de GPR é dada pela elevação de potencial do aterramento sob teste em relação à haste de terra remoto, posicionada a 25 m do centro geométrico do aterramento.

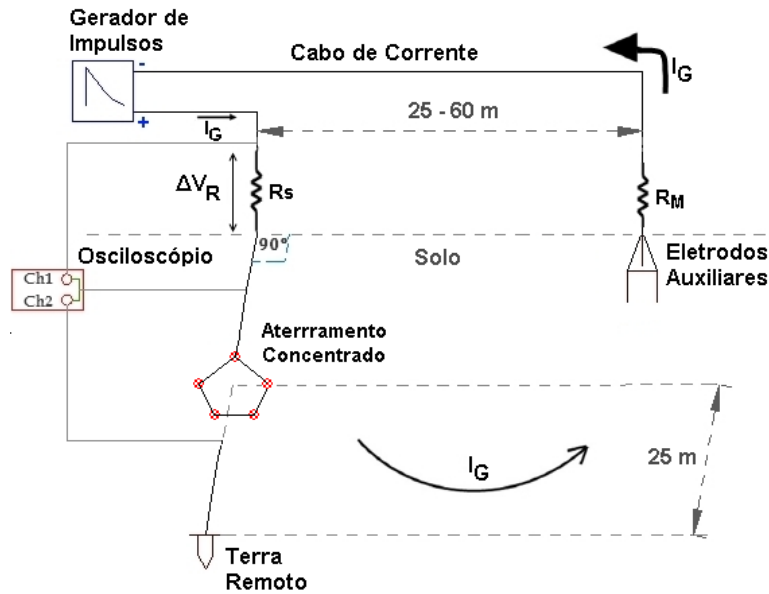


Figura 4.3 – Arranjo de referência para medição de GPR, corrente injetada, Z_p , $z(t)$ e R_{BF} para o aterramento concentrado.

4.3.1.2 Arranjo para os Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal)

Para o aterramento em escala semirreal, constituído por quatro cabos contrapesos, foi verificado em ensaios sistemáticos que um cabo de 25 m de comprimento para o circuito de tensão é suficiente para se garantir que o eletrodo de potencial esteja posicionado no patamar. Entretanto, visando assegurar a qualidade das medições, um cabo de 40 m foi utilizado no circuito de tensão, como mostrado na Figura 4.4. O cabo do circuito de corrente é posicionado de duas formas: sob o solo e suspenso a 2 m de altura (para minimizar interferência entre condutores de medição e eletrodos), sendo ambos aterrados em suas extremidades por seis eletrodos auxiliares de aproximadamente 1,3 m de profundidade e espaçados de 1 m, dispostos em forma de hexágono. Os cabos do circuito de tensão são aterrados em suas extremidades por apenas uma haste de aproximadamente 30 cm de profundidade.

Os resistores R_M e R_S possuem valores de 322Ω e 20Ω , respectivamente. O princípio de funcionamento de medição é idêntico ao descrito na seção Figura 4.4.

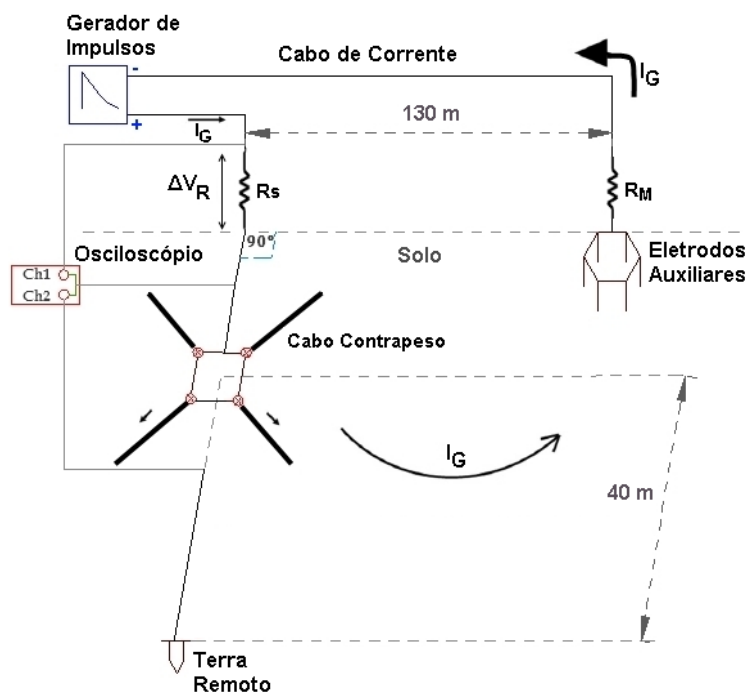


Figura 4.4 – Arranjo de referência para medição de GPR, corrente injetada, Z_p , $z(t)$ e R_{BF} para o aterramento composto por cabos contrapesos. O cabo de corrente é colocado em duas posições: no solo e suspenso de aproximadamente 2 m de altura.

4.3.2 Arranjo para Medição da Resposta Impulsiva Utilizando Unidades de Linhas de Transmissão Artificiais (ATL)

Nas seções seguintes são apresentados os arranjos para medição de Z_p que utilizam unidades de ATL. Detalhes construtivos de tais unidades são apresentados na seção 4.3.3.1.

Para reduzir a quantidade de figuras, são apresentados apenas os casos em que tais unidades são utilizadas em aberto no circuito de tensão (para o aterramento concentrado) e no circuito de corrente (para o aterramento com cabos contrapeso), embora os resultados sejam apresentados para todos os casos restantes. Para os casos em que as unidades de ATL aterradas são usadas no circuito de corrente, os eletrodos auxiliares são do mesmo tipo apresentados na seção 4.3.1. Para os casos em que tais unidades aterradas são usadas no circuito de tensão, utiliza-se apenas uma haste auxiliar simples como terra remoto, conforme mostrado também nessa mesma seção.

4.3.2.1 Arranjo para as Hastes Verticais (aterramento concentrado)

Na Figura 4.5 tem-se a ilustração do arranjo que utiliza unidades de ATL em aberto no circuito de tensão e cabo comum aterrado no circuito de corrente para o aterramento concentrado.

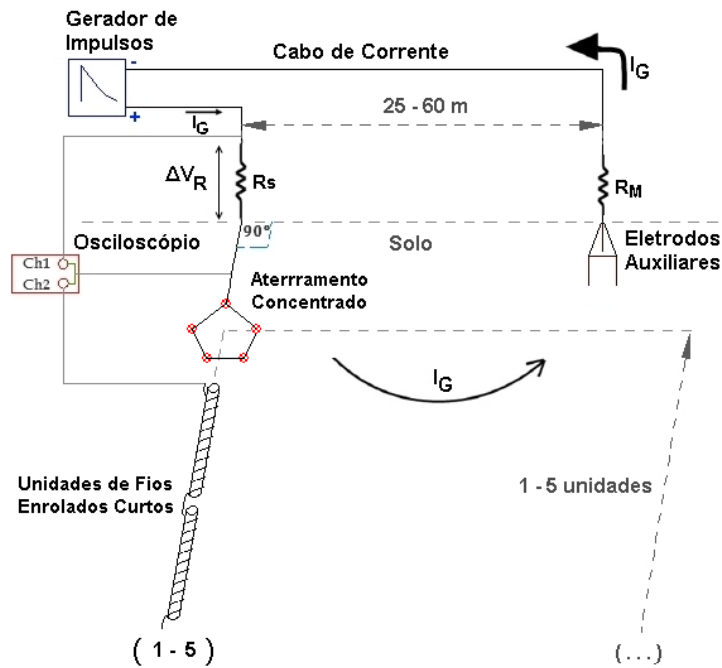


Figura 4.5 – Arranjo para medição de GPR, corrente injetada, Z_P e $z(t)$ para o aterramento concentrado. No circuito de tensão são usadas 1-5 unidades de ATL em aberto.

4.3.2.2 Arranjo para os Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal)

Na Figura 4.6 tem-se a ilustração do arranjo que utiliza unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e cabo comum aterrado no circuito de tensão para o aterramento composto por cabos contrapeso.

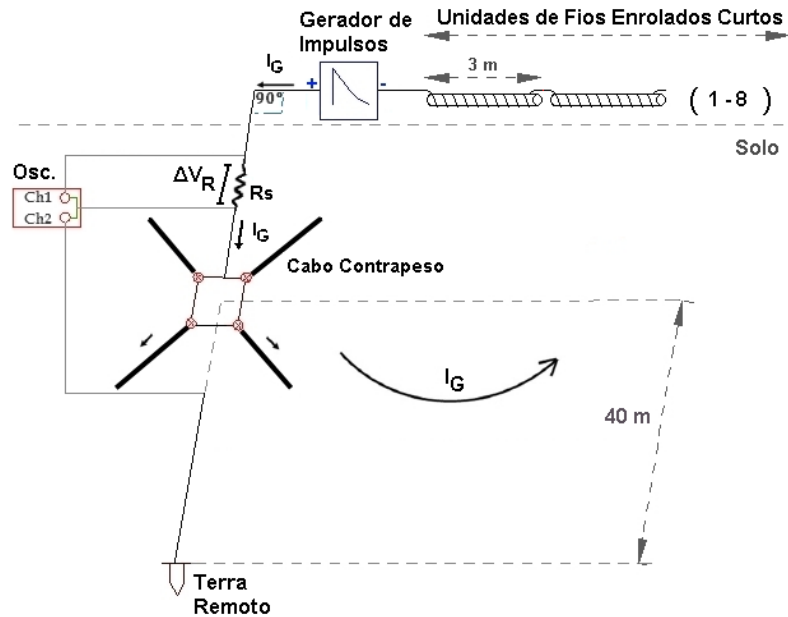


Figura 4.6 – Arranjo para medição de GPR, corrente injetada, Z_p e $z(t)$ para o aterramento composto por cabos contrapeso. No circuito de corrente são usadas 1-8 unidades de ATL em aberto.

4.3.3 Características dos Componentes Utilizados nos Arranjos Experimentais para Medição da Resposta Impulsiva

São apresentadas abaixo detalhes dos componentes utilizados para implementação dos arranjos de medição mostrados nas seções 4.3.2 e 4.3.1.

4.3.3.1 Linha de Transmissão Artificial (ATL)

Cada unidade de ATL consiste em um condutor curto formado por fios enrolados em um tubo de material isolante. Nesta dissertação, estes são constituídos por aproximadamente 1020 voltas por metro de fios de cobre esmaltado de 22 AWG ($0,322 \text{ mm}^2$) enrolados em um tubo de PVC de 3 m de comprimento e diâmetro externo de 21,2 mm, como mostrado na Figura 4.7 (a). O fio esmaltado foi fixado no tubo de PVC com uma fita isolante, como mostrado na Figura 4.7 (b). As unidades de ATL desenvolvidas aqui são similares às apresentadas em (LIMA et al., 2015), que possuíam 800 voltas por metro de fios de cobre isolados.

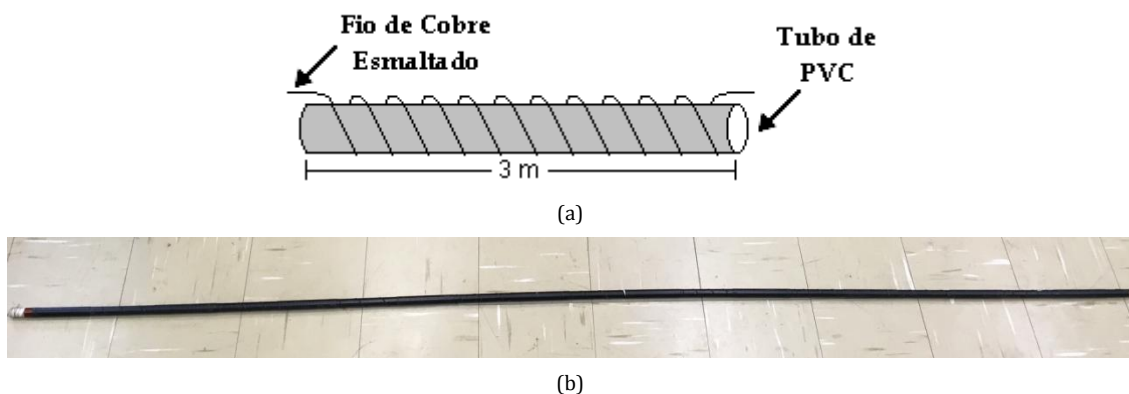


Figura 4.7 – Unidade de ATL: (a) desenho esquemático e (b) confeccionada.

Tais unidades configuram uma LT que para sinais impulsivos com frequências representativas elevadas, tais quais as das descargas atmosféricas, possui baixa velocidade de propagação, da ordem de centésimos da velocidade da luz. Unidades deste tipo foram apresentadas pela primeira vez em (CUNNINGHAM, 1911), sendo chamadas de *artificial transmission lines* ou “condutores de baixa velocidade”. Cunningham as construiu com 240 voltas de fio de cobre de 4,064 mm de diâmetro em um tubo de vidro de 15 cm de diâmetro, 3,1 mm de espessura e 1,36 m de comprimento. O peso de cada unidade era de aproximadamente 18 kg. Elas foram utilizadas para simular LTs de comprimentos extensos, na qual cada unidade se constitui de um trecho da linha, possuindo resistência, indutância e capacitância própria, sendo realizados diversos testes de chaveamento. No ano seguinte, Cunningham publicou um trabalho (CUNNINGHAM e DAVIS, 1912) com resultados da aplicação de ondas impulsivas nas linhas artificiais desenvolvidas para situações de linha aberta, em curto circuito e aterrada através de um resistor de mesmo valor da impedância de surto da linha (600Ω), verificando-se os efeitos das reflexões nas formas de onda de corrente e tensão no início, no meio e no fim da linha.

Outra aplicação verificada para tais unidades na literatura é para a modelagem de canal de descarga atmosférica em escala reduzida. Em (FISHER et al., 1960), não são apresentados detalhes construtivos, mas relata-se que foram confeccionadas duas unidades, uma com impedância de surto de 1150Ω e velocidade de propagação de 18% de c , e outra com impedância de surto de 750Ω

e velocidade de propagação de 32% de c . Onde c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \cdot 10^8$ m/s). Em (YOKOYAMA, 1984) o canal de descarga foi modelado como uma haste de baquelite de 5 mm de diâmetro circundada por 1400 voltas de um cabo de cobre de 0,7 mm de diâmetro, cuja velocidade de propagação é de aproximadamente 13% de c .

A unidade de ATL pode ser considerada um solenóide, cuja indutância por unidade de comprimento (L') de uma unidade é dada por

$$L' = \mu_0 \cdot A \cdot N^2 \quad (4.1)$$

onde: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m é a permeabilidade magnética do vácuo, A é a área da seção do tubo de PVC e N é o número de voltas por metro de fio de cobre esmaltado.

Para a unidade de ATL de 21,2 mm de diâmetro e $N = 1020$, tem-se pela equação (4.1) que $L' \cong 462$ μ H/m.

Considerando a unidade de ATL como uma linha de transmissão sem perdas, tem-se que a impedância de surto (Z_S) e a velocidade de propagação são dadas pelas equações (4.2) e (4.3), respectivamente:

$$Z_S = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (4.2)$$

$$v_P = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (4.3)$$

Ao se isolar o termo C' na equação (4.3) e substituí-lo na equação (4.2), tem-se que a impedância de surto de uma unidade de ATL pode ser calculada como:

$$Z_S = L' \cdot v_P \quad (4.4)$$

No Capítulo 5, mostra-se que a velocidade de propagação média para os diversos ensaios realizados é de aproximadamente 2,5% da velocidade da luz no vácuo. Substituindo tal valor na equação (4.4), tem-se que $Z_S \cong 3460$ Ω .

4.3.3.2 Gerador de Ondas Impulsivas

Para realização das medições de campo desta dissertação foi implementado um gerador portátil de ondas impulsivas cujos tempos de frente (T_F) e de meia onda fossem ajustáveis e próximos dos mesmos tempos associados com ondas de tensão e corrente de descargas atmosféricas reais. As formas de onda se aproximam de duplas exponenciais, porém com a parte inicial em formato mais côncavo, característica esta presente em formas de ondas de corrente e tensão associadas com descargas reais (VISACRO, 2005).

O gerador ainda deve ser capaz de fornecer níveis aceitáveis de tensão e corrente para minimizar a influência de sinais espúrios nas medições. Em virtude disso, para as medições realizadas com o aterramento concentrado foi utilizado um gerador cujas ondas de tensão na saída possuem 500 V de amplitude. Entretanto, na região do aterramento composto por cabos contrapeso, verificou-se uma forte influência nas medições de GPR de sinais espúrios de frequência representativa em torno de 1 MHz e amplitude de aproximadamente 0,5 V (ao se utilizar o gerador de 500 V). Foi implementado outro gerador, de 1,6 kV de amplitude que foi utilizado para essas medições.

Um gerador similar já havia sido desenvolvido em (GUIMARÃES, 2013) e a Figura 4.8 apresenta o esquema básico do circuito do gerador de impulsos de 1,6 kV. O circuito constitui-se basicamente de uma fonte alternada conectada a um amplificador analógico que possui em sua saída um circuito de descarga constituído por resistores em série.

Após alguns ciclos do sinal de tensão da fonte alternada, cada estágio do amplificador é responsável por carregar os capacitores C_2 , C_4 e C_6 com o dobro da tensão de pico da fonte. Portanto, amplitudes diferentes de tensão na saída podem ser obtidas com números diferentes de estágios.

A chave eletrônica responsável por realizar a conexão da saída do multiplicador analógico ao circuito de carga é constituída de um MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) cujo sinal de controle de disparo é realizado por um circuito digital não mostrado na Figura 4.8. Ao se variar a tensão

de disparo do MOSFET, torna-se possível controlar o T_F da onda. O tempo de duração total (T_{TOT}) é basicamente governado pelos valores dos resistores do circuito de descarga e do banco de capacitores. O eletrodo ou aterramento sob teste deve conectado na saída V_o do gerador, em paralelo aos resistores do circuito de descarga. Um aspecto importante é que o próprio aterramento sob teste é capaz de influenciar os valores de T_F e de T_{TOT} das ondas impulsivas.

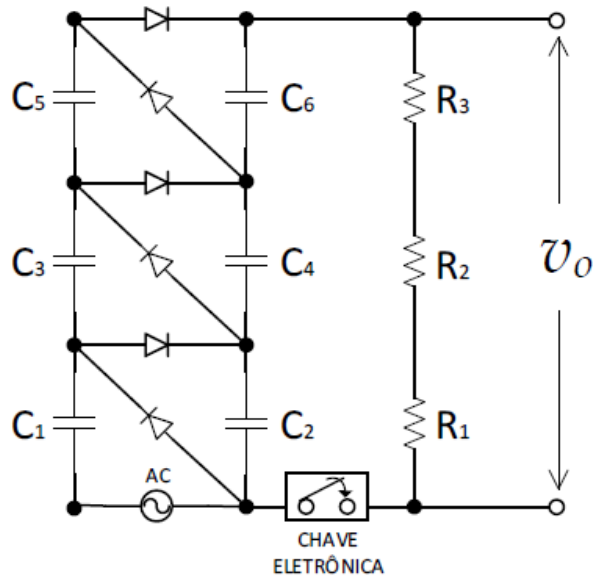


Figura 4.8 – Circuito simplificado do gerador de pulsos de 1,6 kV utilizado para injeção de corrente nos aterramentos sob teste. Retirado de (GUIMARÃES, 2013).

Na Figura 4.9 é mostrada uma onda de tensão típica de T_F/T_{TOT} de aproximadamente 4,5/650 μs obtida para o gerador da Figura 4.8 à vazio.

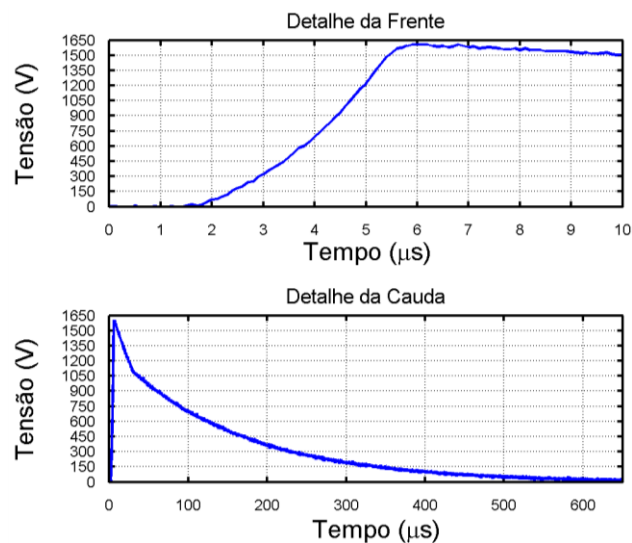


Figura 4.9 – Detalhes da frente e da cauda de uma onda impulsiva 4,5/650 μs obtida para o gerador implementado cujo esquema é mostrado na Figura 4.8.

Os parâmetros do gerador foram ajustados para se obter valores de T_F/T_{TOT} de 1/300 μ s e 5/300 μ s, para o aterramento concentrado, e de 0,9/400 μ s e 3,5/400 μ s, para o aterramento composto por cabos contrapeso.

4.3.3.3 Osciloscópio

O instrumento utilizado em todas as medições é o modelo TDS 3012C da Tektronix, com largura de banda de 100 MHz, taxa de amostragem de 1,25 GS/s e registro padrão de 10.000 pontos. Possui dois canais que têm a mesma referência de tensão em comum. Um dos canais é utilizado para medição da forma de onda de GPR e o outro para medição da forma de onda da corrente injetada pelo gerador de impulsos, através da queda de tensão em um resistor *shunt*. As duas pontas de prova de tensão utilizadas são do modelo P2220 da Tektronix cujos valores de resistência, capacitância e tensão de entrada são de 10 M Ω , 16 pF e 300 V CAT II, respectivamente, para a escala de atenuação de 10X.

4.3.4 Síntese dos Testes Para Medição da Resposta Impulsiva

Nesta seção encontra-se a síntese dos testes realizados para medição da resposta impulsiva de cada tipo de aterramento. Os resultados são apresentados no Capítulo 5.

4.3.4.1 Testes nas Hastes Verticais (aterramento concentrado)

Na Tabela 4.1 encontra-se uma síntese dos arranjos de referência utilizados em cada um dos ensaios apresentados posteriormente nesta mesma seção. Em todos os ensaios, as extremidades dos condutores dos circuitos de corrente foram aterradas através de três hastes interligadas constituindo um triângulo de aproximadamente 1 m de lado. Já as extremidades dos condutores de tensão foram aterradas através de apenas uma haste. Todas as hastes foram cravadas a 30 cm de profundidade.

Tabela 4.1 – Arranjos de referência utilizados nos ensaios 01-06. São mostrados os comprimentos dos cabos dos circuitos de corrente e de tensão, além dos valores de R_{BF} e de ρ_A .

Arranjo de Referência				
Ensaio	Comprimento do Cabo do Circuito de Corrente (m)	Comprimento do Cabo do Circuito de Tensão (m)	R_{BF} (Ω)	ρ_A (Ωm)
01	60	25	235	620
02	60	25	250	655
03	25	25	210	550
04	25	25	210	550
05	60	25	235	620
06	60	25	240	630

Os valores de R_{BF} foram medidos com o medidor de resistência de aterramento digital do modelo TMD 2KW da Megabrás e os valores de resistividade aparente do solo (ρ_A) foram calculados a partir dos valores de R_{BF} , com o uso do aplicativo computacional ProLater². Verifica-se que os valores de ρ_A variam em uma ampla faixa de 550-655 Ωm devido à significativa variação da umidade e da temperatura do solo durante o período em que os ensaios foram realizados.

Na Tabela 4.2 encontra-se uma síntese dos arranjos utilizados em cada um dos ensaios apresentados posteriormente nesta mesma seção. Em todos os ensaios, as extremidades dos condutores dos circuitos de corrente foram aterradas da mesma forma descrita para as configurações de referência.

² Programa para Cálculo de Aterramentos Elétricos baseado na aproximação potencial constante, desenvolvido no LRC.

Tabela 4.2 – Características dos condutores do circuito de corrente e de tensão para os arranjos utilizados nos ensaios 01-06.

Ensaio	Condutor do Circuito de Corrente			Condutor do Circuito de Tensão		
	Tipo	Comprimento	Aterrado ?	Tipo	Comprimento	Aterrado ?
01	ATL	2, 4, 6 e 8 unidades	não	cabo comum	25 m	sim
02	ATL	2, 4 e 6 unidades	sim	cabo comum	25 m	sim
03	cabo comum	25 m	sim	ATL	1, 2 e 5 unidades	não
04	cabo comum	25 m	sim	ATL	1, 2 e 5 unidades	sim
05	ATL	2, 4 e 6 unidades	sim	ATL	2 unidades	não
06	ATL	1, 2, 3, 4 e 5 unidades	não	ATL	3 unidades	não

4.3.4.2 Testes nos Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal)

Na Tabela 4.3 encontra-se uma síntese dos arranjos de referência utilizados em cada um dos ensaios apresentados posteriormente nesta mesma seção. Em todos os ensaios, as extremidades dos condutores dos circuitos de corrente foram aterradas através de seis hastes (de aproximadamente 1,3 m de profundidade) interligadas constituindo um hexágono (de aproximadamente 1 m de lado). Já as extremidades dos condutores de tensão foram aterradas através de apenas uma haste cravada a 30 cm de profundidade. As mesmas considerações sobre a variação dos valores de ρ_A são válidas nesta seção, verificando-se valores em uma faixa de 160-283 Ω m.

Tabela 4.3 – Arranjos de referência utilizados nos ensaios 07-10. São mostrados os comprimentos dos cabos dos circuitos de corrente e de tensão, além dos valores de R_{BF} e de ρ_A .

Arranjo de Referência				
Ensaio	Comprimento do Cabo do Circuito de Corrente (m)	Comprimento do Cabo do Circuito de Tensão (m)	R_{BF} (Ω)	ρ_A (Ωm)*
07	130	40	10,2	212
08	130	40	13,6	283
09	130	40	7,7	160
10	130	40	9,6	200

* calculado com uso do ProLater

Na Tabela 4.4 encontra-se uma síntese dos arranjos utilizados em cada um dos ensaios apresentados posteriormente nesta mesma seção. Em todos os ensaios, as extremidades dos condutores dos circuitos de corrente foram aterradas da mesma forma descrita na seção 4.3.4.1.

Tabela 4.4 – Características dos condutores do circuito de corrente e de tensão para os arranjos utilizados nos ensaios 07-10.

Ensaio	Condutor do Circuito de Corrente			Condutor do Circuito de Tensão		
	Tipo	Comprimento	Aterrado ?	Tipo	Comprimento	Aterrado ?
07	ATL	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 unidades	não	cabo comum	40 m	sim
08	ATL	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 unidades	sim	cabo comum	40 m	sim
09	ATL	130 m suspenso	sim	ATL	1, 4, 5, 6, 7, 8 unidades	não
10	ATL	130 m suspenso	sim	ATL	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 unidades	sim

4.4 Descrição dos Testes Relativos à Medição da Resposta em Baixas Frequências

A despeito da resposta impulsiva traduzir melhor a resposta do aterramento frente a correntes de descargas atmosféricas, a medição de Z_P em condição de campo é uma tarefa complexa e dispendiosa. Uma maneira mais prática de determinar este parâmetro é de forma indireta, através de R_{BF} e do coeficiente impulsivo, como mostrado em (VISACRO, 2015). Até que as metodologias de medição de Z_P sejam plenamente consolidadas, é prudente utilizar este artifício.

Entretanto, dois tipos de problemas podem ser fontes de erro em medições de R_{BF} .

Um diz respeito à aplicação inadequada do *Método da Queda de Potencial*, na qual a haste de referência de potencial é aterrada prontamente em 62% da distância do aterramento aos eletrodos auxiliares de corrente. Em muitos casos, tal distância não está na região de terra remoto, comprometendo os resultados.

Outro tipo de problema é que os medidores comerciais de R_{BF} disponíveis no mercado aplicam ondas de corrente no aterramento da ordem de miliamperes. Para medições de R_{BF} de pé de torre, tal fato pode ser um complicador, pois tensões induzidas e ruídos espúrios podem afetar os sinais de tensão e de corrente medidos por esses instrumentos, provocando erros nos valores medidos de R_{BF} . Inclusive, verifica-se comumente que um mesmo instrumento pode indicar valores diferentes para medições realizadas em curtos intervalos de tempo.

Visando contornar os problemas acima, foi implementado nesta dissertação um gerador de frequência fixa (de aproximadamente 315 Hz) para medição de R_{BF} capaz de aplicar ondas senoidais de amplitudes elevadas. Este foi aplicado nos testes dos aterramentos concentrado e de cabos contrapeso da seção 4.2. Os resultados são comparados com os obtidos por quatro instrumentos comerciais para medição de R_{BF} e apresentados no Capítulo 5.

Nesta seção são mostrados os arranjos experimentais para medição de R_{BF} utilizando o gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas implementado nesta dissertação e para os instrumentos de medição comerciais.

Nos testes foram configuradas condições destinadas a simular o efeito da resistência de aterramento do eletrodo auxiliar de corrente no resultado da medição. Foram inseridos resistores em série (R_{serie}) no circuito de corrente, que representam tal resistência de aterramento, cujo valor era variado entre 0 e 40 k Ω , de forma discreta.

As formas de ondas de GPR e de corrente injetada ao ser aplicado o gerador de ondas senoidais são obtidas por um osciloscópio e os valores de R_{BF} são calculados pela razão dos valores de pico destas formas de onda, ou seja, V_P/I_P . Os valores de R_{BF} para os instrumentos comerciais são obtidos através de leitura direta fornecida por esses instrumentos.

4.4.1 Arranjos Experimentais para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

Os arranjos implementam aplicação do *Método da Queda de Potencial*, incluindo contudo um resistor R_{serie} no circuito de corrente para representar a resistência de aterramento das hastes auxiliares de corrente que existiriam para diferentes resistividades de solo.

O arranjo de referência utilizado para cada aparelho é para a situação em que $R_{serie} = 0$.

Detalhes da aplicação destes arranjos para os aterramentos concentrado e de cabos contrapeso são mostrados na sequência.

4.4.1.1 Arranjos para as Hastes Verticais (aterramento concentrado)

O arranjo utilizado para medição de R_{BF} do aterramento constituído por hastes verticais utilizando o gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas é mostrado na Figura 4.10, e utilizando os medidores comerciais de baixa frequência, na Figura 4.11.

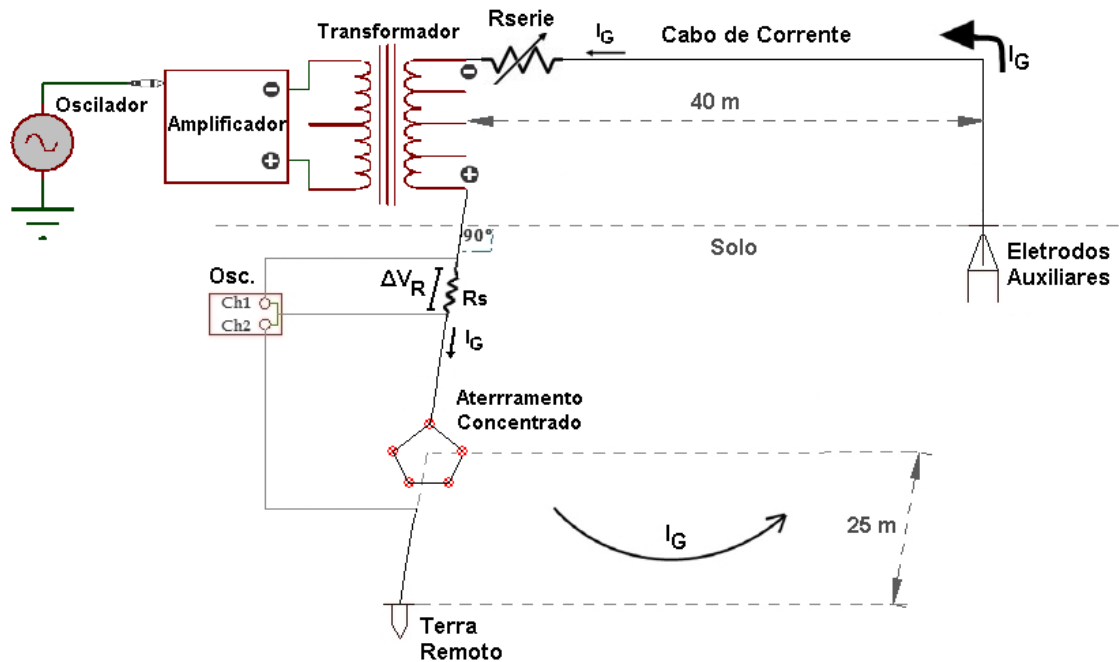


Figura 4.10 – Arranjo para medição de GPR, corrente injetada e R_{BF} utilizando o gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas para o aterramento composto por hastes verticais.

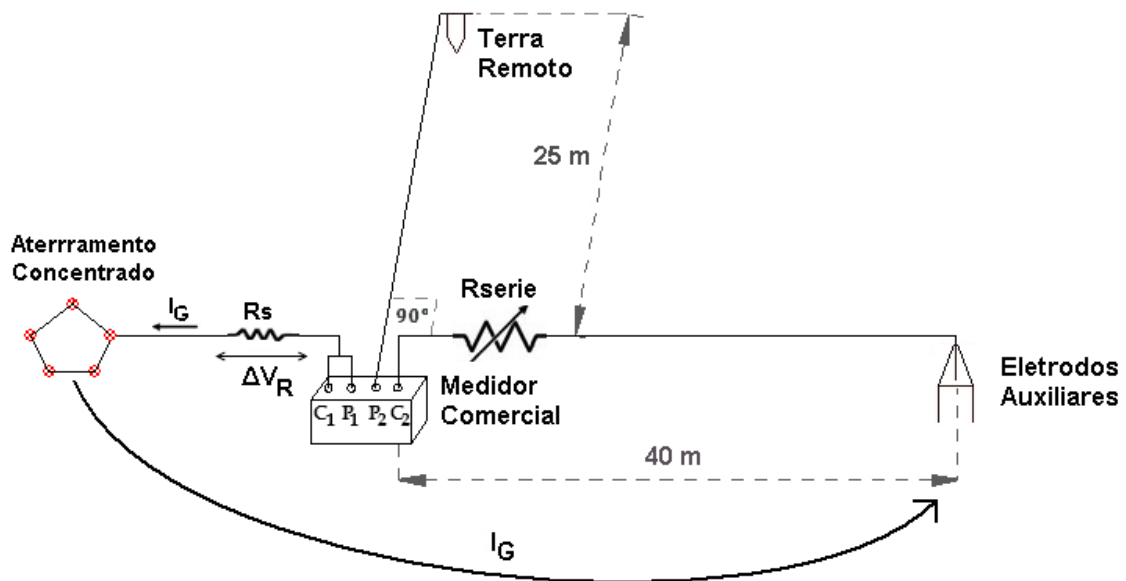


Figura 4.11 – Arranjo para medição de R_{BF} utilizando instrumentos de medição comerciais para o aterramento composto por hastes verticais.

4.4.1.2 Arranjos para os Cabos Contrapeso (modelo em escala semirreal)

O arranjo utilizado para medição de R_{BF} do aterramento constituído por cabos contrapeso utilizando o gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas é mostrado na Figura 4.12, e utilizando os medidores comerciais de baixa frequência, na Figura 4.13.

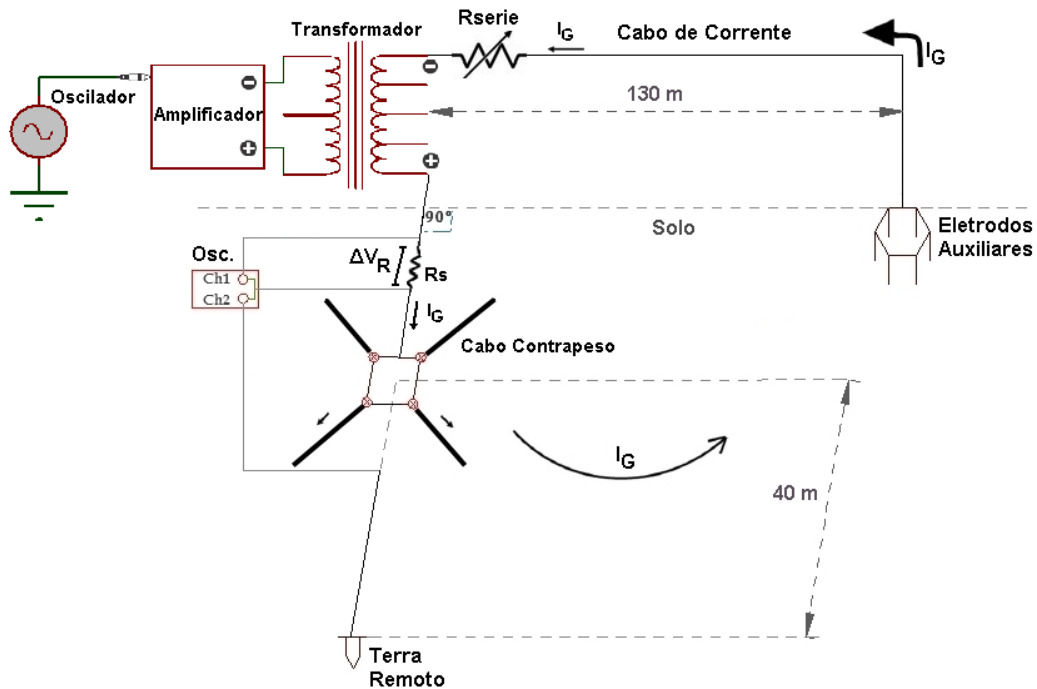


Figura 4.12 – Arranjo para medição de GPR, corrente injetada e R_{BF} utilizando o gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas para o aterramento composto por cabos contrapesos.

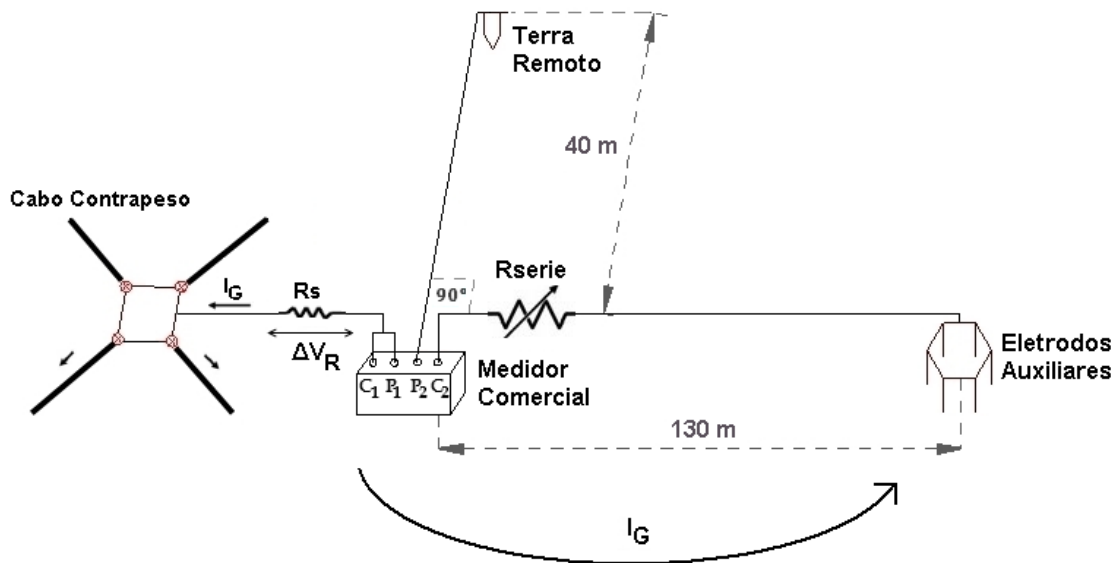


Figura 4.13 – Arranjo para medição de R_{BF} utilizando instrumentos de medição comerciais para o aterramento composto por cabos contrapesos.

4.4.2 Características dos Componentes Utilizados nos Arranjos Experimentais para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

São apresentados a seguir detalhes dos componentes utilizados para implementação dos arranjos de medição mostrados na seção 4.4.1.

O osciloscópio e os eletrodos auxiliares são os mesmos utilizados na seção 4.3. Os resistores inseridos em série no circuito de corrente (R_{serie}) variam em uma faixa de 0-40 k Ω . Os resistores *shunt* (R_s) utilizados são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Valores dos resistores *shunt* utilizados para medição de corrente nos aterramentos testados.

Aterramento	Valor de R_s (Ω) para os Medidores	
	Comerciais	Gerador de Ondas Sonoidais de Amplitudes Elevadas
Concentrado	0,5	3,6
Cabos Contrapeso	1	6

4.4.2.1 Gerador de Ondas de Amplitudes Elevadas

O gerador senoidal implementado nesta dissertação consiste em um oscilador *ponte de Wien* conectado a um amplificador de potência, que por sua vez está conectado a um transformador, como mostrado na Figura 4.14. Desta forma, tem-se que a onda de tensão senoidal gerada pelo oscilador é amplificada, mas com um ganho de potência. Detalhes sobre cada componente deste gerador são mostrados nas subseções seguintes.

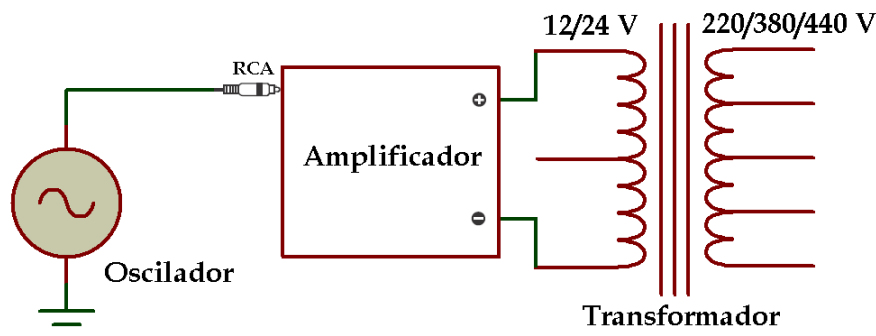


Figura 4.14 – Gerador de Ondas Senoidais de Amplitudes Elevadas: arranjo esquemático.

a) Oscilador

Foi implementado nesta dissertação um oscilador *ponte de Wien* com uma malha de controle não-linear de amplitude (circuito limitador), cujo esquema é mostrado na Figura 4.15.

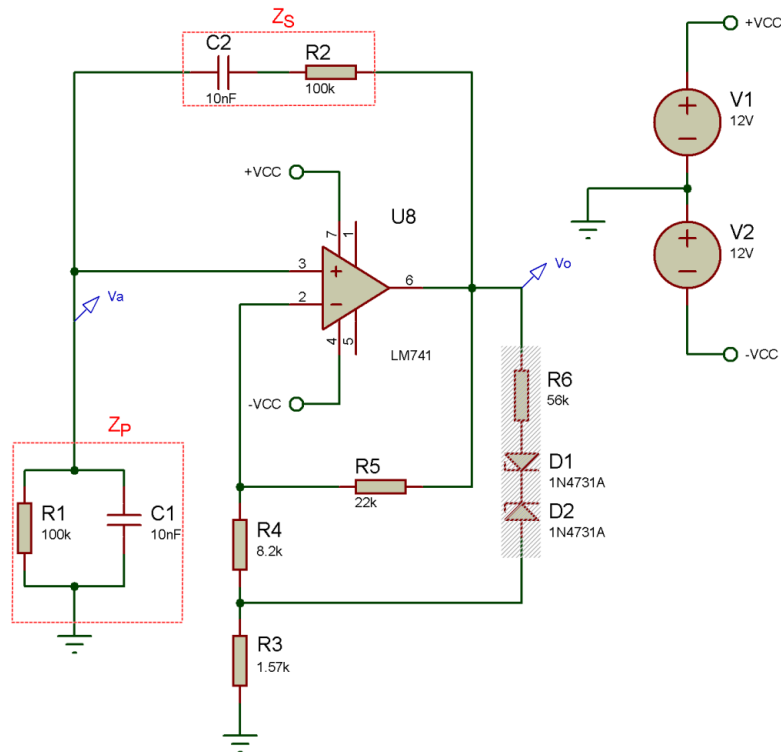


Figura 4.15 – Oscilador *ponte de Wien* com circuito limitador (ramo em hachura).

O oscilador acima consiste em um amplificador operacional conectado à configuração não-inversora, com um ganho em malha aberta de $1 + R_5/(R_3 + R_4)$. No elo de realimentação positiva é conectada uma malha RC. O ganho de malha ($L(s)$) é dado pelo produto do ganho em malha aberta pela multiplicação da função de transferência $V_a(s)/V_o(s)$ da malha de realimentação, ou seja:

$$L(s) = \left(1 + \frac{R_5}{R_3 + R_4}\right) \frac{Z_P}{Z_P + Z_S} \quad (4.5)$$

Utilizando $R_1 = R_2 = R$ e $C_1 = C_2 = C$, tem-se:

$$L(s) = \frac{1 + R_5/(R_3 + R_4)}{3 + sCR + 1/(sCR)} \quad (4.6)$$

Substituindo $s = j\omega$, resulta em:

$$L(j\omega) = \frac{1 + R_5/(R_3 + R_4)}{3 + j[\omega CR - 1/(\omega CR)]} \quad (4.7)$$

De acordo com o *critério de Barkhausen*, a condição para uma malha de realimentação produzir uma oscilação senoidal em um determinada frequência ω_0 é que:

$$L(j\omega_0) = 1 \quad (4.8)$$

Logo, para que (4.8) seja satisfeita, tornam-se necessárias as duas condições mostradas nas equações (4.9) e (4.10):

$$\omega_0 = \frac{1}{CR} \quad (4.9)$$

$$R_5/(R_3 + R_4) = 2 \quad (4.10)$$

Entretanto, para garantir que as oscilações tenham início, é necessário que a razão $R_5/(R_3+R_4)$ seja ligeiramente maior do que 2. Desta forma, as oscilações aumentam de amplitude até que o nível dado pelo limitador seja atingido e a amplitude do sinal de saída V_o permaneça constante. Caso $R_5/(R_3+R_4)$ seja muito maior do que 2, o sinal de saída se estabiliza mais rapidamente, no entanto ocorrerá um aumento na distorção da saída, podendo gerar uma onda até mesmo quadrada. Como mostrado na Figura 4.15, a razão escolhida foi de 2,25.

b) Amplificador de Potência

O amplificador de potência utilizado possui 1 canal e 1200 W RMS para uma carga nominal de 1 Ω . As características técnicas deste aparelho estão sintetizadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Características técnicas do amplificador de potência: fonte de alimentação, entrada de sinal/filtros e etapa de amplificação.

Fonte de Alimentação	Tensão de Trabalho	Consumo Máx. com Carga Resistiva	Consumo em Programa Musical
	9-12 V	130 A	65 A
Entrada de Sinal e Filtros	Sensibilidade de Entrada	Filtro Passa Alta (12dB)	Filtro Passa Baixa (12dB)
	0,5-8 V	5 ~ 40 Hz	50 ~ 500 Hz
Etapa de Amplificação	Potência @ 12,6 V (0,1 % THD+N Máx.)	Potência @ 12,6 V (Dobro da Impedância/ 0,1 % THD+N Máx.)	Resposta de Frequência (-3 dB)
	1200 W	600 W	5 Hz – 50 kHz

O esquema de ligação do circuito oscilador ao amplificador de potência é mostrado na Figura 4.16.

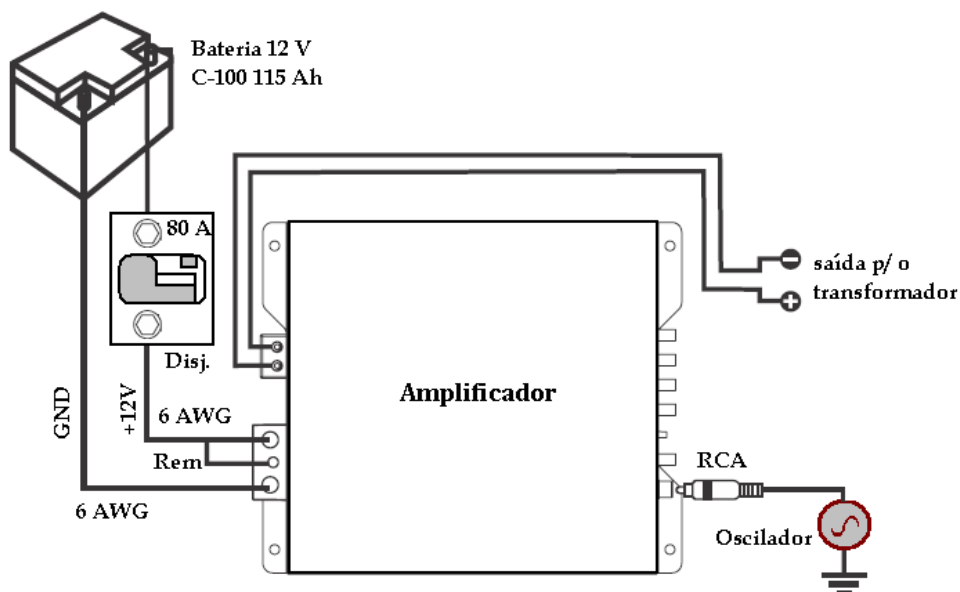


Figura 4.16 – Esquema de ligação do circuito oscilador acoplado ao amplificador de potência.

Como mostrado na figura acima, o oscilador é conectado no amplificador via cabo RCA. Os cabos GND e +12 V possuem seção transversal de 6 AWG e um disjuntor de proteção de 80 A é instalado próximo a bateria, em uma distância

inferior à 30 cm, conforme recomendação do fabricante. O terminal de alimentação remota (Rem) é conectado diretamente no conector +12 V, desta forma o amplificador ligará automaticamente quando a bateria for a ele conectada.

Para se realizar a montagem, todas as conexões entre os terminais devem ser realizadas previamente à conexão da bateria. O cabo RCA nunca deve ser conectado ou desconectado com o amplificador ligado e a impedância da carga conectada não deve ser inferior ao valor nominal de 1Ω , pois em ambos os casos o amplificador poderá ser danificado.

c) Transformador

As especificações do transformador utilizado são mostradas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Características técnicas do transformador.

Potência Nominal	300 VA
Tensões Nominais de Alta	440/380/220 V
Tensões Nominais de Baixa	24/12 V
Isolamento	A seco
Instalação	Abrigada IP00
Frequência	60 Hz
Nível de Isolamento	0,6 kV
Classe de Temperatura	B

4.4.2.2 Medidores Comerciais de Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

As características técnicas dos medidores comerciais de resistência de aterramento utilizados estão sintetizadas na Tabela 4.8. Os nomes das empresas fabricantes e dos modelos foram omitidos, sendo os aparelhos designados por A, B, C e D.

Tabela 4.8 – Características técnicas dos medidores comerciais de resistência de aterramento.

Aparelho	Tipo	Frequência do Sinal (Hz)	Faixa de Medição
A	Digital	125	0-19,99 k Ω
B	Digital	150	0-2 k Ω
C	Eletromecânico (“Null Balance”)	133	0,01 Ω -1,1 M Ω
D	Gerador a Manivela	Depende do Operador	0-500 Ω

Os aparelhos A e B são digitais, enquanto C e D são analógicos.

O medidor C é do tipo “null balance”, e em seu princípio de funcionamento a queda de tensão na terra é comparada com uma queda de tensão de valor ajustável através de um galvanômetro de bobina móvel. Se tais tensões foram diferentes, haverá passagem de corrente pelo galvanômetro, causando sua deflexão. O operador então deve atuar no ajuste, buscando a situação na qual o galvanômetro tem deflexão nula. Nesta situação, o valor da resistência interna ao instrumento será proporcional ao de resistência no solo.

O medidor D provido de um gerador a manivela permite a variação da frequência do sinal de tensão, que depende da frequência de giro provida pelo operador.

Na Figura 4.17 são mostradas as formas de onda de tensão de cada um dos instrumentos a vazio apresentados na Tabela 4.8 e ao se colocar em suas saídas um resistor de filme de carbono de 150 $\Omega \pm 5\%$. Apenas para ilustrar o efeito de carga, consideram-se as medições realizadas com os quatro medidores ao ser inserido um resistor cujo valor é da ordem da R_{BF} do aterramento concentrado. Verifica-se que o sinal de tensão se reduz bastante na presença de um resistor na saída de todos os medidores.

O valor da resistência do resistor de 150 $\Omega \pm 5\%$ medido por cada instrumento foi de 150,5 Ω (A), 151,4 Ω (B), 153 Ω (C) e 160 Ω (D), apresentando diferenças de aproximadamente 0,33%, 0,93%, 2% e 6,7%, respectivamente. Note que mesmo nesta condição favorável, o medidor D não obteve uma medição satisfatória.

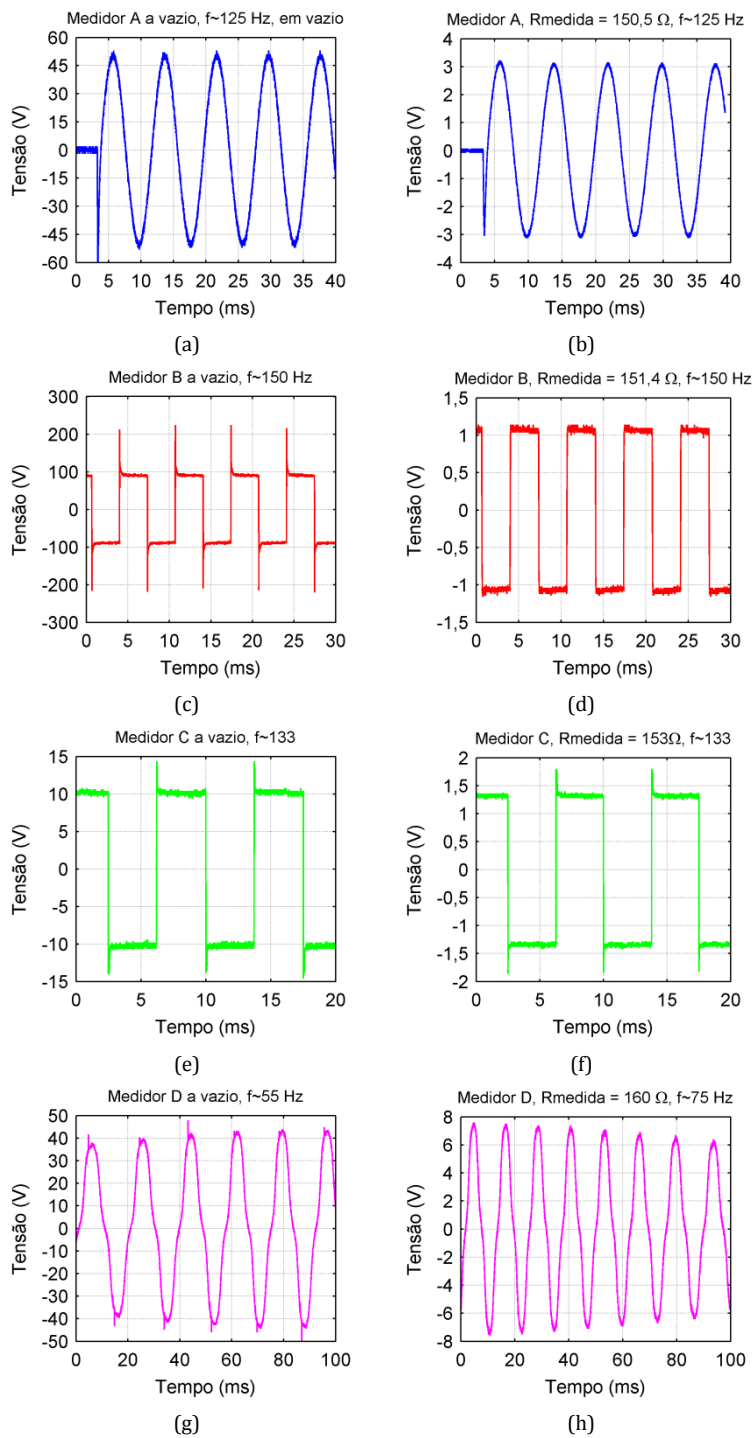


Figura 4.17 – Formas de onda tensão na saída dos instrumentos de medição de resistência de aterramento a vazio (esquerda) e sob um resistor de 150Ω (direita).

4.4.3 Síntese dos Testes Para Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

Para ambas as configurações de aterramento sob análise, R_{serie} assume os seguintes valores: 0, 500 Ω , 1 k Ω , 2 k Ω , 5 k Ω , 10 k Ω , 20 k Ω e 40 k Ω .

Ao ser utilizado o gerador de ondas de amplitudes elevadas, para cada valor de R_{serie} , calcula-se R_{BF} pela razão entre os valores de pico de GPR e de corrente injetada, cujas formas de onda são medidas através de um osciloscópio, ou seja, $R_{\text{BF}} = V_{\text{P}}/I_{\text{P}}$.

Ao serem utilizados medidores comerciais, para cada valor de R_{serie} , os valores de R_{BF} são obtidos através de leitura direta fornecida por cada medidor.

Os resultados são apresentados no Capítulo 5.

5 Resultados Experimentais

5.1 Introdução

Neste capítulo são realizadas a apresentação e as análises preliminares dos resultados obtidos utilizando os arranjos experimentais descritos nos Capítulo 4 desta dissertação.

Na seção 5.2 estão presentes os resultados de GPR, corrente injetada e Z_P , obtidos utilizando unidades de ATL para os aterramentos concentrado e composto de cabos contrapeso. Tais resultados são comparados com os obtidos utilizando-se cabos de comprimentos longos, para se avaliar a viabilidade do uso das unidades de ATL.

Na seção 5.3 estão presentes os resultados de GPR, corrente injetada e R_{BF} , obtidos utilizando um gerador implementado nesta dissertação, capaz de aplicar corrente elevadas (da ordem de amperes) nos aterramentos testados. Tais resultados são comparados com os obtidos por quatro tipos de instrumentos comerciais de medição de resistência de aterramento e com os obtidos ao serem aplicadas formas de onda impulsivas.

Convém realçar que as curvas apresentadas nesta dissertação, sejam de GPR, de corrente ou de impedância transitória, não foram submetidas a nenhum tipo de filtro.

5.2 Resultados Experimentais Relativos à Medição da Resposta Impulsiva de Aterramentos

Para minimizar o efeito causado nas ondas de GPR devido à presença de um sinal espúrio com componentes de frequência na ordem de 1 MHz, cada curva apresentada nesta seção é constituída pela média aritmética de cinco (aterramento concentrado) ou quatro (cabos contrapeso) medições ao serem injetadas as mesmas correntes em cada um dos aterramentos.

5.2.1 Resultados para o Aterramento Concentrado

5.2.1.1 Ensaio 01: Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente

A Figura 5.1 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de corrente.

Verifica-se pela Figura 5.1 (d) que as reflexões nas formas de onda de corrente ao se utilizar 2, 4, 6 e 8 unidades de ATL ocorreram em aproximadamente $1,5 \mu s$, $3,6 \mu s$, $5,4 \mu s$ e $7 \mu s$, respectivamente. Como o início das ondas impulsivas de corrente foi em aproximadamente $0,4 \mu s$, velocidades de propagação de 3,64%, 2,50%, 2,40% e 2,42% da velocidade da luz no vácuo foram obtidas para as mesmas unidades. Portanto, o valor médio de velocidade de propagação, excluindo o primeiro caso de 2 unidades, foi da ordem de 2,44% da velocidade da luz no vácuo.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.1 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 215Ω , valor 8,5% inferior ao de $R_{BF} = 235 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.1 (f)), nem mesmo um patamar constante foi alcançado.

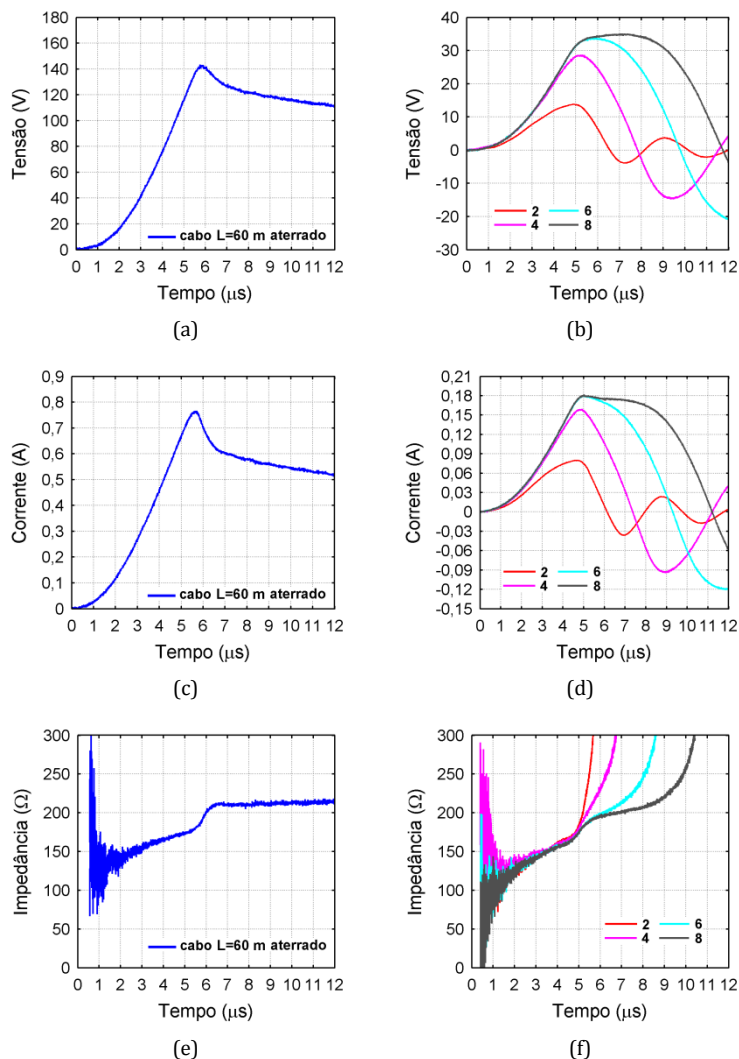


Figura 5.1 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de corrente: cabo comum aterrado de 60 m de comprimento (esquerda) ou 2-8 unidades de ATL em aberto (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu\text{s}$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. Valor de $R_{BF} = 235 \Omega$ e $\rho_A = 620 \Omega\text{m}$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.1 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-8 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P , uma diferença percentual máxima (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 6% ao se utilizar 2 unidades de ATL. Ao se utilizar 4, 6 e 8 unidades, são verificadas diferenças de aproximadamente apenas 3%, 1% e 5%, respectivamente.

A diferença percentual de Z_P ao se utilizar 8 unidades (Tabela 5.1) foi maior que a utilizando 6 unidades pelo fato da curva de GPR da primeira continuar em

crescimento após a reflexão da segunda, conforme mostrado na Figura 5.1 (b), já que os valores de I_P são os mesmos.

Tabela 5.1 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de corrente: unidades de ATL em aberto (2-8) ou cabo comum aterrado (60 m de comprimento), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu\text{s}$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	Percentual de Z_P (%)
2 unidades	13,94	0,08	174	-6,4
4 unidades	28,74	0,16	180	-3,2
6 unidades	33,92	0,18	188	1,1
8 unidades	35,16	0,18	195	4,8
60 m	143,40	0,77	186	-

A Figura 5.2 apresenta as ondas de GPR, de corrente e de $z(t)$ medidas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu\text{s}$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de corrente.

Verifica-se pela Figura 5.2 (d) que as reflexões nas formas de onda de corrente ao se utilizar 2, 4, 6 e 8 unidades de ATL ocorreram em aproximadamente $1,9 \mu\text{s}$, $3,5 \mu\text{s}$, $5,2 \mu\text{s}$ e $6,8 \mu\text{s}$, respectivamente. Como o início das ondas impulsivas de corrente foi em aproximadamente $0,25 \mu\text{s}$, velocidades de propagação de 2,42%, 2,46%, 2,42% e 2,44% da velocidade da luz no vácuo foram obtidas para as mesmas unidades. Portanto, o valor médio de velocidade de propagação foi da ordem de 2,44% da velocidade da luz no vácuo.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.2 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 215Ω , valor 8,5% inferior ao de $R_{BF} = 235 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.2 (f)), a existência de um patamar constante foi verificado somente ao se utilizar 6 e 8 unidades, o valor alcançado foi de aproximadamente 205Ω , cerca de 12,8% inferior ao de R_{BF} .

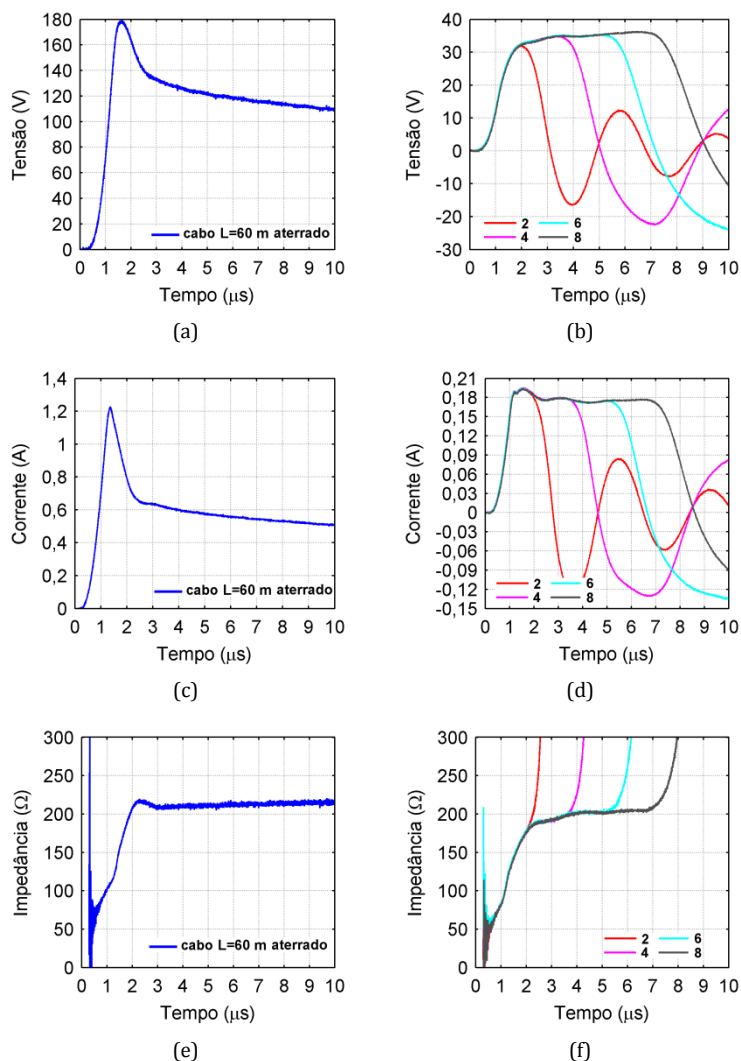


Figura 5.2 – Idem à Figura 5.1, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu\text{s}$.

Na Tabela 5.2 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-8 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores consideráveis de aproximadamente 20-25% a partir do uso de 4 unidades.

A diferença percentual de Z_P mostrada na Tabela 5.2 aumenta conforme o número de unidades de ATL utilizados é maior, pois as curvas de GPR crescem progressivamente até o ponto de reflexão, conforme mostrado na Figura 5.2 (b), já que os valores de I_P são os mesmos.

Tabela 5.2 – Idem à Tabela 5.1, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
2 unidades	32,16	0,20	161	10,3
4 unidades	35,04	0,20	175	19,9
6 unidades	35,70	0,20	179	22,6
8 unidades	36,44	0,20	182	24,7
60 m	179,20	1,23	146	-

5.2.1.2 Ensaio 02: Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente

A Figura 5.3 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de corrente.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.3 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 230Ω , valor 8% inferior ao de $R_{BF} = 250 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.3 (f)), foi verificado um patamar de aproximadamente 240Ω , valor 4% inferior ao de R_{BF} . Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de $70 \mu s$, verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando um cabo comum de 60 m ou unidades de ATL convergem para valores próximos ao de R_{BF} , como mostrado na Figura 5.4 (a, b).

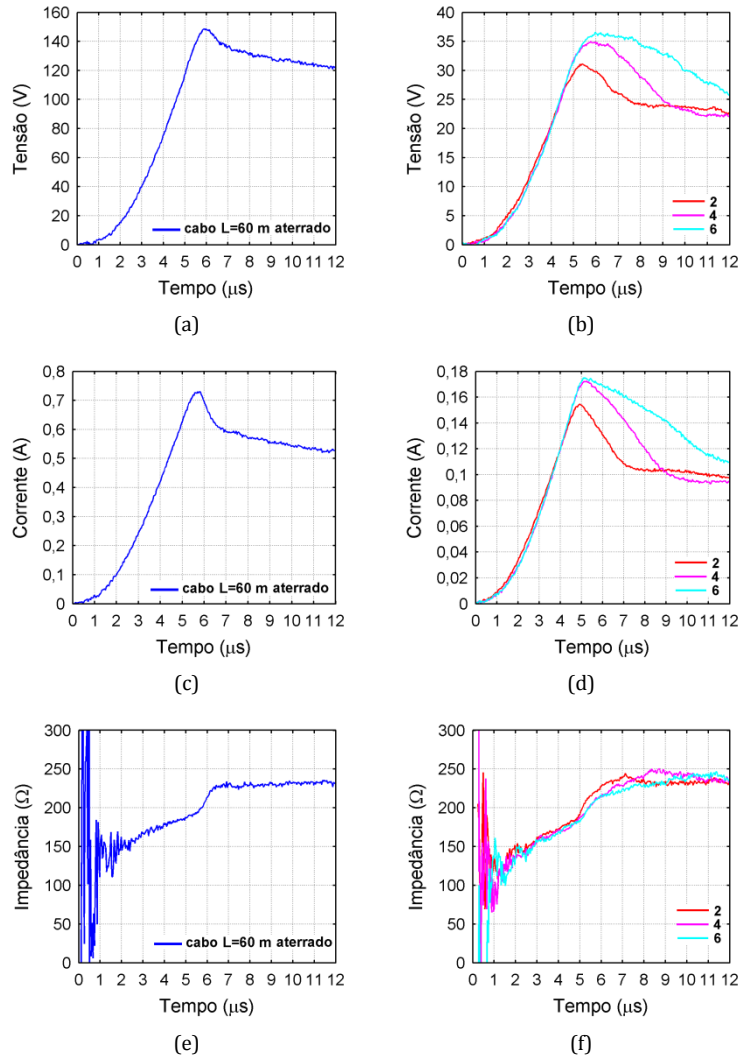


Figura 5.3 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de corrente: cabo comum aterrado de 60 m de comprimento (esquerda) ou 2-6 unidades de ATL aterradas (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu\text{s}$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. Valor de $R_{BF} = 250 \Omega$ e $\rho_A = 655 \Omega\text{m}$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

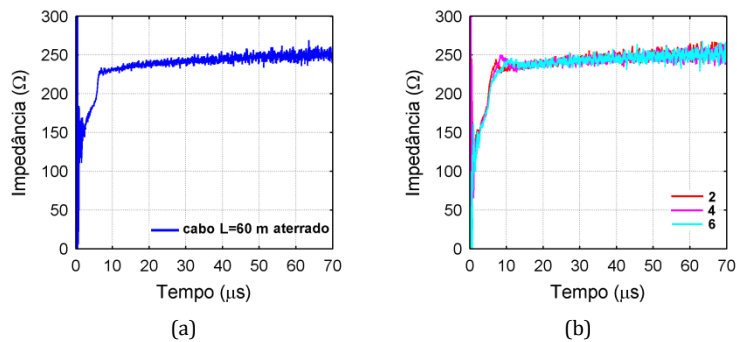


Figura 5.4 – Medições de $z(t)$ usando no circuito de corrente: (a) cabo comum aterrado (60 m de comprimento) e (b) unidades de ATL aterradas (2-6 unidades), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu\text{s}$. Janela de 70 μs .

Na Tabela 5.3 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-6 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) menores do que 1,5% ao se utilizar unidades de ATL.

Tabela 5.3 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de corrente: unidades de ATL aterradas (2-6) ou cabo comum aterrado (60 m de comprimento), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
2 unidades	31,08	0,15	207	1,5
4 unidades	35,00	0,17	206	1,0
6 unidades	36,60	0,18	203	-0,5
60 m	148,70	0,73	204	-

A Figura 5.5 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de corrente.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.5 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 230Ω , valor 8% inferior ao de $R_{BF} = 250 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.5 (f)), a existência de um patamar constante de aproximadamente 230Ω foi verificado ao se utilizar 2 e 4 unidades, valor 8% inferior ao de R_{BF} . Ao se utilizar 6 unidades, o patamar foi de aproximadamente 250Ω . Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de $70 \mu s$, verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando um cabo comum de 60 m ou unidades de ATL convergem para valores próximos ao de R_{BF} , como mostrado na Figura 5.6 (a, b).

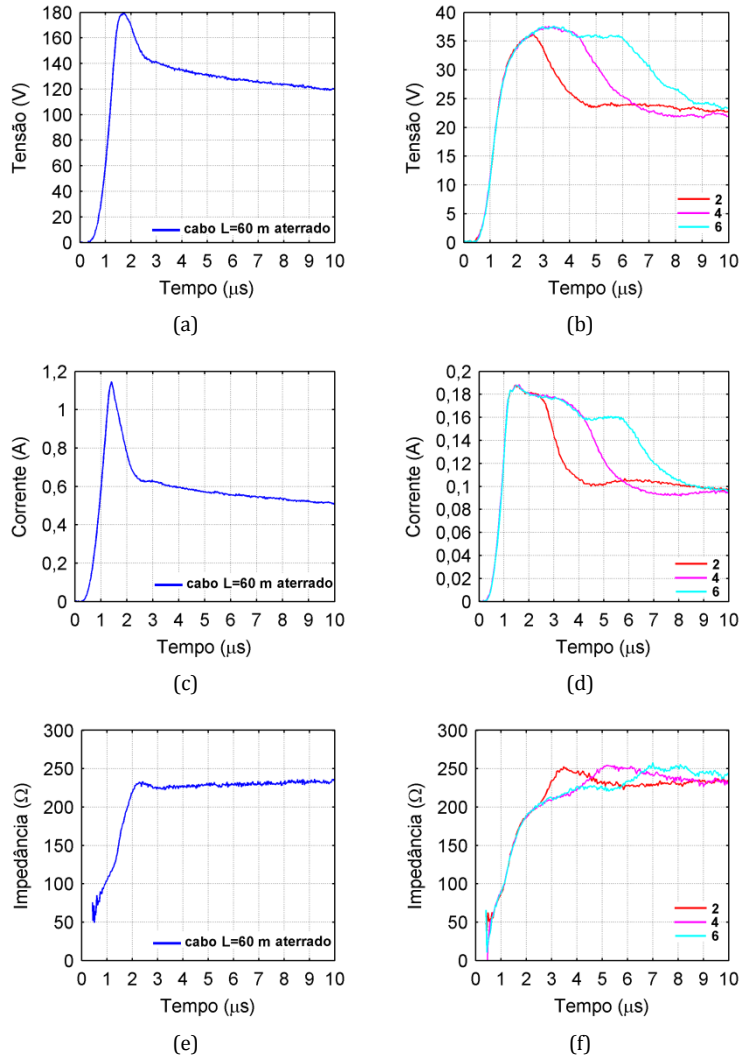


Figura 5.5 – Idem à Figura 5.3, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

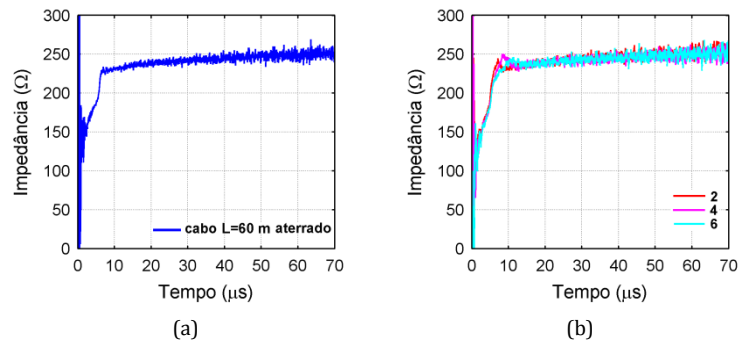


Figura 5.6 – Idem à Figura 5.4, mas para a corrente injetada $T_F = 1 \mu s$.

Na Tabela 5.4 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-6 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , em todos os casos de aplicação de corrente de frente rápida, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores consideráveis, de aproximadamente 22-27%.

Tabela 5.4 – Idem à Tabela 5.3, mas para a corrente injetada de $T_F = 1\mu s$.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
2 unidades	36,08	0,19	190	21,8
4 unidades	37,60	0,19	198	26,9
6 unidades	37,60	0,19	198	26,9
60 m	179,50	1,15	156	-

5.2.1.3 Ensaio 03: Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão

A Figura 5.7 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5\mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de tensão.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.7 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente $185\ \Omega$, valor 12% inferior ao de $R_{BF} = 210\ \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando 1, 2 e 5 unidades de ATL (Figura 5.7 (f)), foram verificados patamares de aproximadamente $164\ \Omega$, $172\ \Omega$ e $180\ \Omega$, respectivamente. Valores inferiores de aproximadamente 22%, 18% e 14%, em relação ao de R_{BF} .

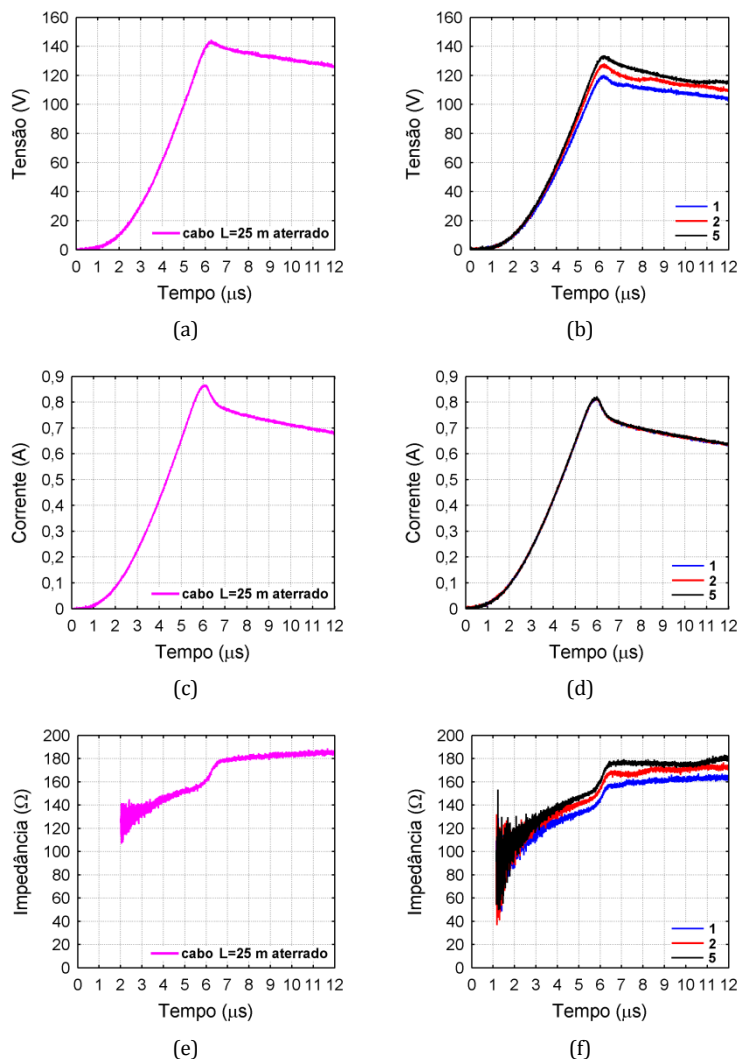


Figura 5.7 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de tensão: cabo comum aterrado de 25 m de comprimento (esquerda) ou 1-5 unidades de ATL em aberto (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu\text{s}$. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. Valor de $R_{BF} = 210 \Omega$ e $\rho_A = 550 \Omega\text{m}$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.5 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 25 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual máxima (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 12% ao se utilizar 1 unidade de ATL. Ao se utilizar 2 e 5 unidades, são verificadas diferenças de aproximadamente apenas 6% e 2%, respectivamente.

Tabela 5.5 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de tensão: unidades de ATL em aberto (1-5) ou cabo comum aterrado (25 m de comprimento), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 25 m de comprimento.

Conductor de Tensão	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	120,40	0,82	147	-11,4
2 unidades	128,41	0,82	157	-5,4
5 unidades	133,81	0,82	163	-1,8
25 m	144,59	0,87	166	-

A Figura 5.8 apresenta as ondas de GPR, corrente e $z(t)$ medidas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de tensão.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.8 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 185Ω , valor 12% inferior ao de $R_{BF} = 210 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando 1, 2 e 5 unidades de ATL (Figura 5.8 (f)), foram verificados patamares de aproximadamente 165Ω , 175Ω e 185Ω , respectivamente. Valores inferiores de aproximadamente 21%, 17% e 12%, em relação ao de R_{BF} .

Na Tabela 5.6 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 25 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , em todos os casos, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores pequenos de aproximadamente 1-6%.

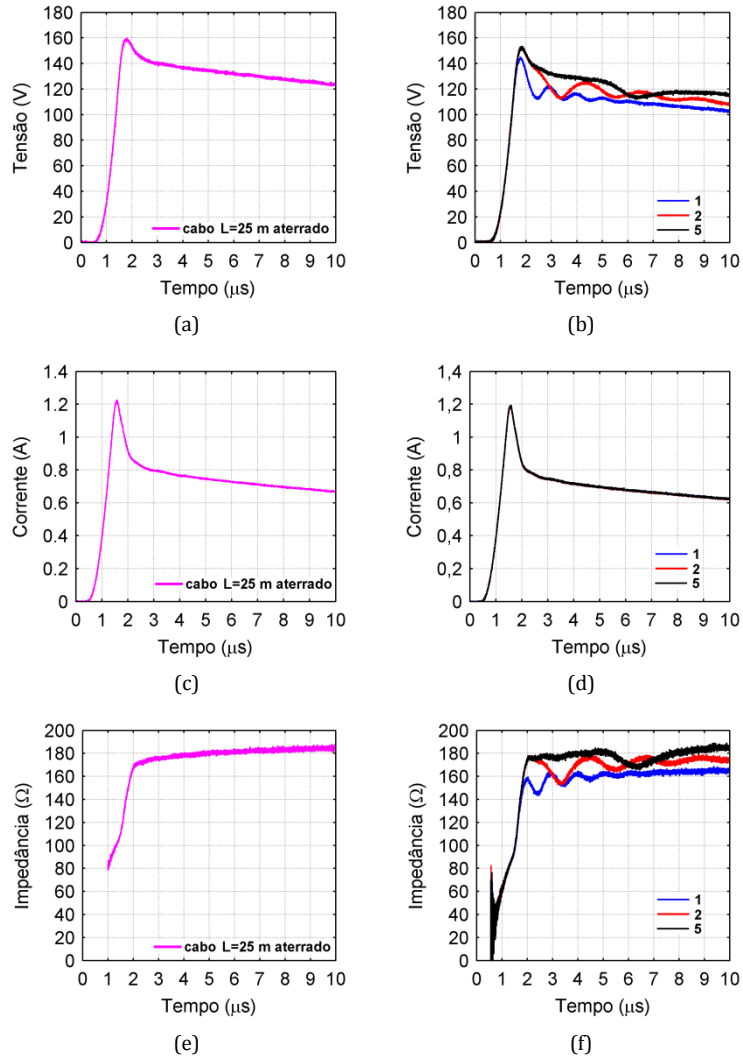


Figura 5.8 – Idem à Figura 5.7, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Tabela 5.6 – Idem à Tabela 5.5, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Condutor de Tensão	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	145,19	1,19	122	-6,1
2 unidades	153,03	1,19	129	-0,8
5 unidades	153,82	1,20	128	-1,5
25 m	160,35	1,23	130	-

5.2.1.4 Ensaio 04: Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão

A Figura 5.9 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL apenas no circuito de tensão.

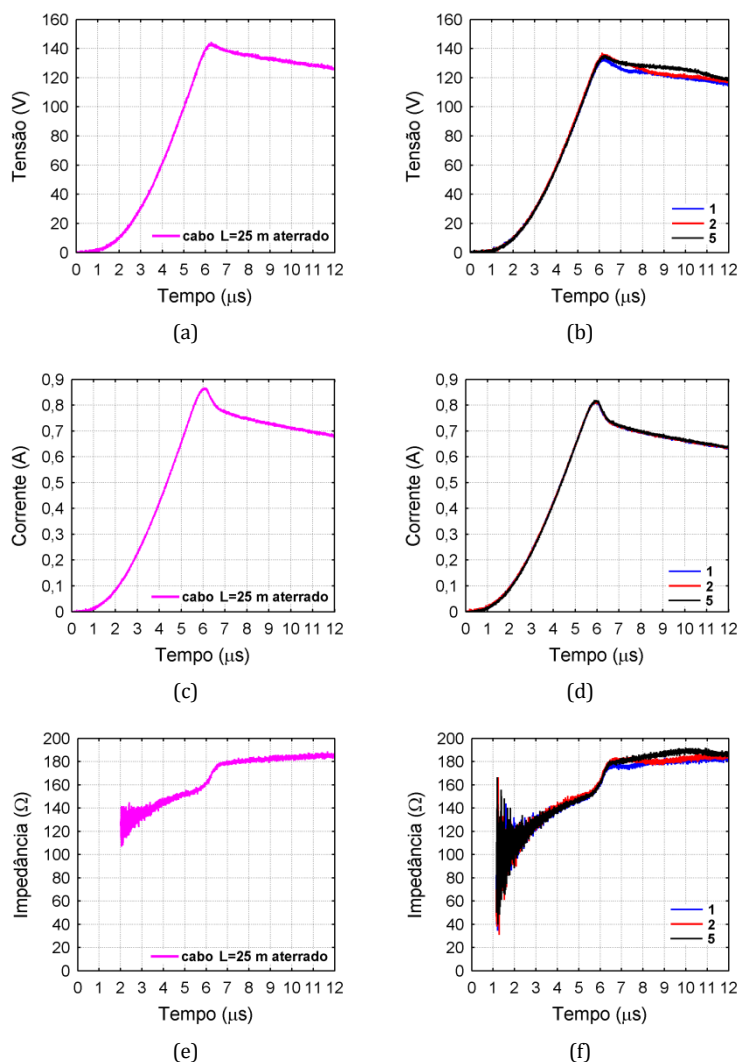


Figura 5.9 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de tensão: cabo comum aterrado de 25 m de comprimento (esquerda) ou 1-5 unidades de ATL aterradas (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. Valor de $R_{BF} = 210 \Omega$ medido e $\rho_A = 550 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.9 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 185Ω , valor 12% inferior ao de $R_{BF} = 210 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando 1, 2 e 5 unidades de ATL (Figura 5.9 (f)), foram

verificados patamares de aproximadamente 184Ω , valor cerca de 12% inferior ao de R_{BF} .

Na Tabela 5.7 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 25 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , em todos os casos, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores pequenos de aproximadamente 0,6-2%.

Tabela 5.7 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de tensão: unidades de ATL aterradas (1-5) ou cabo comum aterrado (25 m de comprimento), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 25 m de comprimento.

Condutor de Tensão	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	133,81	0,82	163	-1,8
2 unidades	137,22	0,82	167	0,6
5 unidades	135,59	0,82	165	-0,6
25 m	144,59	0,87	166	-

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.10 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 185Ω , valor 12% inferior ao de $R_{BF} = 210 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando 1, 2 e 5 unidades de ATL (Figura 5.10 (f)), foram verificados patamares de aproximadamente 185Ω , valor inferior de aproximadamente 12%, em relação ao de R_{BF} . Na Tabela 5.8 são mostrados os valores de pico de GPR, corrente injetada e impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 25 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , em todos os casos, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores pequenos de aproximadamente 0,8-2,3%.

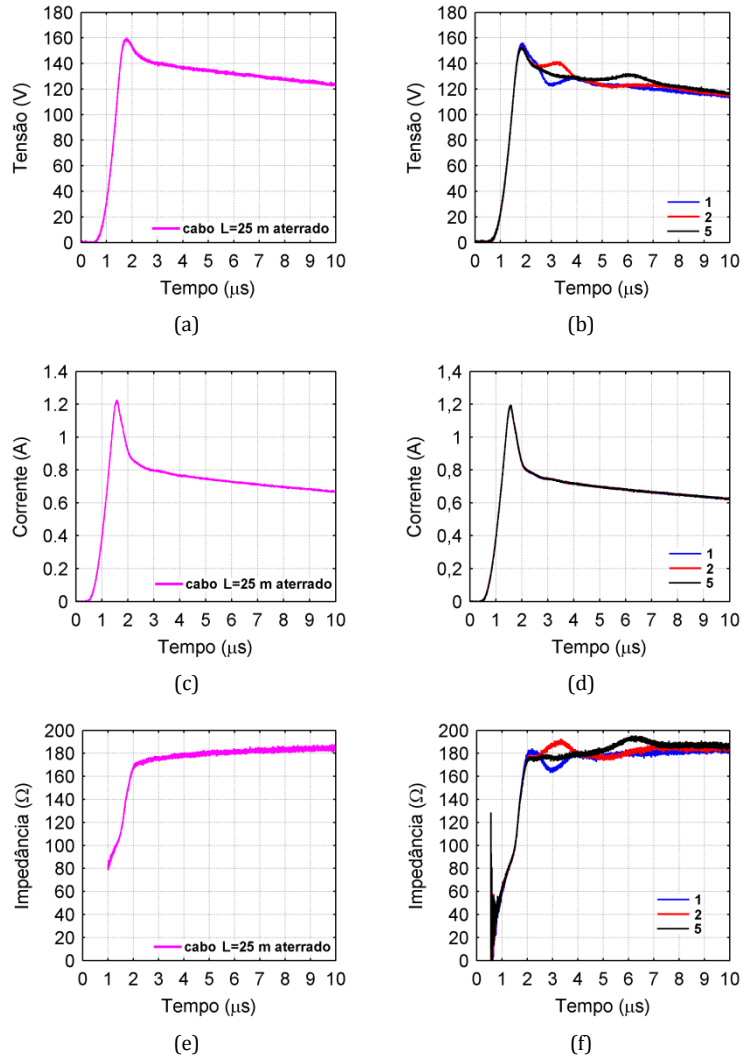


Figura 5.10 – Idem à Figura 5.9, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu\text{s}$.

Tabela 5.8 – Idem à Tabela 5.7, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu\text{s}$.

Condutor de Tensão	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	156,20	1,19	131	0,8
2 unidades	153,21	1,20	128	-1,5
5 unidades	153,01	1,20	127	-2,3
25 m	160,35	1,23	130	-

5.2.1.5 Ensaio 05: Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente e Aterrados no Circuito de Tensão

A Figura 5.11 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e aterradas no circuito de tensão.

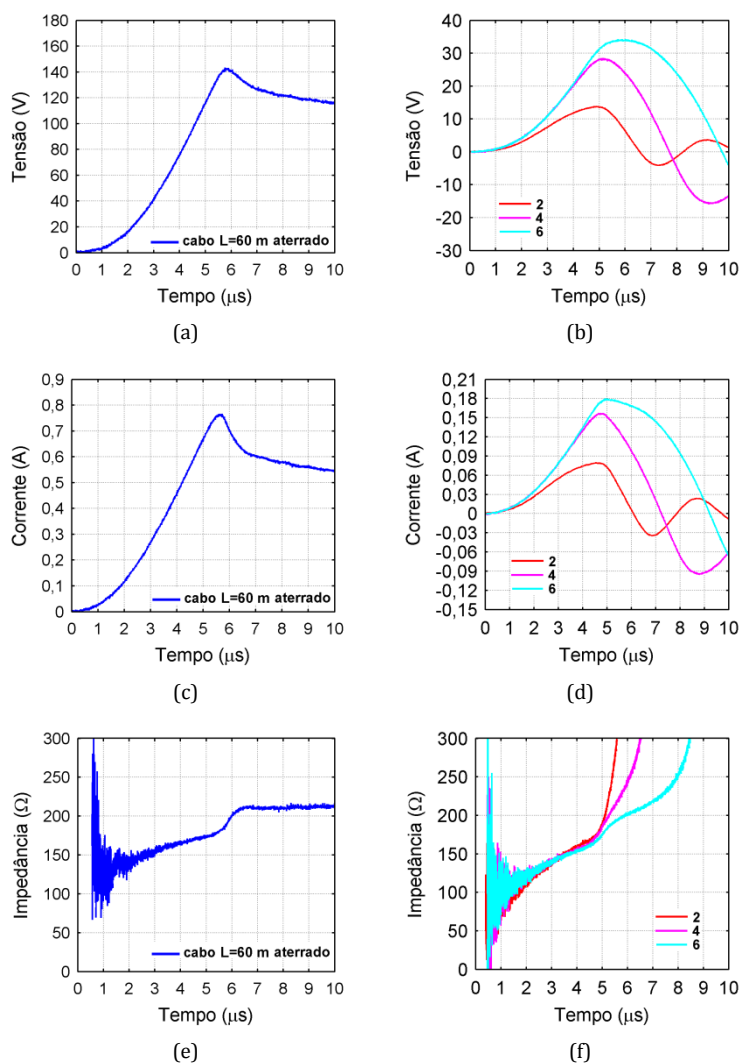


Figura 5.11 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando 2-6 unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e 2 unidades aterradas no circuito de tensão (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. O arranjo de referência utilizado (esquerda) consiste de cabos comuns aterrados de 60 m e de 25 m nos circuitos de corrente e tensão, respectivamente. Valor de $R_{BF} = 235 \Omega$ e $\rho_A = 620 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.11 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 215Ω , valor 8,5% inferior ao de $R_{BF} = 235 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.11 (f)), nem mesmo um patamar constante foi alcançado.

Na Tabela 5.9 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-6 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual máxima (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 6% ao se utilizar 2 unidades de ATL. Ao se utilizar 4 e 6 unidades, são verificadas diferenças de aproximadamente apenas 4% e 2%, respectivamente.

Tabela 5.9 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando unidades de ATL em aberto (2-6) no circuito de corrente e 2 unidades aterradas no circuito de tensão, para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Conductor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
2 unidades	13,92	0,08	174	-6,4
4 unidades	28,54	0,16	178	-4,3
6 unidades	34,26	0,18	190	2,1
60 m	143,40	0,77	186	-

A Figura 5.12 apresenta as ondas de GPR, de corrente e de $z(t)$ medidas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e aterradas no circuito de tensão.

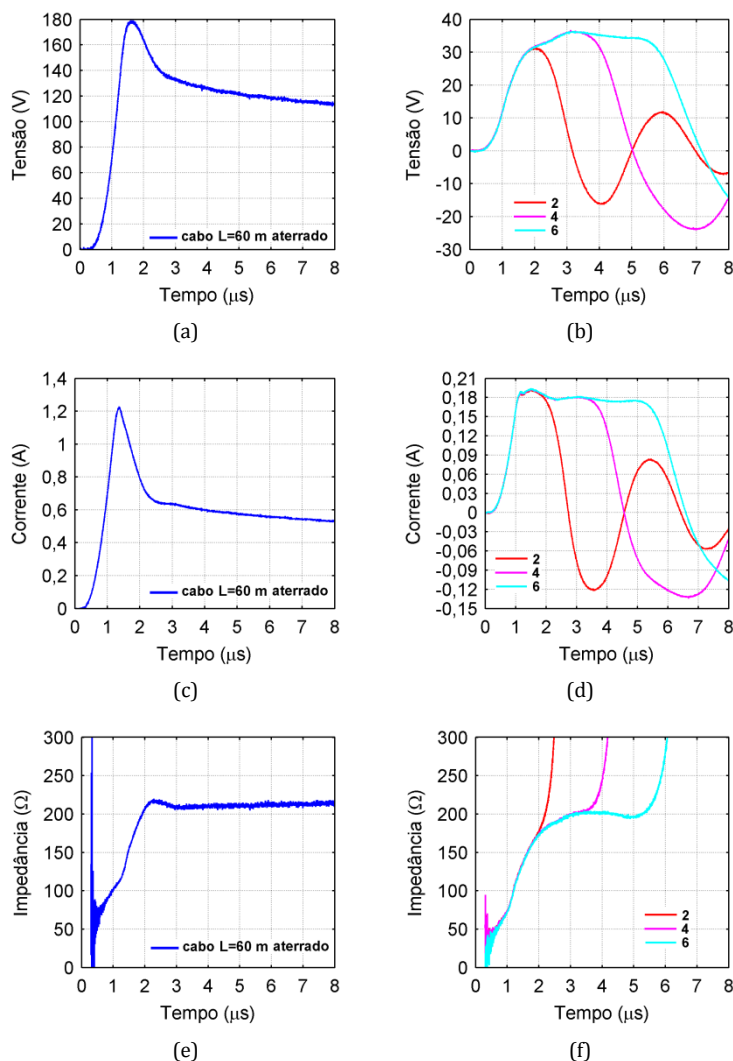


Figura 5.12 – Idem à Figura 5.11, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.12 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 215Ω , valor 8,5% inferior ao de $R_{BF} = 235 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.12 (f)), a existência de um patamar constante foi verificado somente ao se utilizar 6 unidades, alcançando o valor de aproximadamente 200Ω , cerca de 15% inferior ao de R_{BF} .

Na Tabela 5.10 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 2-6 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , em todos os

casos, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores consideráveis de aproximadamente 13-32%.

A diferença percentual de Z_P ao se utilizar 4 e 6 unidades de ATL é maior do que ao se utilizar 2 unidades, pois as curvas de GPR para as duas primeiras situações crescem progressivamente antes do ponto de reflexão, conforme mostrado na Figura 5.12 (b), já que os valores de I_P são praticamente os mesmos.

Tabela 5.10 – Idem à Tabela 5.9, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
2 unidades	31,41	0,19	165	13,0
4 unidades	36,73	0,19	193	32,2
6 unidades	36,41	0,19	192	31,5
60 m	179,20	1,23	146	-

5.2.1.6 Ensaio 06: Unidades de ATL em Aberto nos Circuitos de Corrente e de Tensão

A Figura 5.13 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL em aberto para ambos os circuitos.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.13 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 220Ω , valor 8,3% inferior ao de $R_{BF} = 240 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.13 (f)), nem mesmo um patamar constante foi alcançado.

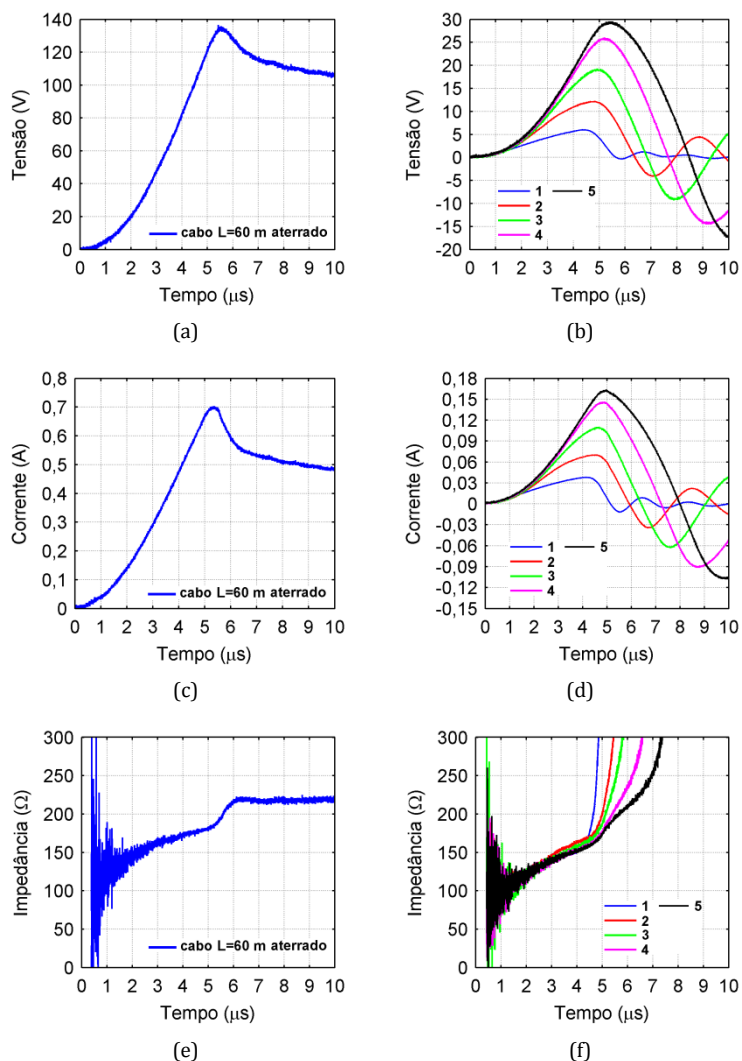


Figura 5.13 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando 1-5 unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e 3 unidades em aberto no circuito de tensão (direita), para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. O arranjo de referência utilizado (esquerda) consiste de cabos comuns aterrados de 60 m e de 25 m nos circuitos de corrente e tensão, respectivamente. Valor de $R_{BF} = 240 \Omega$ e $\rho_A = 630 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.11 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual máxima (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 23% ao se utilizar 1 unidade de ATL. Ao se utilizar 2, 3 e 4 unidades são verificadas diferenças de aproximadamente 10%. Para 5 unidades, de 5%.

Tabela 5.11 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando 1-5 unidades de ATL em aberto no circuito de corrente e 3 unidades em aberto no circuito de tensão, para a corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Conductor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	6,02	0,04	150	-23,1
2 unidades	12,26	0,07	175	-10,3
3 unidades	19,28	0,11	175	-10,3
4 unidades	26,09	0,15	174	-10,8
5 unidades	29,56	0,16	185	-5,1
60 m	136,50	0,70	195	-

A Figura 5.14 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$, tanto para o arranjo de referência que utiliza cabos comuns nos circuitos de corrente e de tensão, quanto para o arranjo que utiliza unidades de ATL em ambos os circuitos.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.14 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 220Ω , valor 8,3% inferior ao de $R_{BF} = 240 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.14 (f)), nem mesmo um patamar constante foi alcançado.

Na Tabela 5.12 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 60 m) e para 1-5 unidades de ATL. Verifica-se que em termos de Z_P , com a exceção do caso em que 2 unidades foram utilizadas, as diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) apresentaram valores consideráveis de aproximadamente 14-19%. Para o caso específico de 2 unidades, foi verificada uma diferença percentual de aproximadamente 7% em Z_P .

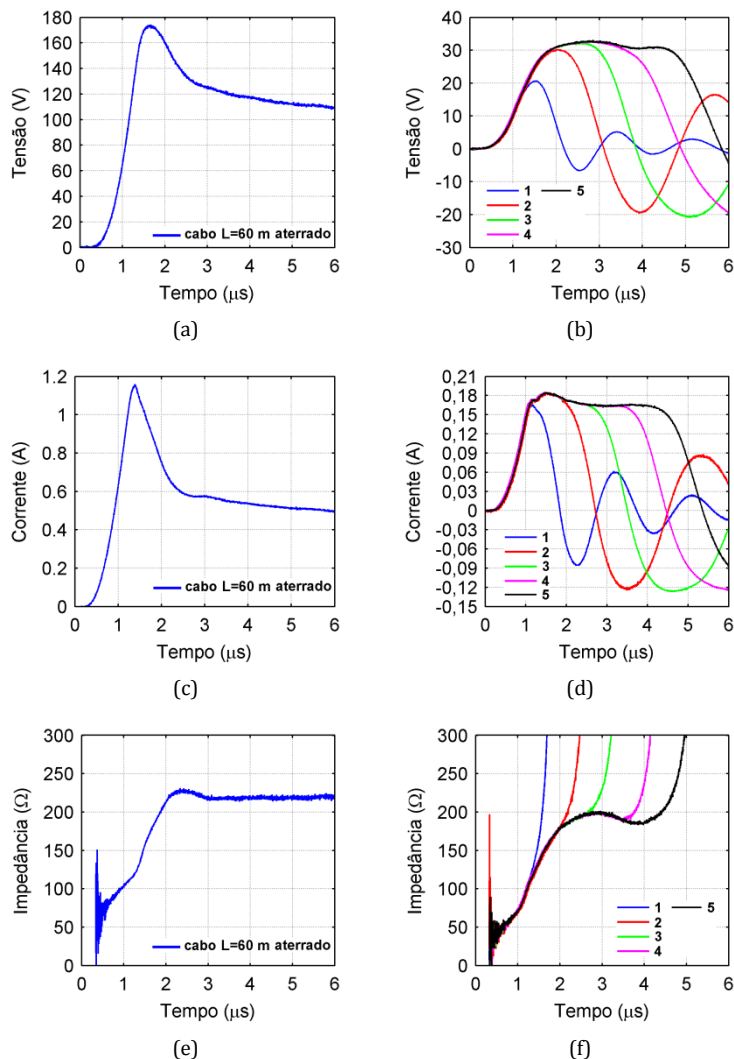


Figura 5.14 – Idem à Figura 5.13, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Tabela 5.12 – Idem à Tabela 5.11, mas para a corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	20,74	0,17	122	-18,7
2 unidades	30,32	0,19	160	6,7
3 unidades	32,44	0,19	171	14,0
4 unidades	32,88	0,19	173	15,3
5 unidades	33,08	0,19	174	16,0
60 m	174,39	1,16	150	-

5.2.2 Resultados para o Aterramento Constituído de Cabos

Contrapeso (Modelo em Escala Semirreal)

5.2.2.1 Ensaio 07: Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente

A Figura 5.15 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$ utilizando três tipos de condutores diferentes no circuito de corrente: cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado (referência)), cabo longo de 130 m (no solo e aterrado) e 1-8 unidades de ATL (em aberto). No circuito de tensão é utilizado um cabo de 40 m (aterrado).

Nota-se que o tempo de frente de $3,5 \mu s$ (inferior aos $5 \mu s$ dos ensaios da seção 5.2.1) decorreu de limitações de implementação prática do circuito de medição para as condições específicas do Ensaio 07. Contudo, este ainda é representativo do tempo de frente de primeiras descargas.

As Figuras 5.15 (a, b) mostram efeitos provocados por sinais espúrios de frequência de aproximadamente 1 MHz nas formas de onda de GPR. Quando são utilizadas unidades de ATL, tais efeitos se tornam mais pronunciados do que ao utilizar um cabo de 130 m, pois a amplitude da onda de GPR obtida é menor no primeiro caso. Isto ocorre devido ao fato da impedância de surto de uma unidade de ATL ser de aproximadamente 3000Ω , valor cerca de oito vezes maior que a impedância de surto de um cabo comum. Deve-se lembrar ainda que para as situações em que foram usados cabos de 130 m, foram inseridos resistores de casamento de impedância para minimizar os efeitos das reflexões.

Para a onda injetada de $T_F = 3,5 \mu s$, o uso do cabo longo de 130 m no solo não promove mudanças significativas nos valores de pico de tensão ($\sim 3\%$) e de corrente ($\sim 1\%$) em relação ao uso do cabo suspenso de mesmo comprimento, como mostrado na Figura 5.15 (a, c), ou inferido através da Tabela 5.13. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 5% quando o cabo de 130 m está no solo.

Verifica-se pela Figura 5.15 (d) que as reflexões nas formas de onda de corrente ao se utilizar 1-8 unidades de ATL ocorreram em aproximadamente $2 \mu s$,

2,8 μs , 3,6 μs , 4,2 μs , 5 μs , 6 μs , 6,7 μs e 7,5 μs , respectivamente. Como o início das ondas impulsivas de corrente foi em aproximadamente 1,2 μs , velocidades de propagação de 2,5%, 2,5%, 2,5%, 2,67%, 2,63%, 2,5%, 2,55% e 2,54% da velocidade da luz no vácuo foram obtidas para as mesmas unidades. Portanto, o valor médio de velocidade de propagação foi da ordem de 2,55% de velocidade da luz no vácuo.

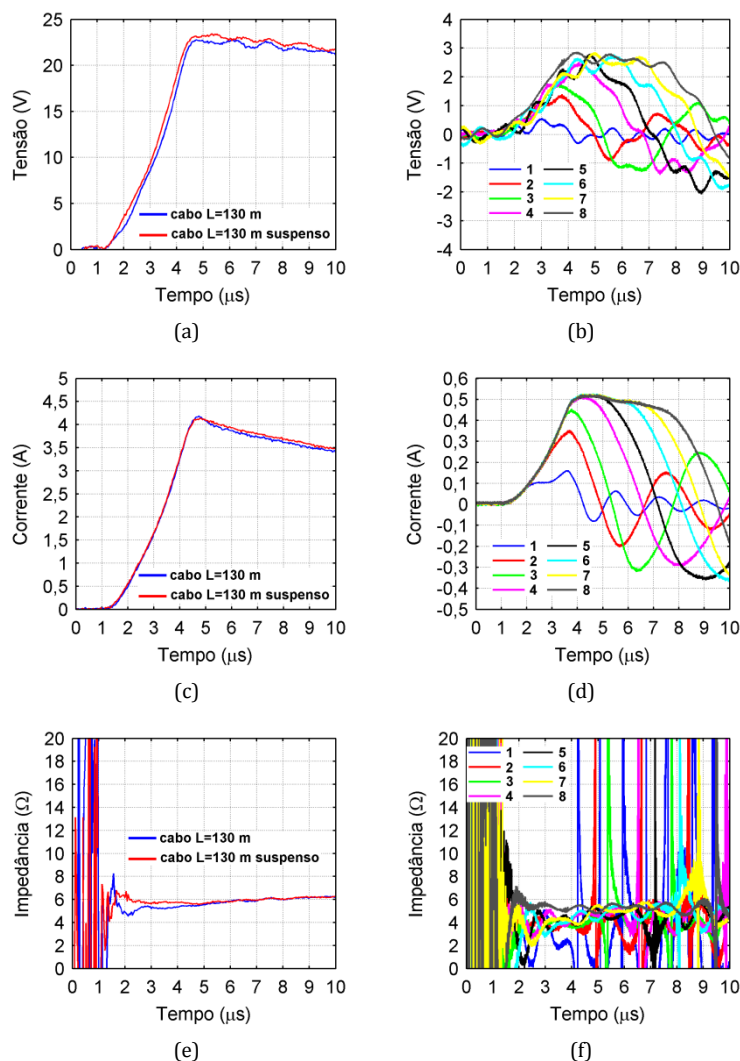


Figura 5.15 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de corrente: cabos comuns aterrados de 130 m de comprimento no solo ou suspenso (esquerda) ou 1-8 unidades de ATL em aberto (direita), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu\text{s}$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. Valor de $R_{BF} = 10,2 \Omega$ e $\rho_A = 212 \Omega\text{m}$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.13 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 130 m suspenso), para um cabo de 130 no solo e para 1-8 unidades de ATL.

Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 7% ao se utilizar 5 unidades de ATL. Ao se utilizar 8 unidades, tal diferença chegou à um valor mínimo de 5,3%.

Tabela 5.13 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de corrente: unidades de ATL em aberto (1-8) ou cabos comuns aterrados (130 m de comprimento, no solo ou suspenso), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo suspenso de 130 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	0,56	0,16	3,5	-38,6
2 unidades	1,39	0,35	4,0	-29,8
3 unidades	1,77	0,45	3,9	-30,6
4 unidades	2,51	0,52	4,8	-15,8
5 unidades	2,80	0,53	5,3	-7,0
6 unidades	2,78	0,53	5,3	-7,0
7 unidades	2,86	0,53	5,4	-5,3
8 unidades	2,87	0,53	5,4	-5,3
130 m	22,75	4,18	5,4	-5,3
130 m suspenso	23,43	4,13	5,7	-

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.15 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente $6,3 \Omega$, valor 38% inferior ao de $R_{BF} = 10,2 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.15 (f)), verifica-se a existência de patamares com oscilações ao se utilizar 2-8 unidades, apresentando valores médios de aproximadamente 4Ω para 2-3 unidades, de 5Ω para 4-7 unidades e de $5,5 \Omega$ para 8 unidades.

A Figura 5.16 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$ utilizando três tipos de condutores diferentes no circuito de corrente: cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado (referência)), cabo longo de 130 m (no solo e aterrado) e 1-8 unidades de ATL (em aberto). No circuito de tensão é utilizado um cabo de 40 m aterrado.

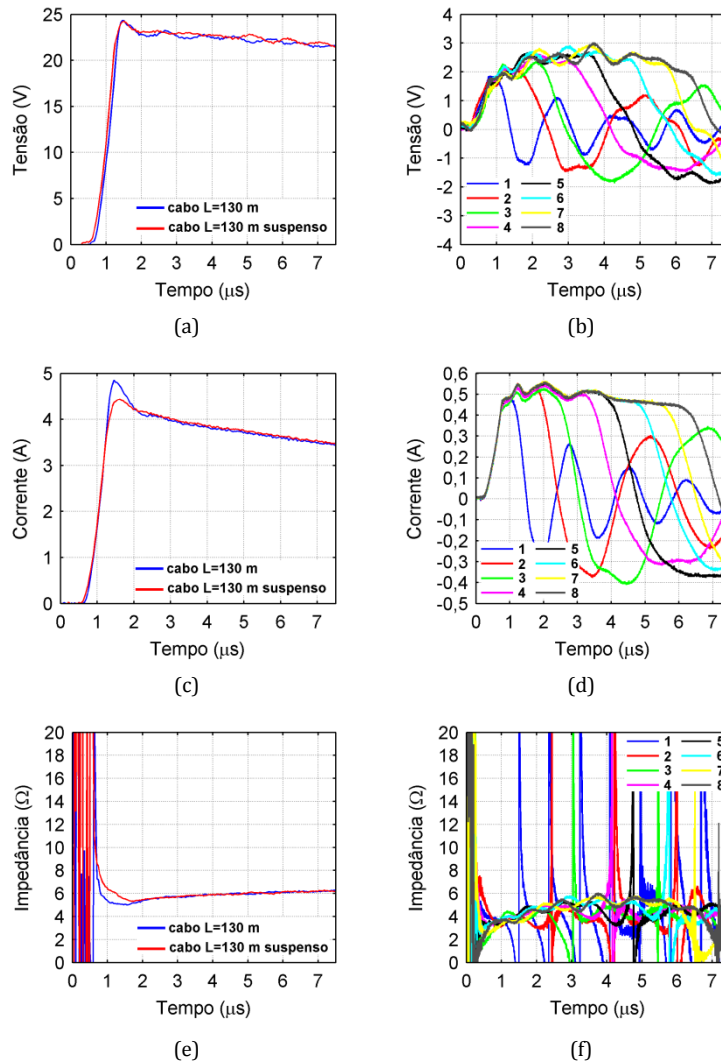


Figura 5.16 – Idem à Figura 5.15, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados anteriormente, na injeção de uma onda de $T_F = 3,5 \mu s$, são válidas também para a onda de $T_F = 0,9 \mu s$.

Para a onda injetada de $T_F = 0,9 \mu s$, o uso do cabo longo de 130 m no solo não promove mudanças significativas no valor de pico de tensão ($<0,5\%$), mas no valor de pico de corrente verifica-se um considerável aumento de aproximadamente 9%, em relação ao uso do cabo suspenso de mesmo comprimento, como mostrado na Figura 5.16 (a, c), ou inferido através da Tabela 5.14. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 9% quando o cabo de 130 m está no solo.

Verifica-se pela Figura 5.16 (d) que as reflexões nas formas de onda de corrente ao se utilizar 1-8 unidades de ATL ocorreram em aproximadamente 1 μ s, 1,8 μ s, 2,4 μ s, 3,2 μ s, 3,8 μ s, 4,7 μ s, 5,5 μ s e 6 μ s, respectivamente. Como o início das ondas impulsivas de corrente foi em aproximadamente 0,2 μ s, velocidades de propagação de 2,5%, 2,5%, 2,73%, 2,67%, 2,78%, 2,67%, 2,64% e 2,76% da velocidade da luz no vácuo foram obtidas para as mesmas unidades. Portanto, o valor médio de velocidade de propagação foi da ordem de 2,66% de velocidade da luz no vácuo.

Tabela 5.14 – Idem à Tabela 5.13, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu$ s.

Condutor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	Percentual de Z_P (%)
1 unidade	1,87	0,49	3,8	-30,9
2 unidades	2,17	0,55	3,9	-29,1
3 unidades	2,37	0,53	4,5	-18,2
4 unidades	2,62	0,55	4,8	-12,7
5 unidades	2,70	0,56	4,8	-12,7
6 unidades	2,92	0,56	5,2	-5,4
7 unidades	2,96	0,56	5,3	-3,6
8 unidades	3,02	0,56	5,4	-1,8
130 m	24,33	4,85	5,0	-9,1
130 m suspenso	24,25	4,44	5,5	-

Na Tabela 5.14 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 130 m suspenso), para um cabo de 130 m no solo e para 1-8 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 5% ao se utilizar 6 unidades de ATL. Ao se utilizar 8 unidades, tal diferença chegou à um valor mínimo próximo de 2%.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.16 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 6 Ω , valor 38% inferior ao de $R_{BF} = 10,2 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.16 (f)) verifica-se a existência

de patamares com oscilações ao se utilizar 2-8 unidades, de aproximadamente 4Ω para 2-3 unidades e de 5Ω para 4-8 unidades.

5.2.2.2 Ensaio 08: Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente

A Figura 5.17 apresenta as ondas de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$ utilizando três tipos de condutores diferentes no circuito de corrente: cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado (referência)), cabo longo de 130 m (no solo e aterrado) e 1-8 unidades de ATL (aterradas). No circuito de tensão é utilizado um cabo de 40 m (aterrado).

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 3,5 \mu s$, o uso dos cabos longos de 130 m no solo não promove mudanças significativas nos valores de pico de tensão ($\sim 1\%$) e de corrente ($\sim 2\%$) em relação ao uso do cabo suspenso de mesmo comprimento, como mostrado na Figura 5.17 (a, c), ou inferido através da Tabela 5.15. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 4% quando os cabos de 130 m estão no solo.

Na Tabela 5.15 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 130 m suspenso), para um cabo de 130 no solo e para 1-8 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 7% ao se utilizar 6 unidades de ATL.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.17 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente $9,2 \Omega$, valor 30% inferior ao de $R_{BF} = 13,6 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.17 (f)), verifica-se a existência de patamares com oscilações ao se utilizar 1-8 unidades, de aproximadamente $6,3 \Omega$ para 1 unidade, de $7,3 \Omega$ para 2 unidades, de $7,8 \Omega$ para 3 unidades e de 8Ω para 4-8 unidades.

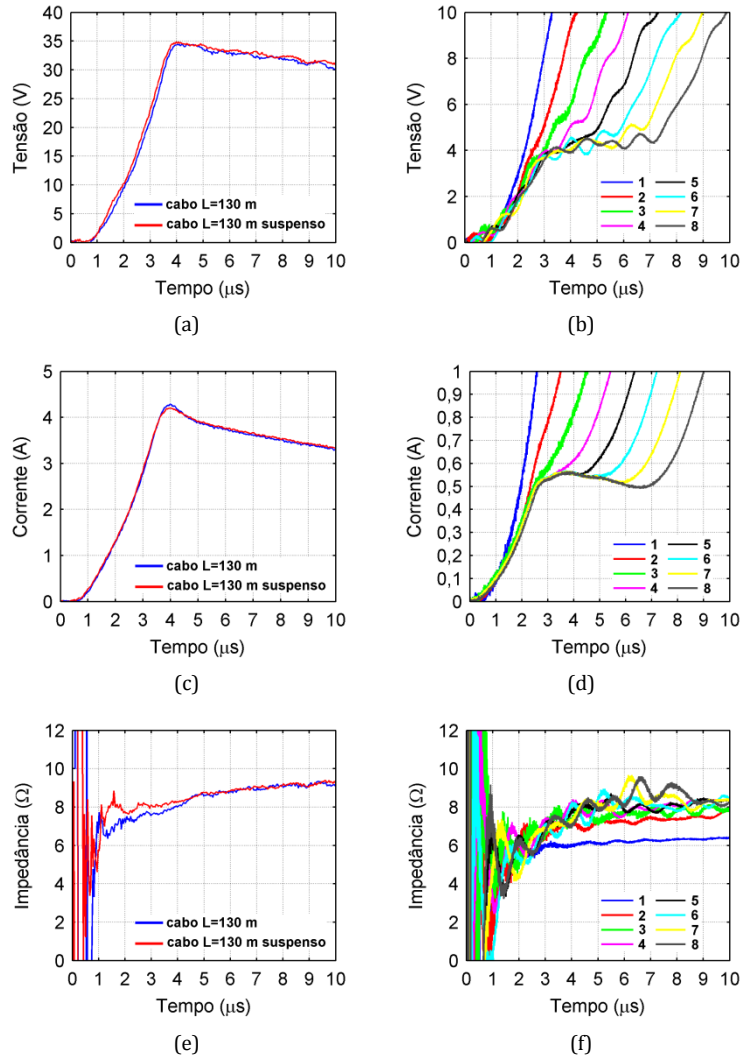


Figura 5.17 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando no circuito de corrente: cabos comuns aterrados de 130 m de comprimento no solo ou suspenso (esquerda) ou 1-8 unidades de ATL aterradas (direita), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. Valor de $R_{BF} = 13,6 \Omega$ e $\rho_A = 283 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Tabela 5.15 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de corrente: unidades de ATL aterradas (1-8) ou cabos comuns aterrados (130 m de comprimento, no solo ou suspenso), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo suspenso de 130 m de comprimento.

Conductor de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidade	1,50	0,20	7,5	-9,6
2 unidades	2,29	0,43	5,3	-36,1
3 unidades	4,00	0,54	7,4	-10,8
4 unidades	4,00	0,56	7,1	-14,5
5 unidades	4,00	0,57	7,0	-15,7
6 unidades	4,36	0,57	7,7	-7,2
7 unidades	4,29	0,57	7,5	-9,6
8 unidades	4,36	0,57	7,7	-7,2
130 m	34,45	4,29	8,0	-3,6
130 m suspenso	34,85	4,20	8,3	-

A Figura 5.18 apresenta as ondas de GPR (a, b), corrente (c, d) e $z(t)$ (e, f) medidas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$ utilizando três tipos de condutores diferentes no circuito de corrente: cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado (referência)), cabo longo de 130 m (no solo e aterrado) e 1-8 unidades de ATL (aterradas). No circuito de tensão é utilizado um cabo de 40 m (aterrado).

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 0,9 \mu s$, o uso do cabo longo de 130 m no solo não promove mudanças significativas no valor de pico de tensão ($\sim 3\%$), mas no valor de pico de corrente verifica-se um considerável aumento de aproximadamente 7%, em relação ao uso do cabo suspenso de mesmo comprimento como mostrado na Figura 5.18 (a, c), ou inferido através da Tabela 5.16. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente apenas 4% quando o cabo de 130 m está no solo.

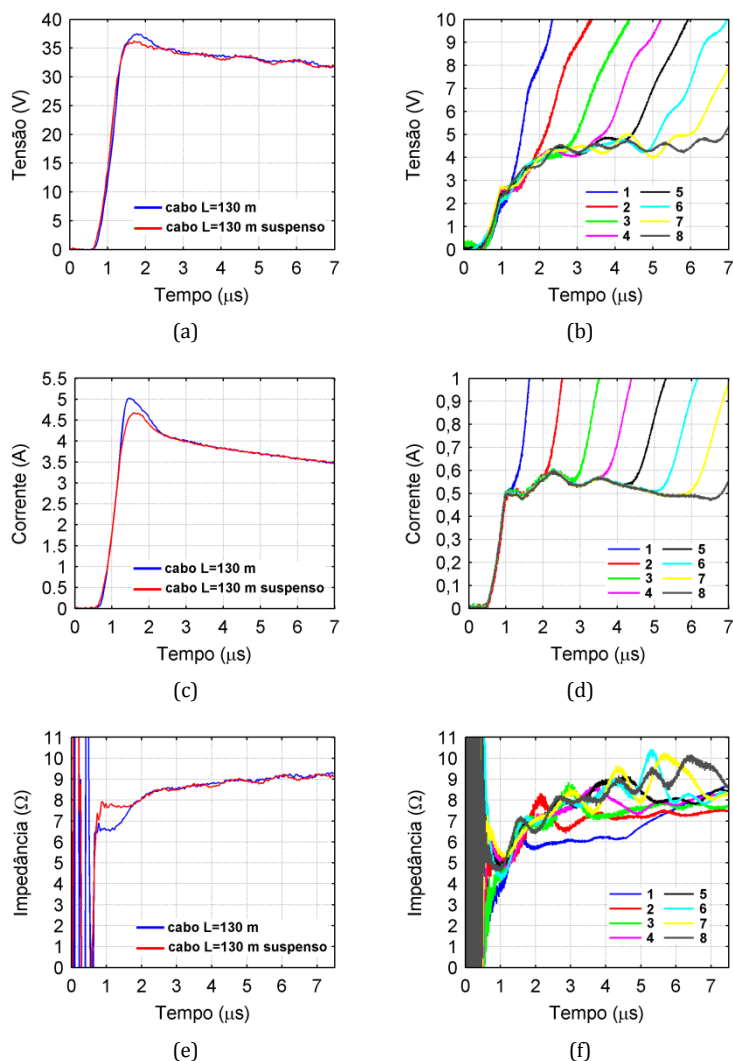


Figura 5.18 – Idem à Figura 5.17, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

Na Tabela 5.16 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 130 m suspenso), para um cabo de 130 m no solo e para 1-8 unidades de ATL. Verifica-se em termos de Z_P uma diferença percentual (em relação ao arranjo de referência) de aproximadamente apenas 4% ao se utilizar 5 unidades de ATL e de aproximadamente 3% ao se utilizar 6 ou mais unidades.

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência (Figura 5.18 (e)) atingiu um patamar constante de aproximadamente 9Ω , valor 34% inferior ao de $R_{BF} = 13,6 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.18 (f)) verificou-se a existência

de patamares com oscilações ao se utilizar 1-8 unidades, de valores médios de aproximadamente 6Ω para 1 unidade, de $7,3 \Omega$ para 2 unidades, de $7,7 \Omega$ para 3 unidades, de 8Ω para 4-5-6 unidades e de 9Ω para 7-8 unidades.

Tabela 5.16 – Idem à Tabela 5.15, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

Cabos de Corrente	Parâmetros Impulsivos			Diferença Percentual de Z_P (%)
	V_P (V)	I_P (A)	Z_P (Ω)	
1 unidades	2,47	0,51	4,8	-38,5
2 unidades	3,90	0,57	6,8	-12,8
3 unidades	4,22	0,60	7,0	-10,3
4 unidades	4,21	0,60	7,0	-10,3
5 unidades	4,50	0,60	7,5	-3,8
6 unidades	4,55	0,60	7,6	-2,6
7 unidades	4,55	0,60	7,6	-2,6
8 unidades	4,55	0,60	7,6	-2,6
130 m	37,50	5,02	7,5	-3,8
130 m suspenso	36,25	4,68	7,8	-

5.2.2.3 Ensaio 09: Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão

A Figura 5.19 apresenta as ondas de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) medidas para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$ utilizando quatro tipos de condutores diferentes no circuito de tensão: cabo longo de 40 m (aterrado (referência)), cabo longo de 40 m (em aberto), 1-8 unidades de ATL (em aberto) e cabos curtos de 3-24 m. No circuito de corrente é utilizado um cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado).

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 3,5 \mu s$, o uso do cabo longo de 40 m em aberto promove mudança significativa apenas nos valores de pico de tensão ($\sim 9,4\%$) em relação ao uso do cabo aterrado de mesmo comprimento, como mostrado na

Figura 5.19 (a, d), ou inferido através da Tabela 5.17. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 10% quando o cabo de 40 m está no solo.

Verifica-se pela Figura 5.19 (c) que as reflexões nas formas de onda de GPR ao se utilizar cabos de 12-24 m de comprimento ocorrem em tempos muito próximos e influenciam no valor da amplitude do sinal.

Como era de se esperar, as formas de onda de corrente mostradas nas Figuras 5.17 (d, e, f) são idênticas para qualquer condutor utilizado no circuito de tensão, pois as medições de corrente e de GPR são independentes e o mesmo cabo condutor de 130 m (suspensão e aterrado) foi utilizado no circuito de corrente.

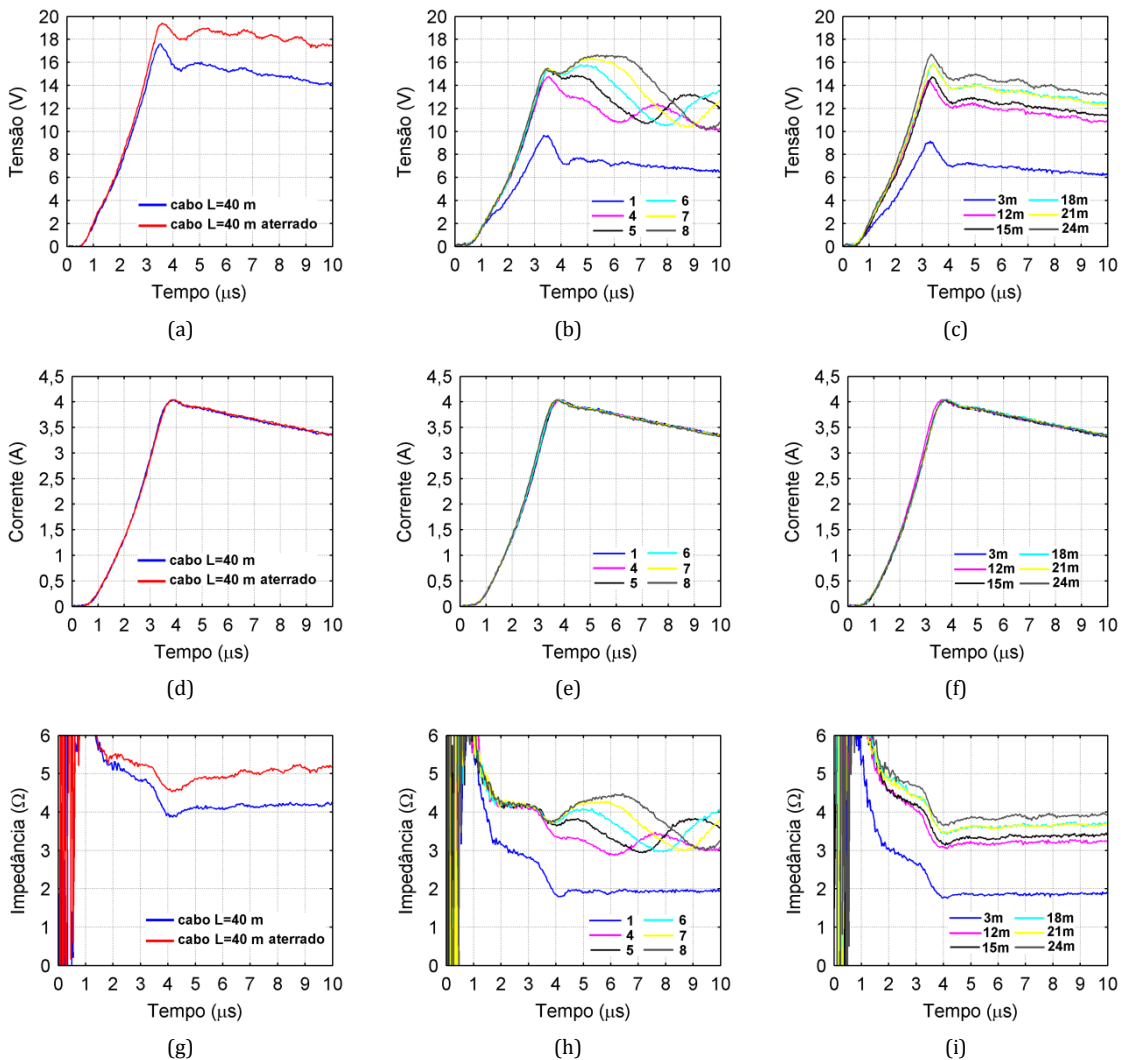


Figura 5.19 – Medições de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) usando no circuito de tensão: cabos comuns de 40 m de comprimento em aberto ou aterrado (esquerda), 1-8 unidades de ATL em aberto (centro) ou cabos comuns em aberto de 3-24 m de comprimento (direita), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspensão e aterrado. Valor de $R_{BF} = 7,7 \Omega$ e $\rho_A = 160 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.17 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 40 m aterrado), para um cabo de 40 m em aberto, para 1-8 unidades de ATL e para cabos curtos de 3-24 m. Os valores de V_P utilizados são relativos ao primeiro pico, em despeito de um segundo pico de valor superior ao primeiro, quando 6 ou mais unidades são utilizadas (Figura 5.19 (b)). Verifica-se em termos de Z_P diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) consideráveis nas faixas de aproximadamente 21-50% ao se utilizar 1-8 unidades de ATL e de aproximadamente 14-52% ao se utilizar cabos curtos de 3-24 m.

Tabela 5.17 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de tensão: unidades de ATL em aberto (1-8), cabos comuns em aberto (3-40 m de comprimento) ou cabo comum aterrado (40 m de comprimento) no circuito de tensão, para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspenso e aterrado. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo comum aterrado de 40 m de comprimento.

Conductor de Tensão		Parâmetros Impulsivos						Diferença	
		V_P (V)		I_P (A)		Z_P (Ω)		Percentual de Z_P (%)	
1 unid.	3 m	9,67	9,17	4,05	4,05	2,4	2,3	-50,0	-52,0
4 unid.	12 m	14,75	14,42	4,05	4,05	3,6	3,6	-25,0	-25,0
5 unid.	15 m	15,44	14,75	4,05	4,05	3,8	3,6	-20,8	-25,0
6 unid.	18 m	15,40	15,88	4,05	4,05	3,8	3,9	-20,8	-18,8
7 unid.	21 m	15,37	15,84	4,05	4,05	3,8	3,9	-20,8	-18,8
8 unid.	24 m	15,43	16,72	4,05	4,05	3,8	4,1	-20,8	-14,6
40 m		17,58		4,05		4,3		-10,4	
40 m aterrado		19,41		4,05		4,8		-	

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência, cabo de 40 m aterrado (Figura 5.19 (g)), atingiu um patamar constante de aproximadamente 5Ω , valor 35% inferior ao de $R_{BF} = 7,7 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para o cabo de 40 m em aberto, o patamar foi de aproximadamente $4,3 \Omega$. Para as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL (Figura 5.19 (h)), verifica-se a existência de um patamar apenas quando 1 unidade de ATL foi utilizada, de aproximadamente 2Ω . As curvas de $z(t)$ utilizando 2-8 unidades de ATL (Figura 5.19 (h)) apresentam oscilações significativas, não se verificando a existência de

um patamar para a janela de tempo de $10 \mu\text{s}$. Para os cabos curtos (Figura 5.19 (i)), verifica-se a existência de patamares para todos os comprimentos na faixa de 3-24 m, de aproximadamente $1,9 \Omega$, $3,3 \Omega$, $3,4 \Omega$, $3,7 \Omega$, $3,7 \Omega$ e $3,9 \Omega$, respectivamente. Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de $100 \mu\text{s}$, verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL ou cabos curtos de mesmo comprimento das unidades convergem para valores próximos, como mostrado na Figura 5.20 (b, c). Porém, tais valores ainda estão bem abaixo do $R_{BF} = 7,7 \Omega$. Nem mesmo ao se utilizar os cabos de 40 m foi possível obter um valor próximo do R_{BF} , como mostrado na Figura 5.20 (a).

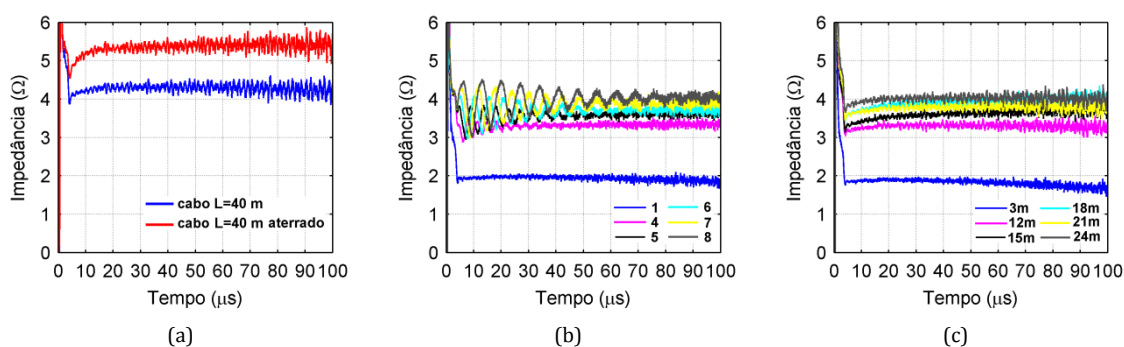


Figura 5.20 – Medições de $z(t)$ usando no circuito de tensão: (a) cabos comuns de 40 m de comprimento em aberto ou aterrado, (b) 1-8 unidades de ATL em aberto, (c) cabos comuns em aberto de 3-24 m de comprimento, para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu\text{s}$. Janela de $100 \mu\text{s}$.

A Figura 5.21 apresenta as ondas de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) medidas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$ utilizando quatro tipos de condutores diferentes no circuito de tensão: cabo longo de 40 m (aterrado (referência)), cabo longo de 40 m (em aberto), 1-8 unidades de ATL (em aberto) e cabos curtos de 3-24 m. No circuito de corrente é utilizado um cabo longo de 130 m suspenso e aterrado.

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$, o uso do cabo longo de 40 m em aberto promove uma pequena mudança apenas no valor de pico de tensão ($\sim 2\%$) em relação ao uso do cabo aterrado de mesmo comprimento, como mostrado na

Figura 5.21 (a, d), ou inferido através da Tabela 5.18. Como efeito final, o valor de Z_P aumenta de aproximadamente 2% quando o cabo de 40 m está no solo.

Verifica-se pela Figura 5.21 (c) que as reflexões nas formas de onda de GPR ao se utilizar cabos de 12-24 m de comprimento ocorrem em tempos muito próximos e influenciam no valor da amplitude do sinal.

Como era de se esperar, as formas de onda de corrente mostradas nas Figuras 5.18 (d, e, f) são idênticas para qualquer condutor utilizado no circuito de tensão, pois as medições de corrente e de GPR são independentes e o mesmo cabo condutor de 130 m (suspenso e aterrado) foi utilizado no circuito de corrente.

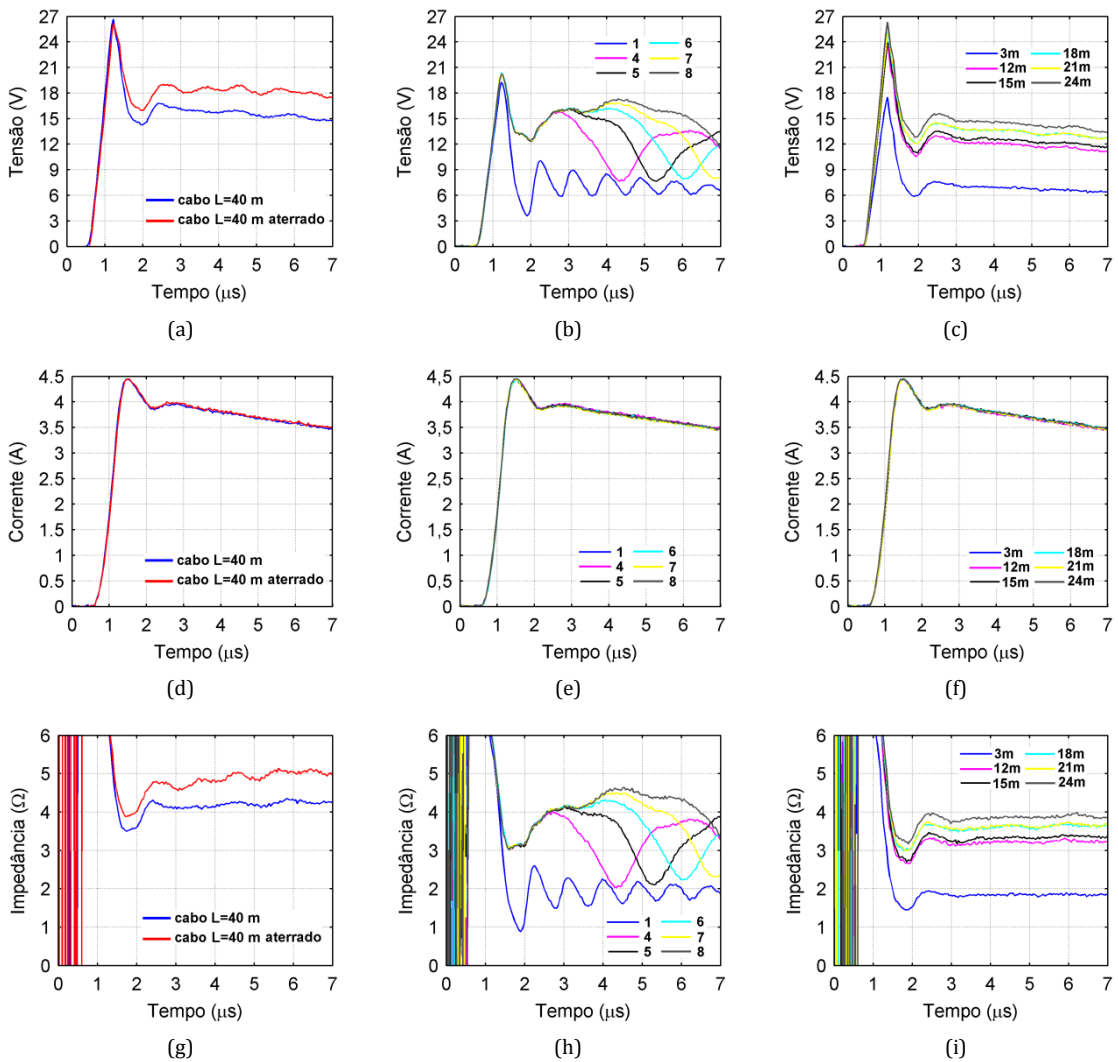


Figura 5.21 – Idem à Figura 5.19, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$.

Na Tabela 5.18 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 40 m aterrado), para um cabo de 40 m em aberto, para 1-8 unidades de ATL e para cabos curtos de 3-24 m. Verifica-se em termos de Z_P diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) consideráveis na faixa de aproximadamente 22-27% ao se utilizar 1-8 unidades de ATL e de 34% ao se utilizar um cabo curto de 3 m. Entretanto, para cabos a partir de 18 m e 21 m as diferenças percentuais foram de aproximadamente 5%, e para o cabo de 24 m não houve diferença.

Tabela 5.18 – Idem à Tabela 5.17, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

Condutor de Tensão		Parâmetros Impulsivos						Diferença	
		V_P (V)		I_P (A)		Z_P (Ω)		Percentual de Z_P (%)	
1 unid.	3 m	19,27	17,52	4,45	4,45	4,3	3,9	-27,1	-33,9
4 unid.	12 m	20,23	24,06	4,45	4,45	4,6	5,4	-22,0	-8,5
5 unid.	15 m	20,24	23,82	4,45	4,45	4,6	5,3	-22,0	-10,2
6 unid.	18 m	20,40	25,09	4,45	4,45	4,6	5,6	-22,0	-5,1
7 unid.	21 m	20,24	24,93	4,45	4,45	4,6	5,6	-22,0	-5,1
8 unid.	24 m	20,20	26,35	4,45	4,45	4,5	5,9	-23,8	0
40 m		26,66		4,45		6,0		1,7	
40 m aterrado		26,18		4,45		5,9		-	

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência, cabo de 40 m aterrado (Figura 5.21 (g)), atingiu um patamar constante de aproximadamente 5Ω , valor 35% inferior ao de $R_{BF} = 7,7 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para o cabo de 40 m em aberto, o patamar foi de aproximadamente $4,3 \Omega$. As curvas de $z(t)$ utilizando 1-8 unidades de ATL (Figura 5.21 (h)) apresentam oscilações significativas, não se verificando a existência de um patamar para a janela de tempo de $7 \mu s$. Para os cabos curtos (Figura 5.21 (i)), verifica-se a existência de patamares para todos os comprimentos na faixa de 3-24 m, de aproximadamente $1,8 \Omega$, $3,2 \Omega$, $3,3 \Omega$, $3,6 \Omega$, $3,6 \Omega$ e $3,9 \Omega$, respectivamente.

Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de $100 \mu s$, verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL ou cabos curtos de mesmo comprimento

das unidades convergem para valores próximos, como mostrado na Figura 5.22 (b, c). Porém, tais valores ainda estão bem abaixo do $R_{BF} = 7,7 \Omega$. Nem mesmo ao se utilizar os cabos de 40 m foi possível obter um valor próximo do R_{BF} , como mostrado na Figura 5.22 (a).

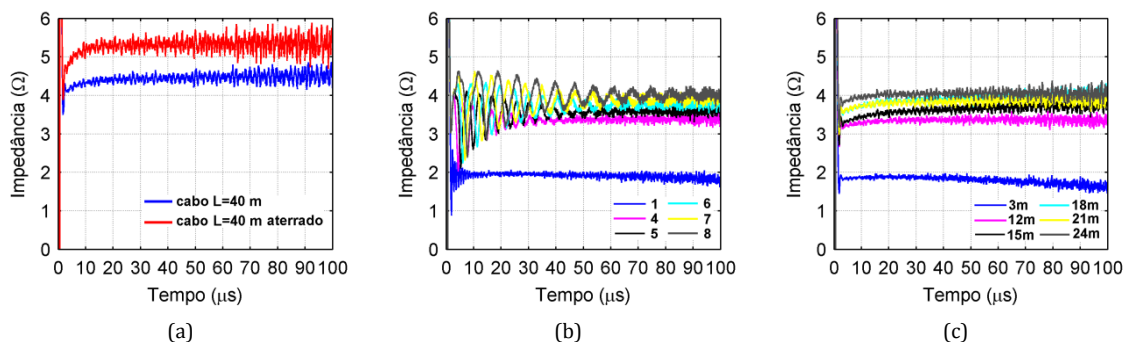


Figura 5.22 – Idem à Figura 5.20, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

5.2.2.4 Ensaio 10: Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão

A Figura 5.23 apresenta as ondas de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) medidas para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$ utilizando quatro tipos de condutores diferentes no circuito de tensão: cabo longo de 40 m (aterrado (referência)), cabo longo de 40 m (em aberto), 1-8 unidades de ATL (aterradas) e cabos curtos de 3-24 m (aterrados). No circuito de corrente é utilizado um cabo longo de 130 m (suspenso e aterrado).

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 3,5 \mu s$, o uso do cabo longo de 40 m em aberto promove uma pequena mudança apenas no valor de pico de tensão ($\sim 7\%$) em relação ao uso do cabo aterrado de mesmo comprimento, como mostrado na Figura 5.23 (a, d), ou inferido através da Tabela 5.19. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 8% quando o cabo de 40 m está em aberto.

Verifica-se pela Figura 5.23 (c) que as reflexões nas formas de onda de GPR ao se utilizar cabos de 3-24 m de comprimento ocorrem em tempos muito próximos e influenciam no valor da amplitude do sinal.

Como era de se esperar, as formas de onda de corrente mostradas na Figura 5.23 (d, e, f) são idênticas para qualquer condutor utilizado no circuito de tensão, pois as medições de corrente e de GPR são independentes e o mesmo cabo condutor de 130 m (suspensão e aterrado) foi utilizado no circuito de corrente.

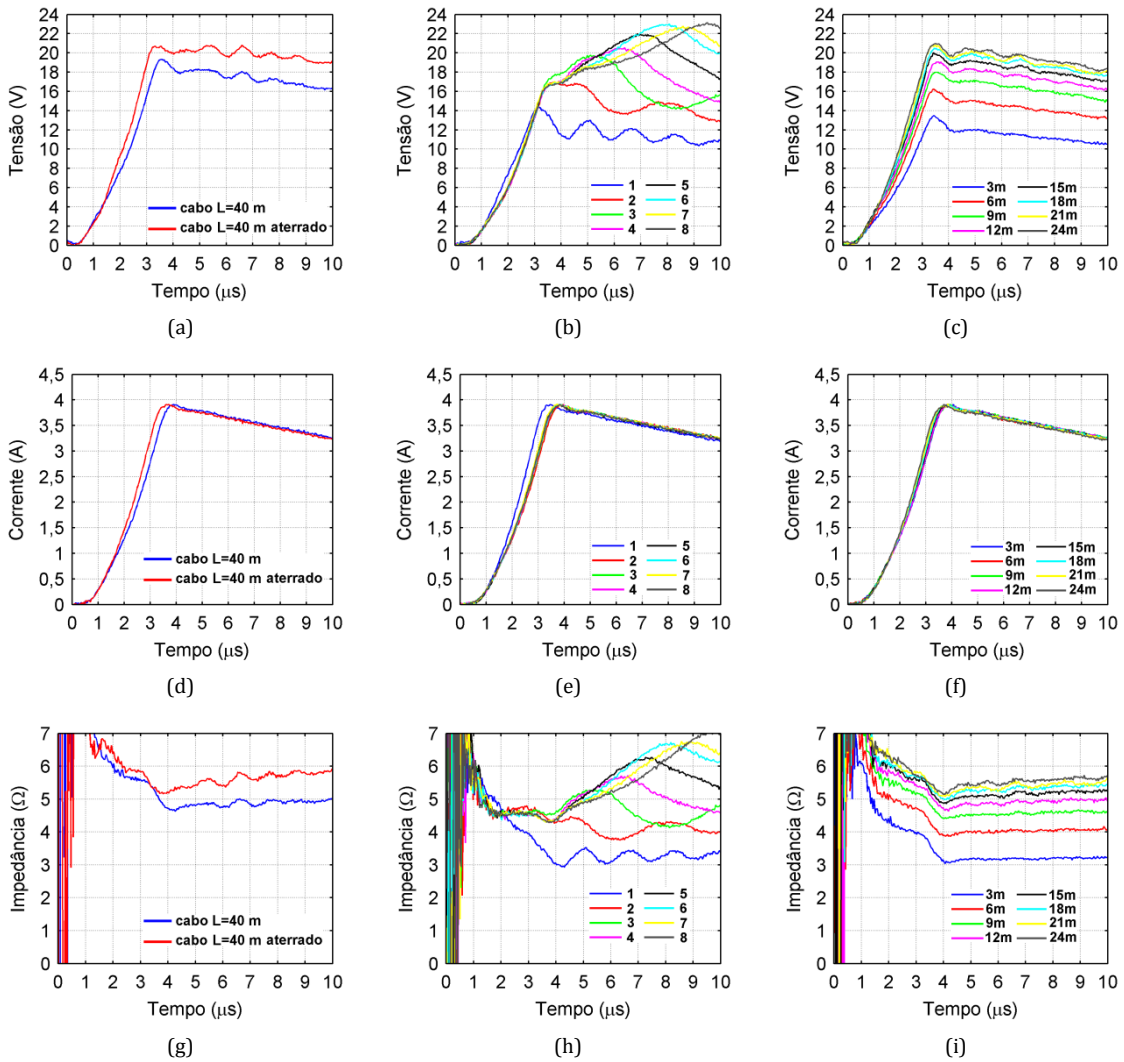


Figura 5.23 – Medições de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) usando no circuito de tensão: cabos comuns de 40 m de comprimento em aberto ou aterrado (esquerda), 1-8 unidades de ATL aterradas (centro) ou cabos comuns aterrados de 3-24 m de comprimento (direita), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspensão e aterrado. Valor de $R_{BF} = 9,6 \Omega$ e $\rho_A = 200 \Omega m$ estimado a partir do valor de R_{BF} .

Na Tabela 5.19 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 40 m aterrado), para um cabo de 40 m em aberto, para 1-8 unidades de ATL aterradas e para cabos curtos de 3-24 m aterrados. Verifica-se em termos de Z_p

diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) consideráveis na faixa de aproximadamente 15-30% ao se utilizar 1-8 unidades de ATL e de aproximadamente 36% ao se utilizar um cabo curto de 3 m. Entretanto, para cabos a partir de 12 m as diferenças percentuais foram pequenas, tornando-se nulas para cabos de 21 m e de 24 m.

Tabela 5.19 – Valores de pico de GPR, de pico de corrente e de impedância impulsiva usando no circuito de tensão: unidades de ATL aterradas (1-8), cabos comuns aterrados (3-24 m de comprimento) ou cabo comum em aberto (40 m de comprimento), para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspenso e aterrado. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo comum aterrado de 40 m de comprimento.

Conductor de Tensão		Parâmetros Impulsivos						Diferença Percentual de Z_P (%)	
		V_P (V)		I_P (A)		Z_P (Ω)			
1 unid.	3 m	14,33	13,44	3,91	3,91	3,7	3,4	-30,2	-35,8
2 unid.	6 m	16,93	16,24	3,91	3,91	4,3	4,2	-18,9	-20,8
3 unid.	9 m	17,68	17,99	3,91	3,91	4,5	4,6	-15,1	-13,2
4 unid.	12 m	16,85	19,04	3,91	3,91	4,3	4,9	-18,9	-7,5
5 unid.	15 m	16,85	20,04	3,91	3,91	4,3	5,1	-18,9	-3,8
6 unid.	18 m	16,85	20,48	3,91	3,91	4,3	5,2	-18,9	-1,9
7 unid.	21 m	16,85	20,82	3,91	3,91	4,3	5,3	-18,9	0
8 unid.	24 m	16,85	20,99	3,91	3,91	4,3	5,3	-18,9	0
40 m		19,31		3,91		4,9		-7,5	
40 m aterrado		20,71		3,91		5,3		-	

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência, cabo de 40 m aterrado (Figura 5.23 (g)), atingiu um patamar constante de aproximadamente $5,9 \Omega$, valor 39% inferior ao de $R_{BF} = 9,6 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para o cabo de 40 m em aberto, o patamar foi de aproximadamente 5Ω . As curvas de $z(t)$ utilizando 1-8 unidades de ATL (Figura 5.23 (h)) apresentam oscilações significativas nas curvas de impedância, não se verificando a existência de um patamar para a janela de tempo de $10 \mu s$. Para os cabos curtos (Figura 5.23 (i)), verifica-se a existência de patamares para todos os comprimentos na faixa de 3-24 m, de aproximadamente $3,3 \Omega$, 4Ω , $4,6 \Omega$, 5Ω , $5,2 \Omega$, $5,4 \Omega$, $5,5 \Omega$ e $5,7 \Omega$, respectivamente.

Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de 100 μs , verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL ou cabos curtos de mesmo comprimento das unidades convergem para valores próximos, como mostrado na Figura 5.24 (b, c). Porém, tais valores ainda estão bem abaixo do $R_{BF} = 9,6 \Omega$. Nem mesmo ao se utilizar os cabos de 40 m foi possível obter um valor próximo do R_{BF} , como mostrado na Figura 5.24 (a).

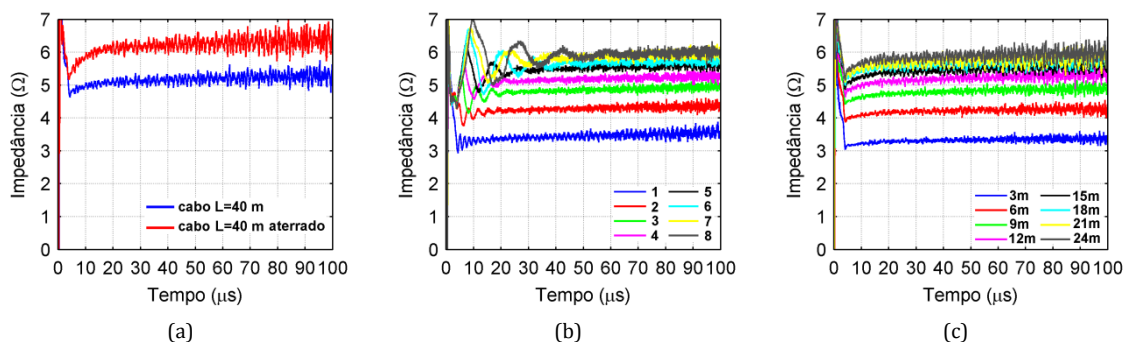


Figura 5.24 – Medições de $z(t)$ usando no circuito de tensão: (a) cabos comuns de 40 m de comprimento em aberto ou aterrado, (b) 1-8 unidades de ATL aterradas, (c) cabos comuns aterrados de 3-40 m de comprimento, para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu\text{s}$. Janela de 100 μs .

A Figura 5.25 apresenta as ondas de GPR (a, b, c), de corrente (d, e, f) e de $z(t)$ (g, h, i) medidas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$ utilizando quatro tipos de condutores diferentes no circuito de tensão: cabo longo de 40 m (aterrado (referência)), cabo longo de 40 m (em aberto), 1-8 unidades de ATL (aterradas) e cabos curtos de 3-24 m. No circuito de corrente é utilizado um cabo longo de 130 m (suspensão e aterrado).

Conclusões semelhantes com relação aos sinais espúrios relatados na seção 5.2.2.1 também são válidas aqui.

Para a onda injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$, o uso do cabo longo de 40 m em aberto promove uma pequena mudança apenas no valor de pico de tensão ($\sim 3\%$) em relação ao uso do cabo aterrado de mesmo comprimento, como mostrado na Figura 5.25 (a, d), ou inferido através da Tabela 5.20. Como efeito final, o valor de Z_P diminui de aproximadamente 3% quando o cabo de 40 m está em aberto.

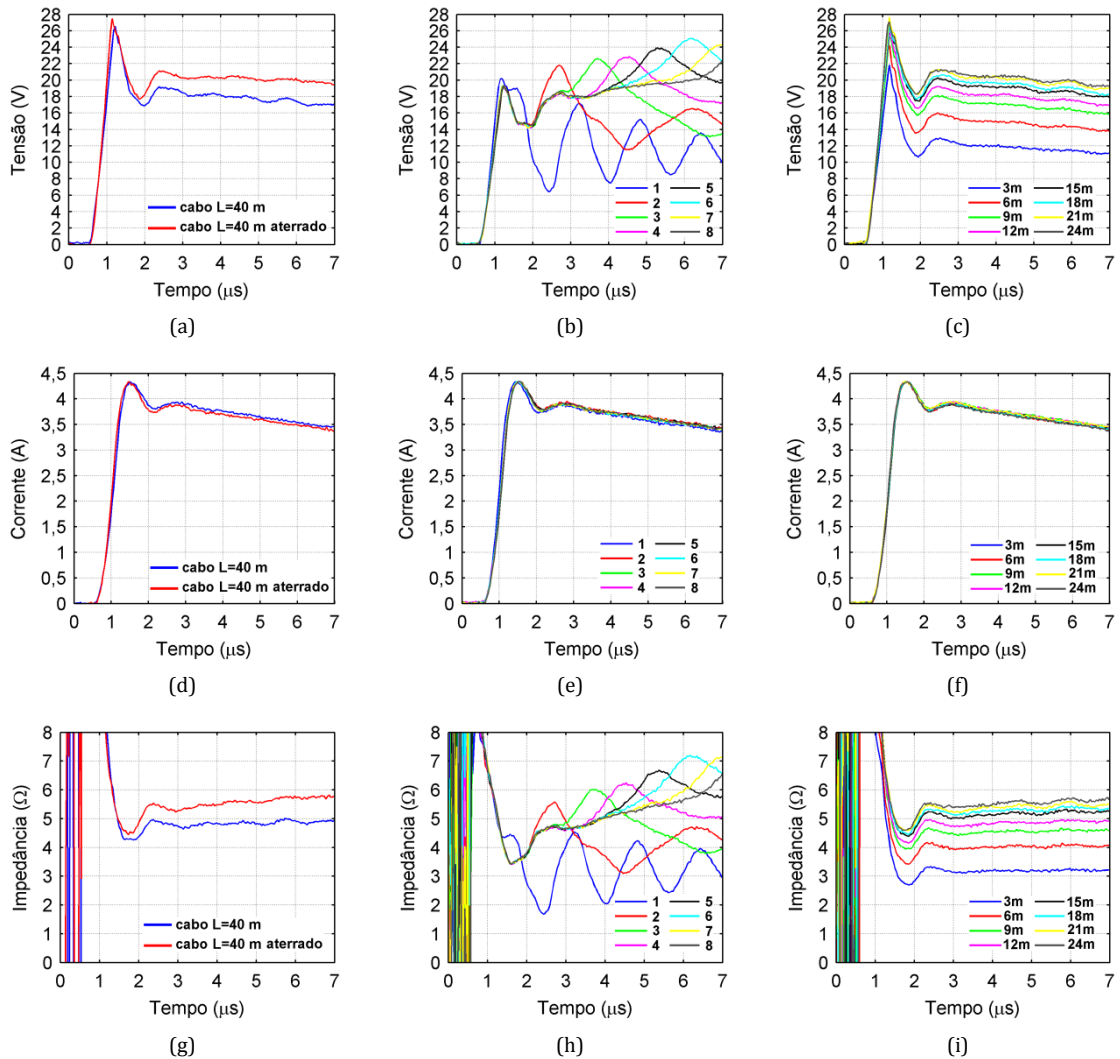


Figura 5.25 – Idem à Figura 5.23, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$.

Verifica-se pela Figura 5.25 (c) que as reflexões nas formas de onda de GPR ao se utilizar cabos de 6-24 m de comprimento ocorrem em tempos muito próximos e influenciam no valor da amplitude do sinal.

Como era de se esperar, as formas de onda de corrente mostradas nas Figura 5.25 (d, e, f) são idênticas para qualquer condutor utilizado no circuito de tensão, pois as medições de corrente e de GPR são independentes e o mesmo cabo condutor de 130 m (suspenso e aterrado) foi utilizado no circuito de corrente.

Na Tabela 5.20 são mostrados os valores de pico de GPR, de pico de corrente injetada e de impedância impulsiva para o arranjo de referência (cabo de 40 m aterrado), para um cabo de 40 m em aberto, para 1-8 unidades de ATL e para

cabos curtos de 3-24 m. Verifica-se em termos de Z_P diferenças percentuais (em relação ao arranjo de referência) consideráveis na faixa de aproximadamente 25-30% ao se utilizar 1-8 unidades de ATL e de aproximadamente 20% ao se utilizar um cabo curto de 3 m. Entretanto, para cabos a partir de 12 m as diferenças percentuais foram pequenas, tornando-se nula para o cabo de 24 m.

Tabela 5.20 – Idem à Tabela 5.19, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

Condutor de Tensão		Parâmetros Impulsivos						Diferença Percentual de Z_P (%)	
		V_P (V)		I_P (A)		Z_P (Ω)			
1 unid.	3 m	20,20	21,87	4,34	4,34	4,7	5,0	-25,4	-20,6
2 unid.	6 m	19,22	24,26	4,34	4,34	4,4	5,6	-30,1	-11,1
3 unid.	9 m	19,21	25,14	4,34	4,34	4,4	5,8	-30,1	-7,9
4 unid.	12 m	19,26	25,85	4,34	4,34	4,4	6,0	-30,1	-4,8
5 unid.	15 m	19,29	26,52	4,34	4,34	4,4	6,1	-30,1	-3,2
6 unid.	18 m	19,39	26,70	4,34	4,34	4,5	6,2	-28,6	-1,6
7 unid.	21 m	19,35	27,66	4,34	4,34	4,5	6,4	-28,6	1,6
8 unid.	24 m	19,31	27,11	4,34	4,34	4,5	6,3	-28,6	0
40 m		26,55		4,34		6,1		-3,2	
40 m aterrado		27,48		4,34		6,3		-	

A curva de $z(t)$ para o arranjo de referência, cabo de 40 m aterrado (Figura 5.25 (g)), atingiu um patamar constante de aproximadamente $5,8 \Omega$, valor 40% inferior ao de $R_{BF} = 9,6 \Omega$ obtido pelo medidor comercial de resistência de aterramento. Para o cabo de 40 m em aberto, o patamar foi de aproximadamente $4,9 \Omega$. As curvas de $z(t)$ utilizando 1-8 unidades de ATL (Figura 5.25 (h)) apresentam oscilações significativas nas curvas de impedância, não se verificando a existência de um patamar para a janela de tempo de $7 \mu s$. Para os cabos curtos (Figura 5.25 (i)), verifica-se a existência de patamares para todos os comprimentos na faixa de 3-24 m, de aproximadamente $3,2 \Omega$, 4Ω , $4,6 \Omega$, $4,9 \Omega$, $5,2 \Omega$, $5,4 \Omega$, $5,5 \Omega$ e $5,7 \Omega$, respectivamente.

Entretanto, ao se tomar uma janela de tempo de $100 \mu s$, verifica-se que as curvas de $z(t)$ utilizando unidades de ATL ou cabos curtos de mesmo comprimento das unidades convergem para valores próximos, como mostrado na

Figura 5.26 (b, c). Porém, tais valores ainda estão bem abaixo do $R_{BF} = 9,6 \Omega$. Nem mesmo ao se utilizar os cabos de 40 m foi possível obter um valor próximo do R_{BF} , como mostrado na Figura 5.26 (a).

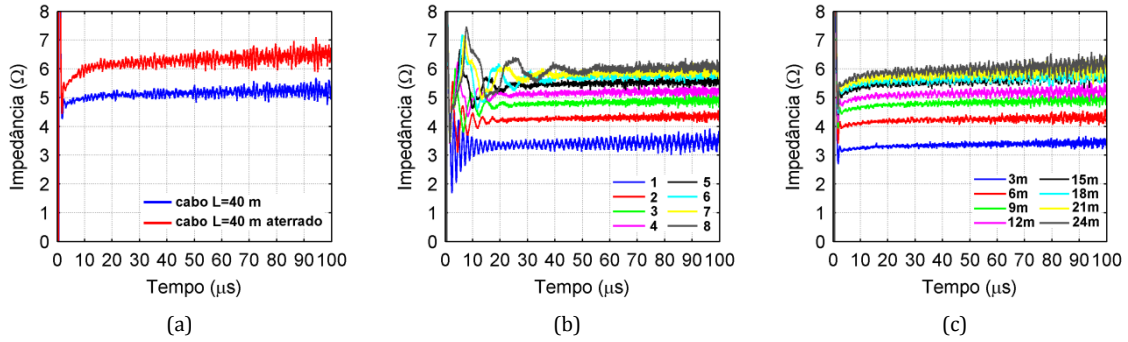


Figura 5.26 – Idem à Figura 5.24, mas para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$.

5.3 Resultados Experimentais Relativos à Medição da Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

Os resultados apresentados nesta seção objetivam avaliar o efeito da inserção de resistores em série no circuito de corrente, simulando a presença da resistência de aterramento das hastes auxiliares de retorno de corrente. Notadamente quando os valores desta resistência são elevados em decorrência da dimensão reduzida dos eletrodos auxiliares ou devido à resistividade elevada do solo, a corrente circulante pode se tornar muito reduzida, prejudicando o funcionamento dos instrumentos de medição e, por conseguinte, os resultados providos por estes. Isto motivou a variação do valor do resistor R_{serie} inserido na faixa de 0 a 40 k Ω .

O uso do gerador com tensão de saída da ordem de 400 V, muito superior aos valores dos instrumentos comerciais (na faixa de aproximadamente 0,5 a 10 V), busca alcançar medições confiáveis para comparação com aqueles dos instrumentos comerciais.

Para minimizar o efeito causado nas ondas de GPR devido à presença de um sinal espúrio com componentes de frequência na ordem de 1 MHz, cada curva apresentada nesta seção é constituída pela média aritmética de três medições ao serem injetadas as mesmas correntes em cada um dos aterramentos.

5.3.1 Resultados para o Aterramento Concentrado

Para aplicação do gerador de ondas senoidais, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.10 para medição das ondas de GPR e de corrente, mostradas na Figura 5.27. Os valores de R_{BF} são dados pela razão dos valores de pico de GPR e corrente, sendo exibidos na Tabela 5.21

Para aplicação dos medidores comerciais de resistência de aterramento, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.11. Os valores

de R_{BF} são obtidos pela leitura fornecida pelos próprios aparelhos, sendo exibidos na Tabela 5.21.

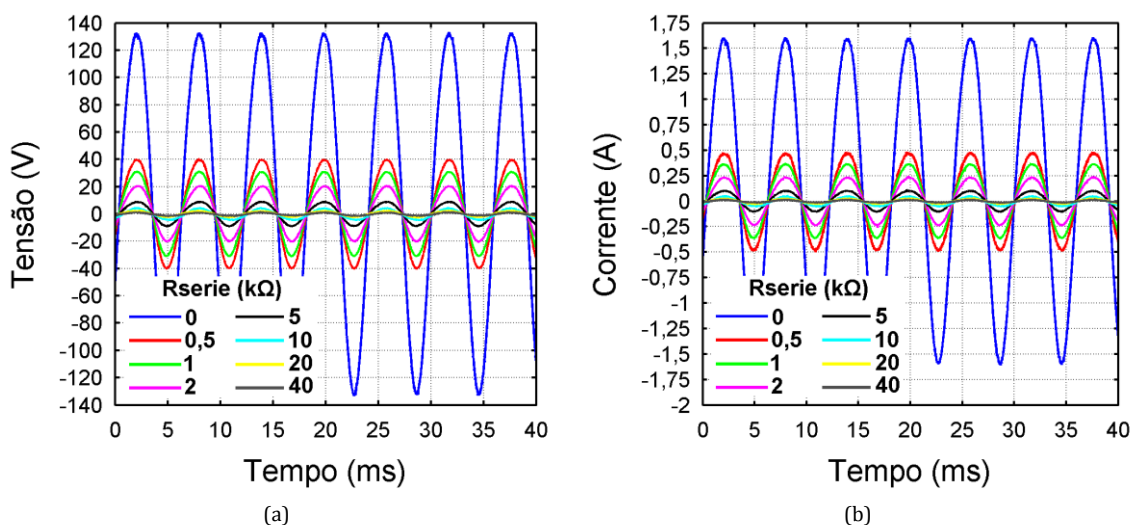


Figura 5.27 – Medições de GPR (a) e de corrente (b) usando um cabo comum de 25 m de comprimento aterrado por uma haste no circuito de tensão e um cabo comum de 40 m de comprimento aterrado por três hastes no circuito de corrente. Ondas obtidas utilizando-se um gerador de ondas senoidais. Resistores de valores diversos (0-40 kΩ) são inseridos em série no circuito de corrente.

Tabela 5.21 – Valores de resistência de aterramento obtidos ao serem introduzidos resistores em série (0-40 kΩ) no circuito de corrente utilizando o gerador de ondas senoidais, o gerador de ondas impulsivas e os medidores comerciais. Para o gerador impulsivo são mostrados ainda os valores de impedância impulsiva.

R_{serie} (kΩ)	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		R_{BF} (Ω)				R_{BF} (Ω)		Z_P (Ω)	
		A	B	C	D	$T_F=6\mu s$	$T_F=1,3\mu s$	$T_F=6\mu s$	$T_F=1,3\mu s$
0	83	77,3	78	78,4	83,8	73,9	72,9	66,8	62,3
0,5	83,9	77,8	78,9	78,4	77,8	75,2	73	67	62,7
1	84,6	77,8	79,9	78,4	77,8	71,6	70,8	65,7	62,1
2	86,6	77,9	81,7	78,4	71,8	69,6	70,7	65	63,1
5	86,3	77,9	87,8	78,4	59,8	77,6	78,4	69,5	67,6
10	85,4	78	97,9	78,4	47,9	80,3	81,9	71,9	66,7
20	85	77,8	117,3	78,4	26,3	82	83,2	72,5	58,6
40	82,5	78	156,3	78,4	12	93,8	103,7	81,3	61,4

Para aplicação do gerador impulsivo, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.3, porém sendo inseridos resistores em série no circuito de corrente. As medições das ondas de GPR e de corrente são mostradas na Figura 5.28. Os valores de R_{BF} são dados pela média da razão entre os valores instantâneos de GPR e de corrente entre os instantes de 80-100 μs (na região da

cauda das formas de onda). Os valores de Z_p são dados pela razão dos valores de pico de GPR e de corrente. Ambos são exibidos na Tabela 5.21.

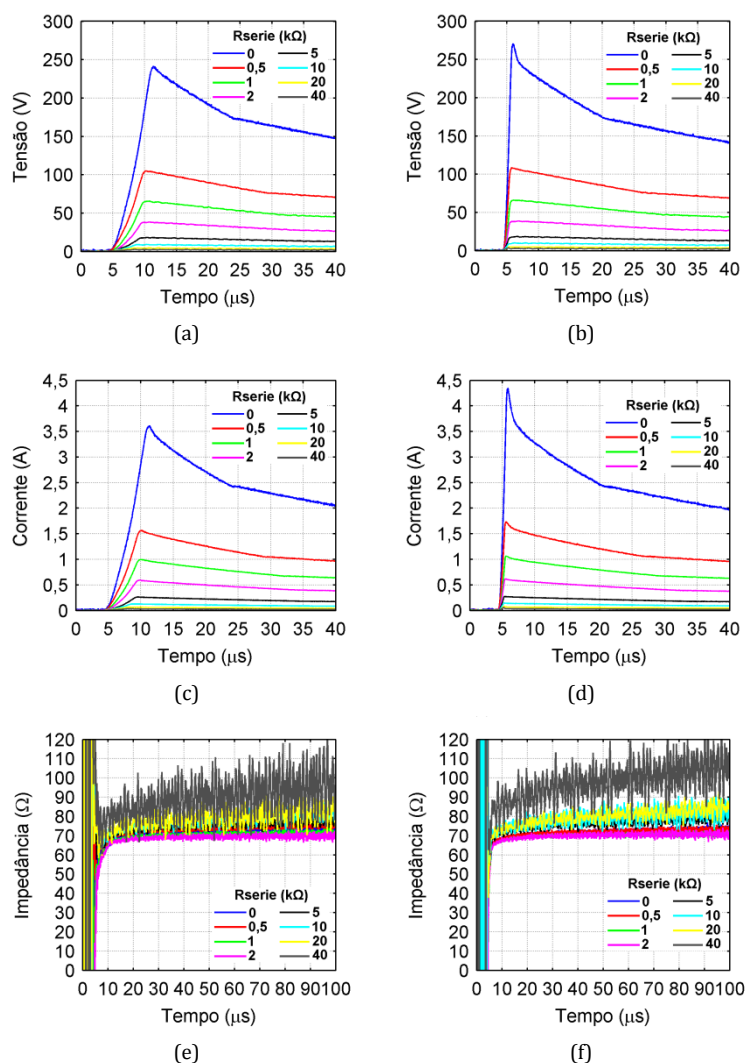


Figura 5.28 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando um cabo comum de 25 m de comprimento aterrado por uma haste no circuito de tensão e um cabo comum de 40 m de comprimento aterrado por três hastes no circuito de corrente. As figuras (a, c, e) são referentes ao gerador impulsivo utilizando $T_F = 6 \mu s$ e as figuras (b, d, f) ao gerador impulsivo utilizando $T_F = 1,3 \mu s$. Resistores de valores diversos (0-40 kΩ) são inseridos em série no circuito de corrente.

5.3.2 Resultados para o Aterramento Constituído de Cabos

Contrapeso (Modelo em Escala Semirreal)

Para aplicação do gerador de ondas senoidais, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.12 para medição das ondas de GPR e

de corrente, mostradas na Figura 5.29. Os valores de R_{BF} são dados pela razão dos valores de pico de GPR e corrente, sendo exibidos na Tabela 5.22.

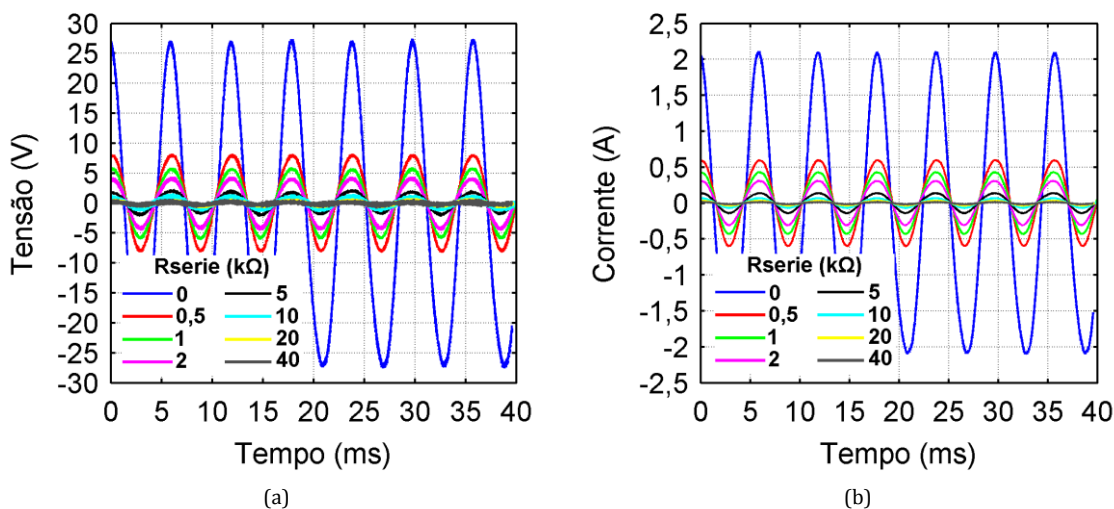


Figura 5.29 – Medições de GPR (a) e de corrente (b) usando um cabo comum de 40 m de comprimento aterrado por uma haste no circuito de tensão e um cabo comum de 130 m de comprimento aterrado por seis hastes no circuito de corrente. Ondas obtidas utilizando-se um gerador de ondas senoidais. Resistores de valores diversos (0-40 kΩ) são inseridos em série no circuito de corrente.

Tabela 5.22 – Valores de resistência de aterramento obtidos ao serem introduzidos resistores em série (0-40 kΩ) no circuito de corrente utilizando o gerador de ondas senoidais, o gerador de ondas impulsivas e os medidores comerciais. Para o gerador impulsivo são mostrados ainda os valores de impedância impulsiva.

R_{serie} (kΩ)	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		R_{BF} (Ω)				R_{BF} (Ω)		Z_P (Ω)	
		A	B	C	D	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$
0	13	15,1	17,6	15,4	14,3	13,1	13,2	10,1	8,8
0,5	13,3	15	22,7	15,4	11	12,9	12,9	10,4	9,5
1	13,3	15,1	26,5	15,4	11	13,2	12,9	10,8	9,7
2	13,3	15,1	33,6	15,4	11	12,6	12,6	10,7	10,3
5	13,6	15,3	55,7	15,4	11	11,9	11,4	11,8	10,1
10	13,8	15,8	90,3	15,4	13,2	12,3	12,2	13,6	10,5
20	13,7	16,2	161,1	15,4	11	11,9	12,8	14,2	9,8
40	13,8	17,4	318,6	15,4	13,2	12,3	7,7	16,9	9,2

Para aplicação dos medidores comerciais de resistência de aterramento, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.13. Os valores de R_{BF} são obtidos pela leitura fornecida pelos próprios aparelhos, sendo exibidos na Tabela 5.22.

Para aplicação do gerador impulsivo, foi realizado um arranjo experimental conforme mostrado na Figura 4.4, porém sendo inseridos resistores em série no circuito de corrente. As medições das ondas de GPR e de corrente são mostradas na Figura 5.30. Os valores de R_{BF} são dados pela média da razão entre os valores instantâneos de GPR e de corrente entre os instantes de 80-100 μs . Os valores de Z_P são dados pela razão dos valores de pico de GPR e de corrente. Ambos são exibidos na Tabela 5.22.

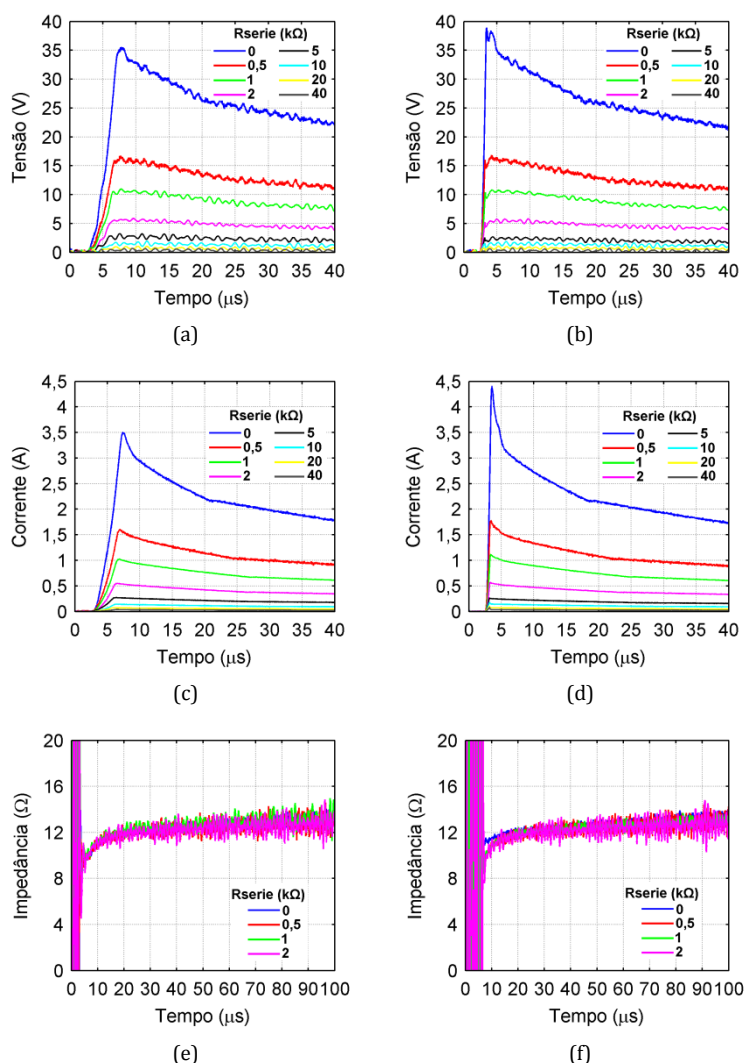


Figura 5.30 – Medições de GPR (a, b), de corrente (c, d) e de $z(t)$ (e, f) usando um cabo comum de 25 m de comprimento aterrado por uma haste no circuito de tensão e um cabo comum de 60 m de comprimento aterrado por três hastes no circuito de corrente. As figuras (a, c, e) são referentes ao gerador impulsivo utilizando $T_F = 4,5\mu\text{s}$ e as figuras (b, d, f) ao gerador impulsivo utilizando $T_F = 0,9\mu\text{s}$. Resistores de valores diversos (0-40 k Ω) são inseridos em série no circuito de corrente.

6 **Análise dos Resultados Para Fins de Aplicação Prática**

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são feitas a síntese e a análise principal dos resultados apresentados no Capítulo 5 focadas em aspectos de aplicação prática. Na seção 6.2 são realizadas análises relativas aos procedimentos de medição utilizados como referência nesta dissertação. A seção 6.3 apresenta a análise do uso das unidades de ATL nos circuitos de corrente e de tensão. Na seção 6.4 é feita uma análise dos resultados obtidos com relação à medição de R_{BF} .

6.2 Análises Relativas aos Procedimentos de Medição

Utilizados Como Referência

6.2.1 Interferência do Aterramento no Cabo do Circuito de Corrente

Para verificar o possível efeito de tensões induzidas no circuito de corrente devido ao fluxo de corrente pelos eletrodos do aterramento composto por cabos contrapeso, foram realizadas medições em que o cabo do circuito de corrente era mantido diretamente sobre o solo e suspenso a altura de aproximadamente 2 m.

As Figuras 6.1 e 6.2 mostram as ondas de GPR e correspondentes correntes impressas nos cabos contrapeso para o mesmo tipo de ensaio (cabo de corrente diretamente sobre o solo e suspenso), mas realizados em dias diferentes.

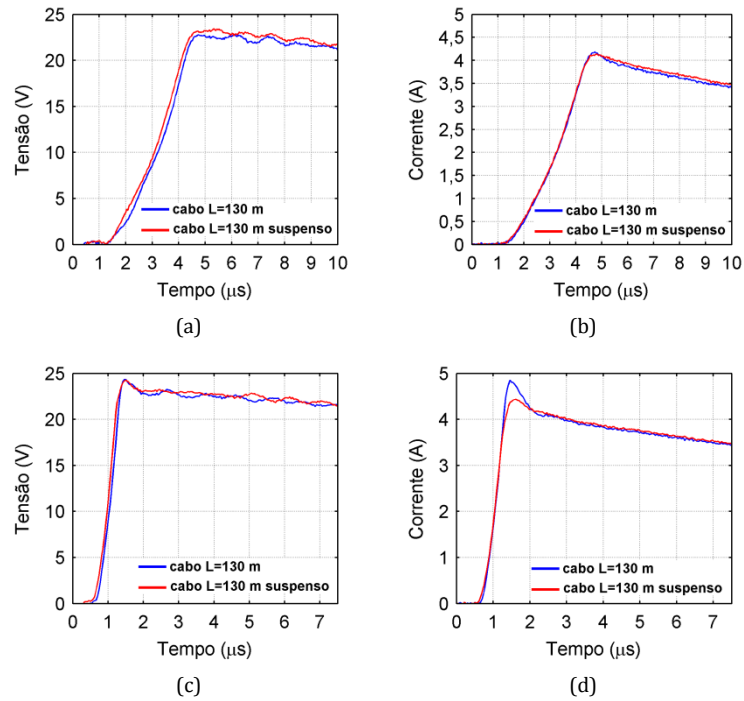


Figura 6.1 – Efeito de tensões induzidas no cabo de corrente de 130 m pelas correntes nos cabos contrapeso. GPR e corrente no aterramento. $T_F = 3,5 \mu\text{s}$ (a, b) e $T_F = 0,9 \mu\text{s}$ (c, d). Ensaio 07 ($\rho_A = 212 \Omega\text{m}$).

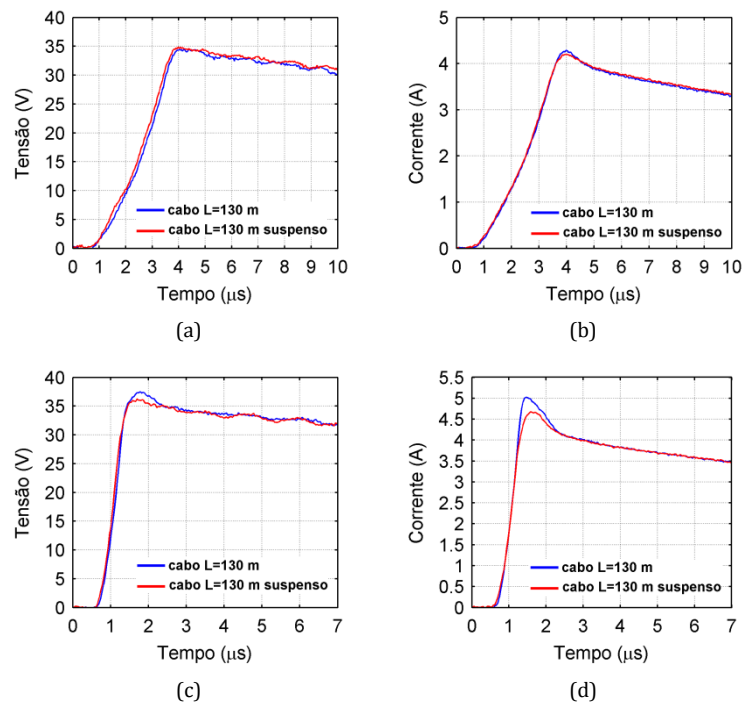


Figura 6.2 – Efeito de tensões induzidas no cabo de corrente de 130 m pelas correntes nos cabos contrapeso. GPR e corrente no aterramento. $T_F = 3,5 \mu\text{s}$ (a, b) e $T_F = 0,9 \mu\text{s}$ (c, d). Ensaio 08 ($\rho_A = 283 \Omega\text{m}$).

Tomando como referência os resultados para a condição de cabo suspenso, verificou-se:

- Nos dois casos, para correntes de tempo de frente típicos de primeiras descargas, observa-se redução relativa da ordem de 4% no valor do GPR para o cabo diretamente sobre solo (atribuída à interferência dos eletrodos de corrente), e correspondente redução de Z_p .
- Resultados similares são observados para correntes de tempos de frente típicos de descargas subsequentes. A dispersão dos valores é um pouco maior (de 3,6% a 8%) devido aos efeitos do sinal espúrio na faixa de 1 MHz presente no solo, que tem valor próximo a frequências relevantes para a onda de corrente em questão.

Como conclusão, verifica-se que o uso do condutor do circuito de corrente diretamente no solo seria aceitável em aplicações práticas. Nesta dissertação, todos os resultados apresentados para o aterramento composto por cabos contrapeso foram desenvolvidos para as duas situações (de cabos do circuito de corrente diretamente sobre o solo e suspenso 2 m do solo), sendo o cabo suspenso utilizado como referência. Nota-se que nos ensaios do aterramento concentrado, os cabos de corrente foram colocados apenas diretamente sobre o solo.

6.2.2 Avaliação do Uso do Cabo do Circuito de Tensão em Aberto

Um aspecto que se desejava avaliar era a possibilidade de não aterrar a extremidade do circuito de medição do GPR, deixando-a em aberto a uma distância do arranjo de eletrodo na qual já se encontrava o terra remoto. Para verificar tal aspecto, apenas no caso do arranjo com cabos contrapeso, foram realizadas medições em que o cabo de medição de potencial era mantido ora aterrado por uma haste em sua extremidade e ora em aberto.

Verificou-se por medição que para a impressão das ondas impulsivas de corrente, o terra remoto já era alcançado à distância de 40 m a partir do centro da configuração do aterramento.

Por outro lado, como mostra a Figura 6.3, desenvolvida por simulação com o programa ProLater, verifica-se que em condições de baixa frequência, na posição de 40 m resta ainda parcela de tensão da ordem de 10% em relação ao GPR. Na posição 50 m, esta parcela se reduz a 8,7%, ou seja, uma diferença de apenas 1,3% em relação à posição de 40 m.

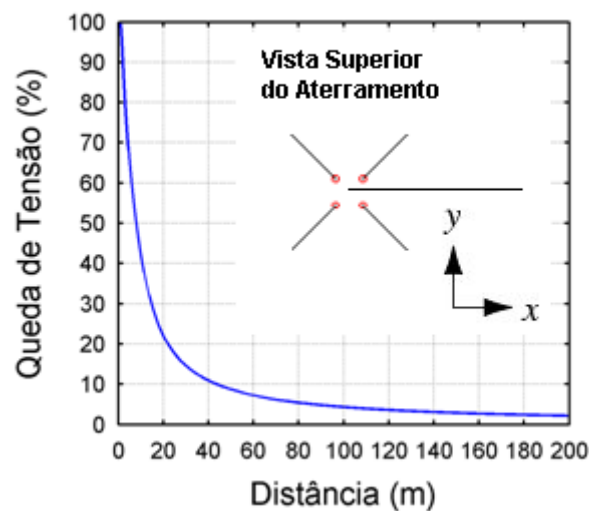


Figura 6.3 – Simulação da queda de tensão percentual no aterramento composto por cabos contrapeso obtida através do programa ProLater. A direção escolhida é a indicada pelo eixo x, na qual o centro da configuração de aterramento está posicionado em $x = 0$ m.

As Figuras 6.4 e 6.5 mostram as ondas de GPR e correspondentes correntes impressas nos cabos contrapeso para o mesmo tipo de ensaio (cabo de tensão aterrado e em aberto), mas realizados em dias diferentes.

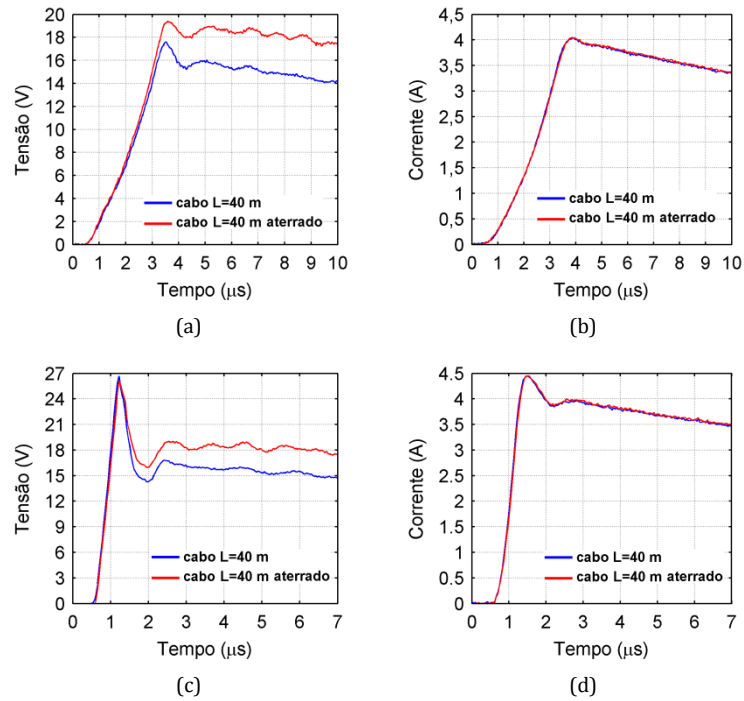


Figura 6.4 – Medições de GPR e de corrente no aterramento composto por cabos contrapeso ao serem injetadas correntes de $T_F = 3,5 \mu s$ (a, b) e de $T_F = 0,9 \mu s$ (c, d), respectivamente. Ensaio 09 ($\rho_A = 160 \Omega m$).

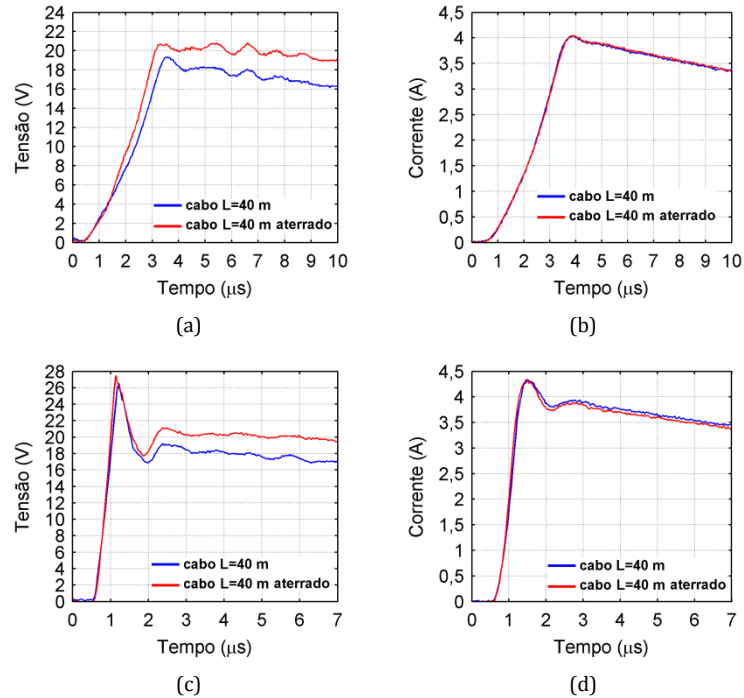


Figura 6.5 – Medições de GPR e de corrente no aterramento composto por cabos contrapeso ao serem injetadas correntes de $T_F = 3,5 \mu s$ (a, b) e de $T_F = 0,9 \mu s$ (c, d), respectivamente. Ensaio 10 ($\rho_A = 200 \Omega m$).

As duas figuras anteriores mostram que:

- Nos dois casos, para correntes de tempo de frente típicos de primeiras descargas, observa-se redução relativa da ordem de 9% no valor do GPR para o cabo de tensão em aberto, e correspondente redução de Z_P .
- Para o caso das correntes de tempos de frente típicos de descargas subsequentes, observa-se que os resultados de GPR com condutor em aberto e aterrado são muito semelhantes (diferenças em Z_P de +2% e -3%). Acredita-se que, nesse caso, possa se considerar que os resultados sejam iguais e que a oscilação nas variações seja devido aos efeitos dos sinais espúrios no solo.

Nota-se nas curvas de GPR das figuras anteriores que, na cauda das ondas, as diferenças de amplitude tendem a crescer, superando a ordem de 10%, que consiste na parcela do GPR restante para o terra remoto à distância de 40 m do centro dos eletrodos, como mostra a Figura 6.3.

Os resultados sugerem a possibilidade de uso do condutor de medição de potencial em aberto para ondas com tempos de frente típicos de descargas subsequentes, mas a impropriedade deste uso para ondas com tempos de frente típicos de primeiras descargas (variação de Z_P da ordem de 10%).

Nesta dissertação, todos os resultados apresentados para o aterramento composto por cabos contrapeso mostram as duas situações (cabos no circuito de tensão aterrado e em aberto), sendo o cabo aterrado utilizado como referência.

No caso do aterramento concentrado, foi sempre utilizado um cabo de 25 m aterrado.

6.3 Avaliações Relativas ao Uso das Unidades de ATL

Nesta seção verifica-se a potencialidade de uso das unidades de ATL para estimativa de Z_P e de R_{BF} , o que motivou seu desmembramento em avaliações relativas à resposta impulsiva e em baixa frequência dos arranjos de aterramento concentrado e composto por cabos contrapeso, consideradas a seguir.

6.3.1 Análise da Resposta Impulsiva

6.3.1.1 Uso de Unidades de ATL no Circuito de Corrente

Em princípio, o uso de unidades de ATL teria potencial para reduzir drasticamente as distâncias requeridas para o condutor de corrente na medição de impedância (ou resistência estimada) de aterramento de cabos contrapeso em LTs.

Entretanto, a aplicação destas requer a necessidade de se avaliar a forma do seu emprego, em termos da condição de sua extremidade distante: conectada ao solo por hastes auxiliares de corrente ou em aberto. Cada condição tem implicações diferentes.

O uso de unidades de ATL com extremidade em aberto promove uma modificação muito significativa da onda de corrente impressa no solo em relação àquela que seria impressa no caso de uma condição de referência com os eletrodos auxiliares de correntes posicionados a distâncias muito elevadas, condição requerida para evitar o acoplamento desses eletrodos com os do aterramento em medição. A onda de corrente refletida na extremidade tem sinal negativo e é responsável pela brusca redução da amplitude da onda de corrente impressa no solo na região próxima ao pico, resultando numa forma de onda que preserva apenas a frente da onda típica de descargas naturais. A Figura 6.6 (a) ilustra tal comportamento para o caso do arranjo de eletrodos em cabos contrapeso.

Por outro lado, no caso de eletrodos longos como os típicos de LTs, a opção por aterrar a extremidade, resulta no posicionamento da haste (ou hastes) auxiliar de corrente próximo ao eletrodo em teste, ainda na região de influência do eletrodo em medição devido ao comprimento curto das unidades. Isto resulta em

significativo acoplamento entre este e a haste auxiliar de corrente, que afeta a medição da sua impedância de aterramento.

Adicionalmente, verifica-se que o simples aterramento da extremidade das unidades de ATL não constitui prática facilitadora, pois implica dificuldades na medição decorrentes das reflexões positivas da onda de corrente no ponto de aterramento. As sucessivas reflexões também alteram o formato da onda impressa, com brusco aumento da sua amplitude, que chega a inviabilizar a identificação dos picos de corrente. Esta identificação é requerida para a determinação da impedância impulsiva de aterramento. A Figura 6.6 (b) ilustra tal aspecto para o caso do arranjo que utiliza cabos contrapeso.

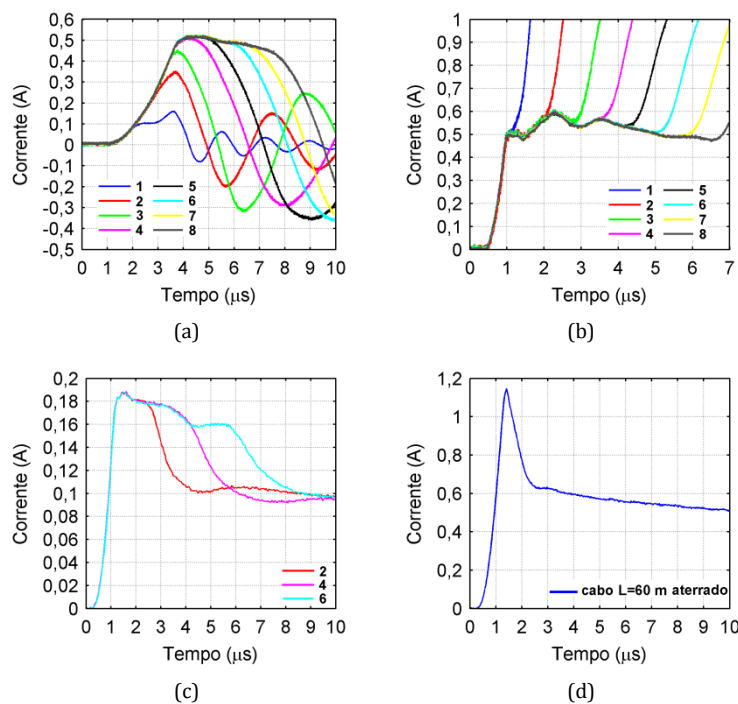


Figura 6.6 – Modificações da forma de onda de corrente impressa ao aterramento em função da prática de conexão ou não ao solo da extremidade das unidades: (a) aberto - caso cabo contrapeso; (b) aterramento direto da extremidade por meio de haste auxiliar de corrente - caso cabo contrapeso; (c) acréscimo de resistores entre tais unidades e a haste auxiliar de corrente - caso do aterramento concentrado; (d) corrente no caso de referência com aterramento auxiliar distante conectado a condutor convencional de corrente. $T_F \cong 1 \mu\text{s}$.

A Figura 6.6 (c) ilustra o resultado de uma prática que busca minimizar o efeito das reflexões positivas aplicada ao aterramento concentrado: a realização de um casamento aproximado entre as impedâncias das unidades de ATL e da terminação para a terra, por meio do acréscimo de resistores entre a extremidade das unidades e a haste auxiliar de corrente, uma abordagem de tentativa e erro.

A Figura 6.7 mostra resultados de medição (GPR e corrente impressa) dos arranjos concentrado - (a) a (d) - e com cabos contrapeso - (e) a (h) -, quando se emprega extremidade das unidades de ATL em aberto.

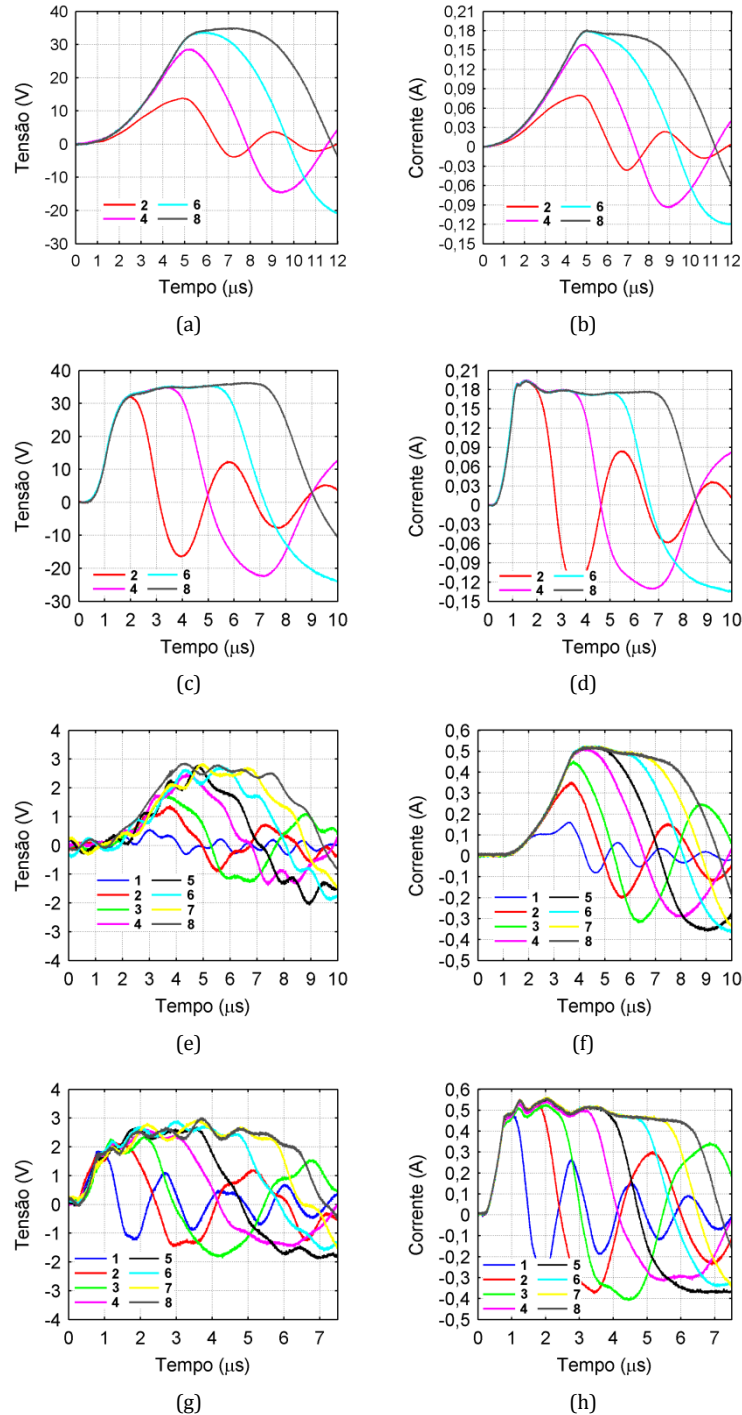


Figura 6.7 – Medições de GPR e de corrente usando unidades de ATL em aberto no circuito de corrente. Para o aterramento concentrado: corrente injetada de $T_F = 5 \mu s$ (a, b) e corrente injetada de $T_F = 1 \mu s$ (c, d), Ensaio 01 ($\rho_A = 620 \Omega m$). Para o aterramento composto por cabos contrapeso: corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu s$ (e, f) e corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu s$ (g, h), Ensaio 07 ($\rho_A = 212 \Omega m$).

Note a semelhança das formas de onda de corrente nos dois casos e a presença de fortes oscilações nas ondas de GPR no caso do arranjo composto por cabos contrapeso. Tais oscilações decorrem do sinal espúrio na faixa de 1 MHz presente no solo e só afeta a onda de GPR do arranjo de cabos contrapeso por este ter uma amplitude muito inferior (cerca de 10 vezes menor), em decorrência da menor impedância de aterramento do arranjo.

As modificações na forma de onda de corrente dificultam sobremaneira a determinação de Z_P do aterramento, em relação àquela determinada para a medição de referência com ondas representativas de correntes de descargas primeira e subsequente.

Nas Tabelas 6.1 e 6.2, baseadas nos resultados das tabelas do Capítulo 5, avaliam-se os erros nos valores estimados de Z_P para correntes de tempos de frente típicos de primeiras descargas.

Tabela 6.1 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.3 relativos ao aterramento concentrado. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_P (Ω)	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente		
2	174	-6,4
4	180	-3,2
6	188	1,1
8	195	4,8
60 m	186	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente (com casamento de Impedância)		
2	207	1,5
4	206	1,0
6	203	-0,5
60 m	204	-

Tabela 6.2 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.13 e 5.15 relativos ao aterramento composto por cabos contrapeso. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo suspenso de 130 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_P (Ω)	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente		
1	3,5	-38,6
2	4,0	-29,8
3	3,9	-30,6
4	4,8	-15,8
5	5,3	-7,0
6	5,3	-7,0
7	5,4	-5,3
8	5,4	-5,3
130 m	5,4	-5,3
130 m suspenso	5,7	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente (sem casamento de Impedância)		
1	7,5	-9,6
2	5,3	-36,1
3	7,4	-10,8
4	7,1	-14,5
5	7,0	-15,7
6	7,7	-7,2
7	7,5	-9,6
8	7,7	-7,2
130 m	8,0	-3,6
130 m suspenso	8,3	-

A Tabela 6.1 considera o aterramento concentrado em duas condições de medição: extremidade das unidades de ATL em aberto e aterradas com casamento de impedância.

A Tabela 6.2 considera o arranjo aterramento de cabos contrapeso em duas condições de medição: extremidade das unidades de ATL em aberto e aterradas sem casamento de impedância.

Ao serem impressas ondas de corrente de tempo de frente típico daqueles de primeiras descargas no aterramento concentrado, verificou-se que os erros nos valores estimados de Z_P :

- Têm a ordem de 6 a 5% para a condição de unidades de ATL em aberto.
- Tem valor muito reduzido, na faixa de 1,5% a 0,5% na condição de unidades aterradas na extremidade com casamento de impedância. Vale notar, que os bons resultados, neste caso, foram observados para pontos de eletrodos auxiliares de corrente ainda próximos aos eletrodos do aterramento em teste, em sua região de influência. Este resultado enseja a verificação se tal tipo de efeito (medição com retorno de corrente próximo) permanece para configurações extensas do eletrodo.

Para os resultados do aterramento de arranjo de cabos contrapeso, verificou-se que os erros nos valores estimados de Z_P :

- Para a condição de unidades de ATL em aberto, os erros permanecem muito elevados para número de unidades igual ou inferior a 4, na faixa de 39% a 16%. Entretanto, quando são utilizadas de 5 a 8 unidades os erros decrescem para a faixa de 7% a 5%. Quando se toma como referência a medição com condutor de corrente sobre o solo, este erro cai para a faixa de 2% quando são utilizadas 5 e 6 unidades e se torna nulo para 7 e 8 unidades.
- Para a condição de unidades aterradas, porém sem casamento de impedância, são verificadas diferenças significativas nas estimativas de impedância para um número de unidades inferior a 6, com erros na faixa de 36% a 16%. Para um número de unidades maior que 6, este erro se aproxima de 8% (cerca de 5% se a referência é o condutor colocado no solo).
Entretanto, vale observar que tais resultados foram alcançados com aterramento da extremidade das unidades de ATL sem casamento de

impedância, o que dificulta a determinação da impedância impulsiva, como mostra a Figura 6.7(e, f).

O resultado da página anterior sugere a necessidade de complementar os testes para o aterramento composto por cabos contrapeso com a condição de extremidade das unidades de ATL casadas, para verificação dos erros.

Nas Tabelas 6.3 e 6.4, que refletem resultados das tabelas do Capítulo 5, avaliam-se os erros nos valores estimados de Z_P para correntes de T_F típico de descargas subsequentes.

A primeira tabela considera o aterramento concentrado em duas condições de medição: extremidade das unidades de ATL em aberto e aterradas com casamento de impedância.

Tabela 6.3 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.2 e 5.4 relativos ao aterramento concentrado. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 60 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_P (Ω)	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente		
2	161	10,3
4	175	19,9
6	179	22,6
8	182	24,7
60 m	146	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente (com casamento de Impedância)		
2	190	21,8
4	198	26,9
6	198	26,9
60 m	156	-

A segunda tabela considera o aterramento composto por cabos contrapeso em duas condições de medição: extremidade das unidades de ATL em aberto e aterradas sem casamento de impedância.

Tabela 6.4 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.16 relativos ao aterramento composto por cabos contrapeso. No circuito de tensão é usado um cabo comum aterrado de 40 m. A diferença percentual para todos os condutores de corrente utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo suspenso de 130 m de comprimento.

Conductor de Corrente	$Z_P (\Omega)$	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Corrente		
1	3,8	-30,9
2	3,9	-29,1
3	4,5	-18,2
4	4,8	-12,7
5	4,8	-12,7
6	5,2	-5,4
7	5,3	-3,6
8	5,4	-1,8
130 m	5,0	-9,1
130 m suspenso	5,5	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Corrente (sem casamento de Impedância)		
1	4,8	-38,5
2	6,8	-12,8
3	7,0	-10,3
4	7,0	-10,3
5	7,5	-3,8
6	7,6	-2,6
7	7,6	-2,6
8	7,6	-2,6
130 m	7,5	-3,8
130 m suspenso	7,8	-

Ao serem impressas ondas de corrente de tempo de frente típico daqueles de descargas subsequentes no aterramento concentrado, verificou-se que os erros nos valores de estimados de Z_P :

- São muito elevados em todas as condições (unidades de ATL em aberto e unidades aterradas na extremidade com casamento de impedância), alcançando faixas de 10 a 27%.

O exame da Figura 6.7 (c) revela que tais erros decorrem do crescimento progressivo das curvas de GPR até o ponto de reflexão,

já que os valores de I_p são os mesmos, conforme mostra a Figura 6.7 (d).

Para os resultados do aterramento composto por cabos contrapeso, verificou-se que os erros nos valores de estimados de Z_p :

- Para a condição de unidades de ATL em aberto, os erros decrescem significativamente ao serem usados mais de 5 unidades, ficando na faixa de 5% a 2%.
- Para a condição de unidades aterradas, mas sem casamento de impedância, são verificadas diferenças significativas nas estimativas de impedância para um número de unidades inferior a 5, com erros na faixa de 38% a 10%. Para um número de unidades maior que 5, este erro decresce muito significativamente, ficando restrito à faixa de 4% a 3%.

Apesar deste último resultado parecer positivo, sugere-se a complementação dos testes para o aterramento composto por cabos contrapeso com a condição de extremidade das unidades de ATL casadas e aterramento ainda próximo dos eletrodos em teste. A confirmação de bons resultados desta prática evitaria as dificuldades de detecção de pico decorrente do brusco crescimento da corrente na ausência de casamento de impedância e poderia configurar prática generalizada e confiável de medição.

Considerando os resultados, acredita-se que o uso de unidades de ATL no circuito de corrente possa ser efetivo para a medição de Z_p em arranjos típicos de LTs, desde que sejam observados certos cuidados para se evitar as dificuldades decorrentes da modificação da forma de onda de corrente pelo tipo de aplicação (extremidade das unidades em aberto ou aterradas sem casamento de impedância). Observou-se a necessidade de uso de um número mínimo de unidades para assegurar erros reduzidos nas estimativas de Z_p .

Naturalmente, são requeridos testes complementares para se verificar a generalidade dos resultados e definir uma relação confiável entre a dimensão do

arranjo de eletrodos (por exemplo, comprimento dos cabos contrapeso) e o número de unidades a adotar.

A prática que parece mais promissora consiste no uso de um número definido de unidades de ATL aterradas na extremidade, com casamento de impedância. Isto possibilita manter as formas de onda de correntes típicas de descargas nos testes. Os resultados sugerem que para a medição de Z_P seria possível posicionar o aterramento auxiliar de corrente muito aquém da distância correspondente ao terra remoto, o que eliminaria uma das maiores dificuldades neste tipo de medição, que consiste nas grandes distâncias requeridas para implementação do método de medição. A confirmação deste resultado requer testes complementares.

6.3.1.2 Unidades de ATL no Circuito de Tensão

Outro aspecto a explorar no que concerne ao uso de unidades de ATL na medição da impedância de aterramento de LTs consiste na sua aplicação no circuito de medição de tensão para reduzir as correspondentes distâncias. Neste caso, diferentemente do uso no circuito de corrente, a aplicação não altera a forma de onda da corrente impressa ao aterramento.

Em função dos resultados alcançados nas análises relativas a esta seção optou-se por considerar em separado as avaliações relativas ao aterramento concentrado e ao de arranjo de cabos contrapeso.

A Figura 6.8 mostra as formas de onda de GPR no aterramento concentrado resultantes da impressão de corrente impulsiva representativa da forma de primeira descarga por condutores de corrente convencionais distantes 25 m desse aterramento, medidas utilizando-se no circuito de tensão: unidades de ATL em duas condições (extremidade aberta e aterrada diretamente no solo – sem casamento de impedância) e condutor convencional posicionado a 25 m de distância (referência) utilizados no circuito de tensão. Não há uma explicação clara para o valor de corrente ligeiramente inferior observado quando o uso das unidades de ATL no circuito de tensão em relação à referência que usa um cabo de

25 m, Figuras 6.8 (b, d). A Figura 6.9 mostra os mesmos resultados para ondas de corrente representativa da forma de onda de descarga subsequente.

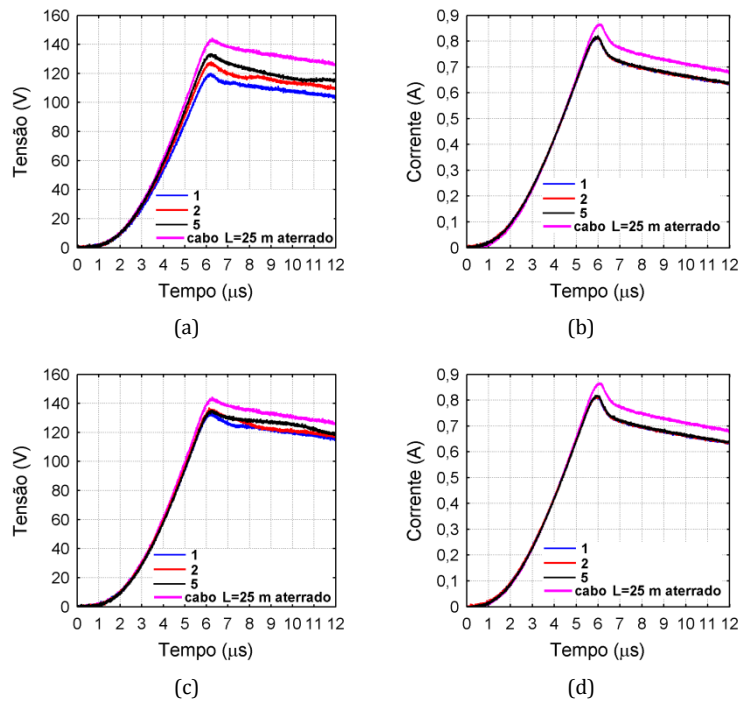


Figura 6.8 – Medições de GPR e de corrente no aterramento concentrado ao serem injetadas ondas de corrente de $T_F = 5 \mu s$, utilizando no circuito de tensão: unidades de ATL em aberto (a, b), unidades de ATL aterradas (c, d) e a configuração de referência (cabo comum de 25 m aterrado).

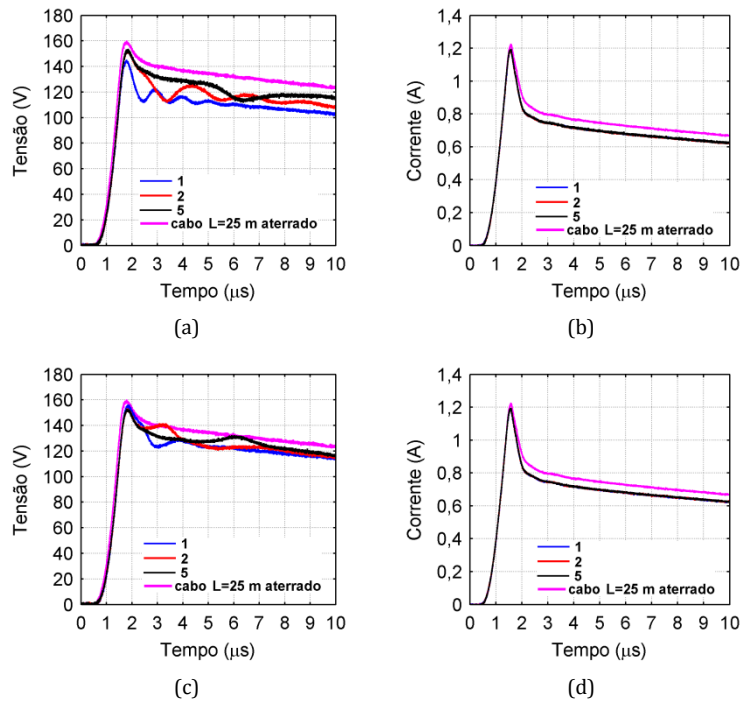


Figura 6.9 – Medições de GPR e de corrente no aterramento concentrado ao serem injetadas ondas de corrente de $T_F = 1 \mu s$, utilizando no circuito de tensão: unidades de ATL em aberto (a, b), unidades de ATL aterradas (c, d) e a configuração de referência (cabo comum de 25 m aterrado).

A simples inspeção das curvas de GPR mostram que os resultados decorrentes do uso de unidades de ATL no circuito de tensão para o aterramento concentrado são muito similares aos da medição de referência. A boa qualidade dos resultados é comprovada pelas correspondentes Tabelas 6.5 e 6.6 com indicação dos erros nas estimativas de Z_p , respectivamente para ondas de descargas primeira e subsequente.

Ao serem injetadas ondas de corrente com tempo de frente de primeira descarga no aterramento concentrado, foram verificadas erros muito reduzidos no valor de Z_p em relação à referência, tanto para a condição de extremidade aberta (faixa de erro de 12% a 2%), quanto na de extremidade aterrada (faixa de erro de 2% a 0,5%). Resultados semelhantes foram encontrados para a impressão de correntes com tempo de frente típico de descargas subsequentes.

Tabela 6.5 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.7 relativos ao aterramento concentrado. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 25 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_p (Ω)	Diferença Percentual de Z_p (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão		
1	147	-11,4
2	157	-5,4
5	163	-1,8
25 m	166	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão		
1	163	-1,8
2	167	0,6
5	165	-0,6
25 m	166	-

Tabela 6.6 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.8 relativos ao aterramento concentrado. No circuito de corrente é usado um cabo comum aterrado de 25 m. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 25 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_P (Ω)	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão		
1	122	-6,1
2	129	-0,8
5	128	-1,5
25 m	130	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão		
1	131	0,8
2	128	-1,5
5	127	-2,3
25 m	130	-

Ao serem injetadas ondas de T_F típico dos tempos de descargas subsequentes no aterramento concentrado, foram verificadas diferenças percentuais 6% a 1,5% para extremidade aberta e de 0,8% a 2% no caso de extremidade aterrada.

Nos casos anteriores, o uso de duas unidades no circuito de tensão (extremidade a 6 m do aterramento de teste) corresponde a erros inferiores a 6%.

Os resultados para o aterramento concentrado pareciam ser alentadores e indicativos da adequação do emprego das unidades de ATL para reduzir as distâncias no circuito de tensão. Entretanto, as curvas de GPR da Figura 6.10 relativas às avaliações do emprego de ATL no caso de eletrodos extensos revertem tais expectativas preliminares.

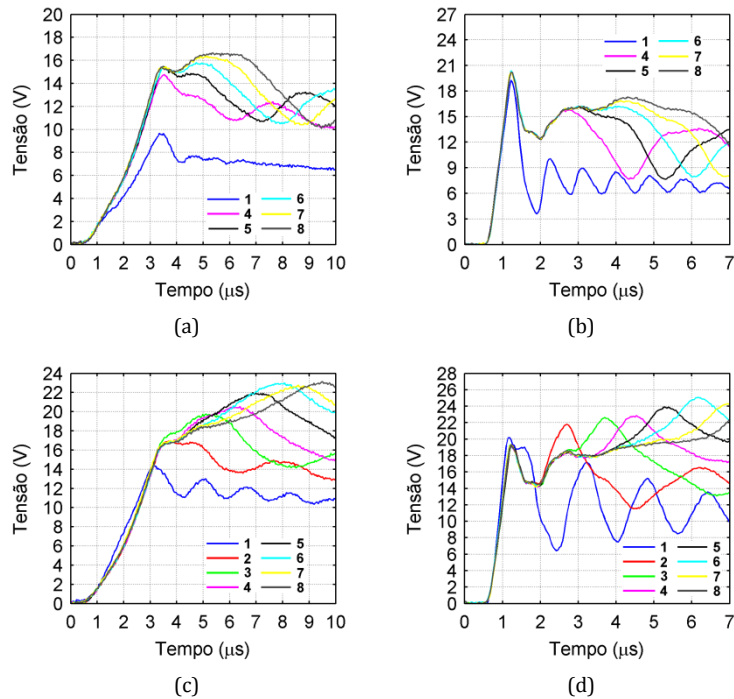


Figura 6.10 – Medições de GPR no aterramento composto por cabos contrapeso utilizando no circuito de tensão: unidades de ATL em aberto (a, b) e unidades de ATL aterradas (c, d), ao serem injetadas ondas de corrente de $T_F = 3,5 \mu\text{s}$ (a, c) e de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$ (b, d).

Nota-se, como complicador, que as ondas de GPR medidas apresentam diversas reflexões, as quais geram múltiplos valores de pico, que chegam inclusive a ultrapassar o valor do primeiro pico destas ondas, correspondente ao pico do GPR de referência. Tais ondas são bem diferentes das utilizadas como referência, apresentadas nas seções 5.2.2.3 (Ensaio 09) e 5.2.2.4 (Ensaio 10).

As Tabelas 6.7 e 6.8 indicam os erros nas impedâncias impulsivas estimadas a partir do uso de unidades de ATL no circuito de tensão para o aterramento composto por cabos contrapeso, respectivamente para ondas de corrente com T_F típicos de descarga primeira e subsequente, nas situações de extremidade aberta e aterrada das unidades.

No caso do aterramento composto por cabos contrapeso, foram verificadas erros muito significativos nas estimativas de Z_P determinadas com o uso de unidades de ATL em relação aos resultados da configuração de referência (cabo de 40 m de comprimento aterrado), tanto para ondas de corrente representativas de descargas primeira quanto de subsequente. Os erros resultantes têm ordem

superior a 20%, mesmo com o emprego de até 8 unidades de ATL (extremidade a distância de 24 m do centro dos eletrodos).

Uma análise complementar desenvolvida com relação ao circuito de tensão no caso do aterramento composto por cabos contrapeso refere-se à necessidade de se aterrar ou não a extremidade do cabo de tensão quando se utiliza condutor comum. Verificaram-se erros na estimativa de Z_P de primeiras descargas de aproximadamente 7% e 10% quando se utiliza extremidade em aberto com o mesmo comprimento da medição de referência (40 m) em relação à condição de extremidade aterrada. Para descargas subsequentes tal erro é reduzido para a faixa de 2% e 3%. Tais resultados são indicados nas linhas “40 m” das Tabelas 6.7 e 6.8. Os resultados sugerem a possibilidade de obter resultados coerentes sem a necessidade de se aterrar a extremidade do circuito de medição de tensão quando os tempos de frente são muito reduzidos e o comprimento do condutor de tensão o coloca sobre a região do patamar de potencial.

Tabela 6.7 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.17 e 5.19 relativos ao aterramento composto por cabos contrapeso. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspenso e aterrado. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 40 m de comprimento.

Condutor de Corrente	Z_P (Ω)	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão		
1	2,4	-50,0
4	3,6	-25,0
5	3,8	-20,8
6	3,8	-20,8
7	3,8	-20,8
8	3,8	-20,8
40 m	4,3	-10,4
40 m aterrado	4,8	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão		
1	3,7	-30,2
2	4,3	-18,9
3	4,5	-15,1
4	4,3	-18,9
5	4,3	-18,9
6	4,3	-18,9
7	4,3	-18,9
8	4,3	-18,9
40 m	4,9	-7,5
40 m suspenso	5,3	-

Tabela 6.8 – Síntese dos resultados apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.20 relativos ao aterramento composto por cabos contrapeso. No circuito de corrente é usado um cabo comum de 130 m suspenso e aterrado. A diferença percentual para todos os condutores de tensão utilizados é calculada em relação à referência que utiliza um cabo aterrado de 40 m de comprimento.

Condutor de Corrente	$Z_P (\Omega)$	Diferença Percentual de Z_P (%)
Unidades de ATL em Aberto no Circuito de Tensão		
1	4,3	-27,1
4	4,6	-22,0
5	4,6	-22,0
6	4,6	-22,0
7	4,6	-22,0
8	4,5	-23,8
40 m	6,0	1,7
40 m aterrado	5,9	-
Unidades de ATL Aterradas no Circuito de Tensão		
1	4,7	-25,4
2	4,4	-30,1
3	4,4	-30,1
4	4,4	-30,1
5	4,4	-30,1
6	4,5	-28,6
7	4,5	-28,6
8	4,5	-28,6
40 m	6,1	-3,2
40 m suspenso	6,3	-

Em síntese, os resultados indicam que o uso de unidades de ATL no circuito de medição de tensão com características típicas de cabos contrapeso não é adequado.

6.3.2 Análise da Resposta em Baixas Frequências

Outra avaliação importante na perspectiva de aplicação em LTs consiste na estimativa do valor da resistência de aterramento em baixa frequência (R_{BF}) a partir do quociente entre os valores instantâneos das ondas de GPR e corrente impressa no aterramento tomados na cauda das ondas.

Este item desenvolve tal avaliação para os aterramentos concentrado e de cabos contrapeso.

A Figura 6.11 mostra o quociente entre os valores instantâneos de GPR e corrente impressa no caso do aterramento concentrado para ondas com tempos de frente típicos de descargas primeira e subsequente.

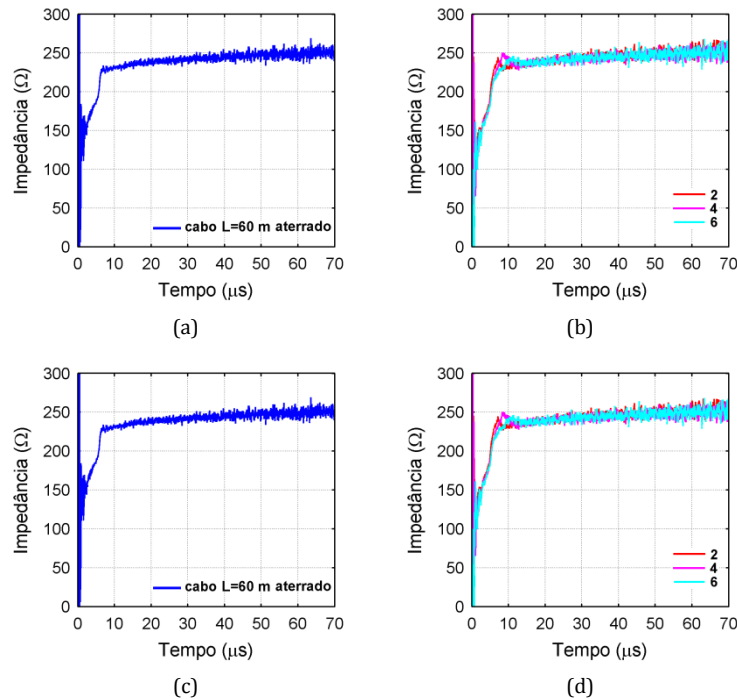


Figura 6.11 – Valores de $z(t)$ no aterramento concentrado calculados a partir da medição de ondas de GPR e corrente usando no circuito de corrente: cabo comum aterrado de 60 m de comprimento (esquerda) e de 2 a 6 unidades de ATL aterradas diretamente na extremidade (direita), para $T_F = 5 \mu\text{s}$ (a, b) e de $1 \mu\text{s}$ (c, d). Janela de $70 \mu\text{s}$.

Para o aterramento concentrado, considerando a curva $z(t)$ no instante $t = 10 \mu\text{s}$, o uso de cabo comum leva a quociente de valor aproximadamente 8% inferior ao provido pela medição convencional com um instrumento de medição comercial, tanto para $T_F = 5 \mu\text{s}$ quanto para $T_F = 1 \mu\text{s}$. Ao serem utilizadas unidades de ATL, a diferença fica na faixa de 4 a 13%. Considerando-se o quociente na cauda, a $70 \mu\text{s}$, todos os valores medidos utilizando unidades de ATL ou cabo comum convergiram para o valor de 250Ω obtido pelo instrumento comercial, conforme mostra a Figura 6.11.

Nas medições relativas ao arranjo com cabos contrapeso realizadas com uso de unidades de ATL (extremidade em aberto ou aterrada sem casamento de impedância), a corrente é sempre modificada muito sensivelmente pelas reflexões após alguns microssegundos. Isto impossibilita a estimativa do quociente em

análise na cauda, em instantes próximos a $100 \mu\text{s}$, o que seria requerido para estimativa de R_{BF} .

Por outro lado se procedeu uma avaliação complementar sobre a representatividade deste quociente na cauda da onda obtido numa medição convencional de impressão de onda impulsiva de corrente para uma configuração de eletrodos extensa, do tipo de cabos contrapeso (uso de cabo comum aterrado a 130 m do arranjo no circuito de corrente e cabo comum aterrado ou em aberto de 40 m no circuito de tensão). A Figura 6.12 mostra como se comporta o quociente no caso do arranjo de cabos contrapeso.

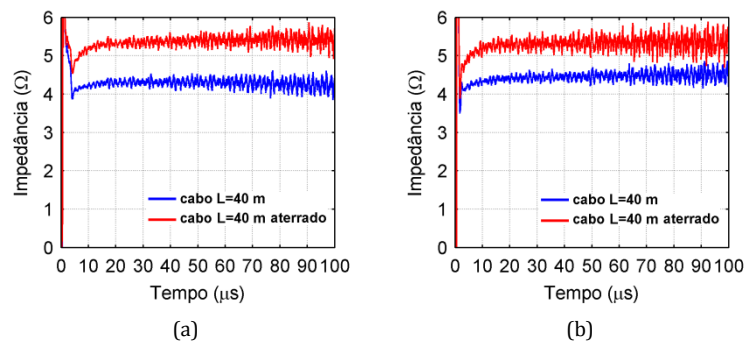


Figura 6.12 – Medições de $z(t)$ no aterramento composto por cabos contrapeso usando no circuito de corrente um cabo comum aterrado (130 m de comprimento) e no circuito de tensão um cabo comum (40 m de comprimento) aterrado ou em aberto, para as correntes injetadas de (a) $T_F = 3,5 \mu\text{s}$ e (b) $T_F = 0,9 \mu\text{s}$. Janela de $100 \mu\text{s}$.

Para o aterramento de cabos contrapeso, verificam-se diferenças muito significativas no valor estimado para a resistência a $100 \mu\text{s}$ (ordem de $5,5 \Omega$) em relação àquele medido com o instrumento comercial ($R_{BF} = 7,7 \Omega$), para os dois tempos de frente. As diferenças foram de aproximadamente 40% (cabo de 40 m em aberto) e de 30% (cabo de 40 m aterrado) para a corrente injetada de $T_F = 3,5 \mu\text{s}$, e de 45% (cabo de 40 m em aberto) e de 30% (cabo de 40 m aterrado) para a corrente injetada de $T_F = 0,9 \mu\text{s}$.

Aparentemente o resultado acima indica a limitação da qualidade de estimativas de R_{BF} para aterramentos extensos a partir do quociente entre os valores instantâneos tomados nas caudas das ondas de tensão e corrente.

6.4 Análise do Uso de Medidores de Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

Experiências anteriores da equipe do LRC já haviam indicado ser comum encontrar-se grande dispersão nos resultados de medição de resistências de um mesmo aterramento providos por diferentes instrumentos comerciais. Tal dispersão em conjunto com as diferenças comentadas na seção anterior entre a resistência estimada (a partir de medições impulsivas) em relação ao valor indicado por medidores de baixa frequência ensejaram a realização de uma avaliação do desempenho de diferentes medidores analisadas nesta seção.

Nesta avaliação buscou-se simular as diferentes condições enfrentadas nas situações práticas de medição de resistência de pé de torre, com potencial para afetar o desempenho do medidor. Como indicado na seção 4.4, as medições foram realizadas para os aterramentos concentrado e de cabos contrapeso em teste neste trabalho, com a adição de resistores em série para simular o efeito da resistência de aterramento da haste auxiliar de corrente (ou hastes). Tal resistência é responsável pela limitação da corrente circulante e, portanto, pelo nível da elevação do potencial em medição. No caso de solos de alta resistividade, este efeito pode ser crítico.

6.4.1 Síntese de Resultados e Análises

Inicialmente consideram-se os resultados em termos de R_{BF} alcançados para o aterramento concentrado. A Tabela 6.9 indica os resultados de medição obtidos utilizando-se um gerador de ondas senoidais implementado nesta dissertação, quatro instrumentos de medição comerciais e um gerador de ondas impulsivas. Foi também indicado o valor de Z_P para termos de comparação.

Tabela 6.9 – Aterramento concentrado: valores de resistência de aterramento obtidos ao serem introduzidos resistores em série (0-40 kΩ) no circuito de corrente utilizando o gerador de ondas senoidais, o gerador de ondas impulsivas e os medidores comerciais. Para o gerador impulsivo são mostrados ainda os valores de impedância impulsiva.

R _{serie} (kΩ)	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		R _{BF} (Ω)				R _{BF} (Ω)		Z _P (Ω)	
		A	B	C	D	T _F =6μs	T _F =1,3μs	T _F =6μs	T _F =1,3μs
0	83	77,3	78	78,4	83,8	73,9	72,9	66,8	62,3
0,5	83,9	77,8	78,9	78,4	77,8	75,2	73	67	62,7
1	84,6	77,8	79,9	78,4	77,8	71,6	70,8	65,7	62,1
2	86,6	77,9	81,7	78,4	71,8	69,6	70,7	65	63,1
5	86,3	77,9	87,8	78,4	59,8	77,6	78,4	69,5	67,6
10	85,4	78	97,9	78,4	47,9	80,3	81,9	71,9	66,7
20	85	77,8	117,3	78,4	26,3	82	83,2	72,5	58,6
40	82,5	78	156,3	78,4	12	93,8	103,7	81,3	61,4

Os resultados acima permitem desenvolver várias análises. A primeira corresponde à avaliação do efeito do valor da resistência de aterramento da haste auxiliar de corrente no resultado provido por cada instrumento. Na Tabela 6.10 são mostrados os valores de diferença percentual obtidos para cada instrumento, considerando a situação inicial de R_{serie} = 0.

Tabela 6.10 – Diferença percentual dos valores apresentados na Tabela 6.9 em relação a situação sem resistor em série para cada instrumento.

R _{serie} (kΩ)	Gerador de Ondas Senoidais	Diferença Percentual (%)							
		Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		A	B	C	D	T _F =6μs	T _F =1,3μs	T _F =6μs	T _F =1,3μs
0,5	1,1	0,6	1,2	0,0	-7,2	1,8	0,1	0,3	0,6
1	1,9	0,6	2,4	0,0	-7,2	-3,1	-2,9	-1,6	-0,3
2	4,3	0,8	4,7	0,0	-14,3	-5,8	-3,0	-2,7	1,3
5	4,0	0,8	12,6	0,0	-28,6	5,0	7,5	4,0	8,5
10	2,9	0,9	25,5	0,0	-42,8	8,7	12,3	7,6	7,1
20	2,4	0,6	50,4	0,0	-68,6	11,0	14,1	8,5	-5,9
40	-0,6	0,9	100,4	0,0	-85,7	26,9	42,2	21,7	-1,4

São verificadas diferenças máximas de 4,3% para o gerador de ondas senoidais e de 0,9 % para o medidor A. Para o medidor C, o valor de R_{BF} = 78,4 Ω permaneceu fixo para qualquer valor de R_{serie} utilizado. O medidor B apresentou

diferenças significativas a partir de $R_{\text{serie}} = 5 \text{ k}\Omega$, chegando a uma diferença superior a 100% para $R_{\text{serie}} = 40 \text{ k}\Omega$. O medidor D apresentou diferenças significativas a partir de $R_{\text{serie}} = 2 \text{ k}\Omega$, chegando a uma diferença superior a 85% para $R_{\text{serie}} = 40 \text{ k}\Omega$. Para o gerador de ondas impulsivas, foram verificadas diferenças significativas nos valores de R_{BF} a partir de $R_{\text{serie}} = 10 \text{ k}\Omega$. O valor de Z_p foi sempre menor que o de R_{BF} para qualquer valor de R_{serie} utilizado.

Outra avaliação corresponde ao erro relativo entre os resultados dos diferentes medidores, tendo como referência o valor de 83Ω obtido do gerador de ondas senoidais em $R_{\text{serie}} = 0$. A Tabela 6.11 apresenta os valores de diferença percentuais. A adoção de R_{BF} medido com uso do gerador de ondas senoidais para referência ($R_{\text{BF}} = 83 \Omega$) decorreu da intensidade de seu sinal. As ondas obtidas de GPR e de corrente possuem amplitudes superiores a 130 V e a 1,5 A, quando $R_{\text{serie}} = 0$, respectivamente. Enquanto tais sinais são da ordem de milivolts e miliamperes para os medidores comerciais.

Tabela 6.11 – Diferença percentual dos valores apresentados na Tabela 6.9 em relação a situação sem resistor em série para o gerador de ondas senoidais.

R_{serie} (k Ω)	Diferença Percentual (%)						
	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas	
		A	B	C	D	$T_F=6\mu\text{s}$	$T_F=1,3\mu\text{s}$
0	-	-6,9	-6,0	-5,5	1,0	-11,0	-12,2
0,5	1,1	-6,3	-4,9	-5,5	-6,3	-9,4	-12,0
1	1,9	-6,3	-3,7	-5,5	-6,3	-13,7	-14,7
2	4,3	-6,1	-1,6	-5,5	-13,5	-16,1	-14,8
5	4,0	-6,1	5,8	-5,5	-28,0	-6,5	-5,5
10	2,9	-6,0	18	-5,5	-42,3	-3,2	-1,32
20	2,4	-6,3	41,3	-5,5	-68,3	-1,2	0,2
40	-0,6	-6,0	88,3	-5,5	-85,5	13	24,9

Verifica-se na Tabela 6.11 que apenas o medidor de ondas senoidais e os medidores A e C podem ser usados para medição de R_{BF} com R_{serie} em toda a faixa de 0-40 k Ω , pois foram verificadas diferenças percentuais pequenas, de no máximo 4,3%, 6,9% e -5,5%, para cada um deles respectivamente. O medidor D poderia ser utilizado apenas para R_{serie} na faixa de 0-1 k Ω e o medidor B na faixa de 0-5 k Ω .

Com relação ao valor de R_{BF} estimado a partir das formas de onda de GPR e de corrente utilizando o gerador impulsivo, verifica-se que as estimativas mostram erros na faixa de -15%.

O mesmo procedimento anterior foi realizado para o aterramento composto por cabos contrapeso. Os resultados obtidos das medições anteriormente apresentados na Tabela 5.22, são repetidos na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Aterramento composto por cabo contrapeso: valores de resistência de aterramento obtidos ao serem introduzidos resistores em série (0-40 k Ω) no circuito de corrente utilizando o gerador de ondas senoidais, o gerador de ondas impulsivas e os medidores comerciais. Para o gerador impulsivo são mostrados ainda os valores de impedância impulsiva.

R_{serie} (k Ω)	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		R_{BF} (Ω)				R_{BF} (Ω)		Z_P (Ω)	
		A	B	C	D	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$
0	13	15,1	17,6	15,4	14,3	13,1	13,2	10,1	8,8
0,5	13,3	15	22,7	15,4	11	12,9	12,9	10,4	9,5
1	13,3	15,1	26,5	15,4	11	13,2	12,9	10,8	9,7
2	13,3	15,1	33,6	15,4	11	12,6	12,6	10,7	10,3
5	13,6	15,3	55,7	15,4	11	11,9	11,4	11,8	10,1
10	13,8	15,8	90,3	15,4	13,2	12,3	12,2	13,6	10,5
20	13,7	16,2	161,1	15,4	11	11,9	12,8	14,2	9,8
40	13,8	17,4	318,6	15,4	13,2	12,3	7,7	16,9	9,2

Na Tabela 6.13 são mostrados os valores de diferença percentual obtidos para cada instrumento, considerando a situação inicial de $R_{serie} = 0$.

Tabela 6.13 – Diferença percentual dos valores apresentados na Tabela 6.12 em relação a situação sem resistor em série para cada instrumento.

R_{serie} (k Ω)	Gerador de Ondas Senoidais	Diferença Percentual (%)							
		Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas			
		A	B	C	D	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$	$T_F=4,5\mu s$	$T_F=0,9\mu s$
0,5	2,3	-0,7	29,0	0,0	-23,1	-1,5	-2,3	3,0	8,0
1	2,3	0,0	50,6	0,0	-23,1	0,8	-2,3	6,9	10,2
2	2,3	0,0	90,9	0,0	-23,1	-3,8	-4,5	5,9	17,0
5	4,6	1,3	216,5	0,0	-23,1	-9,2	-13,6	16,8	14,8
10	6,2	4,6	413,1	0,0	-7,7	-6,1	-7,6	34,7	19,3
20	5,4	7,3	815,3	0,0	-23,1	-9,2	-3,0	40,6	11,4
40	6,2	15,2	1710,2	0,0	-7,7	-6,1	-41,7	67,3	4,5

São verificadas diferenças máximas de 6,2% para o gerador de ondas senoidais e de 15,2 % para o medidor A. Para o medidor C, o valor de $R_{BF} = 15,4 \Omega$ permaneceu fixo para qualquer valor de R_{serie} utilizado. Os medidores B e D apresentaram diferenças significativas já para $R_{serie} = 0,5 \text{ k}\Omega$, com o primeiro chegando a uma diferença superior a 1700% para $R_{serie} = 40 \text{ k}\Omega$. Para o gerador de ondas impulsivas, foram verificadas diferenças significativas nos valores de R_{BF} a partir de $R_{serie} = 5 \text{ k}\Omega$. O valor de Z_P foi menor que o de R_{BF} para quase todos os valores de R_{serie} utilizados, se tornando superior a partir de $R_{serie} = 10 \text{ k}\Omega$ e para $R_{serie} = 40 \text{ k}\Omega$, considerando ondas de $T_F = 4,5 \mu\text{s}$ e $T_F = 0,9 \mu\text{s}$, respectivamente. Tal fato ocorre, pois as ondas de GPR estão muito atenuadas para estes valores de R_{serie} . Os ruídos tornam-se então bastante significativos, comprometendo o cálculo de Z_P .

Novamente foi usado como referência para cálculo dos erros nas medições os resultados obtidos com o gerador de ondas senoidais ($R_{BF} = 13 \Omega$), devido às amplitudes elevadas de seus GPR e corrente, de ordem superior respectivamente a 25 V e 2 A, quando $R_{serie} = 0$. Ao se adotar tal referência, tem-se os seguintes valores de diferença percentuais mostrados na Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Diferença percentual dos valores apresentados na Tabela 6.12 em relação a situação sem resistor em série para o gerador de ondas senoidais.

R_{serie} (k Ω)	Diferença Percentual (%)						
	Gerador de Ondas Senoidais	Medidores Comerciais				Gerador de Ondas Impulsivas	
		A	B	C	D	$T_F=4,5\mu\text{s}$	$T_F=0,9\mu\text{s}$
0	-	16,1	35,4	18,5	10,0	0,8	1,5
0,5	2,3	15,4	74,6	18,5	-15,4	-0,8	-0,8
1	2,3	16,1	103,8	18,5	-15,4	1,5	-0,8
2	2,3	16,1	158,5	18,5	-15,4	-3,1	-3,1
5	4,6	17,7	328,5	18,5	-15,4	-8,4	-12,3
10	6,2	21,5	594,6	18,5	1,54	-5,4	-6,2
20	5,4	24,6	1139,2	18,5	-15,4	-8,5	-1,5
40	6,2	33,8	2350,8	18,5	1,54	-5,4	-40,8

Com relação ao valor de R_{BF} estimado a partir das formas de onda de GPR e de corrente utilizando o gerador impulsivo, verifica-se que os erros são

relativamente mais reduzidos, bem inferiores a 10 % na maioria dos casos, exceto para condição limite de resistor em série de 40 k Ω .

6.4.2 Considerações Finais Sobre o Uso de Medidores de Resistência de Aterramento em Baixas Frequências

As análises realizadas permitem concluir que apenas o gerador de ondas senoidais e os medidores A e C não tiveram sua medição de R_{BF} afetada com o aumento do valor de R_{serie} , apresentando bom desempenho para sua aplicação em solos de resistividades moderadas e elevadas.

Quando aplicados ao aterramento concentrado os resultados de medição destes três instrumentos foram muito similares, o que mostra a adequação do uso dos três neste tipo de arranjo.

Entretanto, apesar de cada qual mostrar boa precisão (repetitividade de resultados independentemente do valor da resistência de aterramento da haste auxiliar de corrente), quando aplicados ao aterramento composto por cabos contrapeso, os resultados dos medidores A e C apresentam diferenças em relação aos obtidos com o uso do gerador de ondas senoidais de amplitudes elevadas, respectivamente de ordem +16% e +19%.

7

Conclusões e Propostas de Continuidade

7.1 Considerações Iniciais

Os trabalhos desta dissertação envolveram inicialmente uma revisão e síntese dos aspectos relevantes da resposta dos aterramentos elétricos quando submetidos a correntes de descargas atmosféricas, com foco nas questões de desempenho de LTs, e das metodologias de medição que buscam qualificar o aterramento de estruturas de linhas, na perspectiva da expectativa de sua influência no desempenho destas, seja por meio da resistência ou impedância de aterramento.

Foi desenvolvido um extenso volume de realizações experimentais, consistindo, sobretudo, na medição da resposta impulsiva de dois arranjos de aterramento (um arranjo concentrado e outro extenso, o qual buscava representar em escala semirreal os cabos contrapesos típicos de LTs). Tais realizações se dedicaram à investigação da potencialidade de uso das chamadas unidades de ATL na medição da impedância impulsiva (Z_P) de aterramentos e na estimativa de sua resistência em baixas frequências (R_{BF}), para fins de redução das distâncias requeridas. Envolveram, também, ensaios e medições dedicadas especificamente a avaliações relativas à medição da resistência de aterramento, incluindo o uso de medidores comerciais.

As principais conclusões decorrentes dos resultados e análises desenvolvidas são apresentadas a seguir, bem como as sugestões de continuidade da investigação.

7.2 Conclusões e Sugestões de Continuidade do Trabalho

A despeito do grande volume de realizações experimentais desenvolvidas nesta dissertação, no que concerne a metodologias para qualificação dos aterramentos de torres de LTs, o número de conclusões é relativamente reduzido, embora haja um significativo número de resultados promissores que requerem sua confirmação por meio de realizações complementares.

Considerando inicialmente a medição de resistência de aterramento, podem ser elencadas as seguintes conclusões:

- Dos quatro instrumentos comerciais utilizados para medição de resistência de aterramento, 50% (B e D) apresentam desempenho não satisfatório, quando se considera o efeito de valores elevados de resistência de aterramento da haste auxiliar do circuito de corrente, uma condição usual para este tipo de medição.
- Dois instrumentos (A e C) apresentam resultado satisfatório nesse requisito, mas suas indicações mostram erros significativos da ordem de 20%, quando comparado aos resultados obtidos com o uso de um gerador de ondas senoidais que injeta corrente elevadas (da ordem de amperes no solo).

Particularmente, vale relatar uma experiência prática da equipe do LRC (VISACRO, 2016) relativa a uma avaliação similar, que incluiu medidor de alta frequência (para evitar a desconexão dos cabos de blindagem da linha) e que mostrou resultado semelhante: diferenças de até 200% nos resultados obtidos em relação àqueles de um medidor do tipo A dos testes desta dissertação.

Tais conclusões sugerem a necessidade de uma pesquisa específica para definição dos equipamentos comerciais que têm capacidade de realizar este tipo de medição. Aparentemente, o número de medidores com características adequadas para medição da resistência de pé de torre de linhas é bem reduzido.

No que concerne ao uso das unidades de ATL no *circuito voltimétrico*, os resultados indicam uma conclusão objetiva para aplicações relativas à medição em LTs:

- Os resultados mostram que definitivamente o uso de unidades de ATL no *circuito voltimétrico* não é adequado e deve ser evitado.

No que concerne ao uso das unidades de ATL no *circuito amperimétrico*, podem ser elencadas as seguintes conclusões para aplicações relativas à medição em LTs:

- O uso dessas unidades apresenta perspectivas promissoras, seja com a extremidade do circuito em aberto ou aterrada, desde que seja utilizado um número mínimo de unidades (5 unidades nos testes desenvolvidos para a dimensão específica do arranjo de cabos contrapeso adotados nas medições deste trabalho);
- O uso da extremidade em aberto promove uma mudança da forma de onda de corrente injetada causando um rápido decaimento de sua cauda e modificando tal forma em relação àquela da corrente de descargas naturais. Tal modificação dificulta a detecção dos picos de corrente e de tensão, o que seria um aspecto de dificuldade no uso de medidores que empregam ondas impulsivas. O uso de um número maior de unidades de ATL facilita a detecção do pico;
- O uso da extremidade aterrada (sem casamento de impedância) promove modificação da onda corrente injetada com brusco crescimento na região da crista, que também dificulta sobremaneira a detecção dos picos para cálculo da impedância impulsiva. O uso de um número maior de unidades de ATL facilita a detecção do pico;
- Nos dois casos (extremidade em aberto e aterrada) a modificação da forma de onda de corrente praticamente elimina a expectativa de se

desenvolver estimativas confiáveis de R_{BF} a partir das medições com ondas impulsivas de corrente.

- Nos dois casos (extremidade em aberto e aterrada) seria necessário verificar eventual relação entre o comprimento do arranjo de cabos contrapeso e o número de unidades de ATL requerido para se alcançar uma medição satisfatória de Z_p de aterramentos;
- Um resultado que pareceu promissor refere-se à realização de um aproximado casamento de impedância entre as unidades de ATL e o aterramento auxiliar de corrente, por meio da inclusão de um resistor entre a extremidade das unidades e a entrada do aterramento auxiliar. Os resultados deste tipo de prática só foram desenvolvidos para o aterramento concentrado, mas apresentaram erros muito reduzidos na medição de Z_p , mesmo com o aterramento auxiliar muito próximo do aterramento em teste.

Isto sugere a possibilidade de obtenção de ondas de corrente e GPR com forma aproximada de correntes de descargas mesmo com uso de unidades de ATL.

Sugere, também, a possibilidade de significativa redução da distância do aterramento auxiliar.

E, adicionalmente, com tal prática seriam preservados os elementos requeridos para estimativa de R_{BF} no ensaio com onda impulsiva de corrente.

Com relação ao uso das unidades de ATL no *circuito amperimétrico*, há duas linhas de investigação a serem complementadas:

- Verificação da eficiência do casamento de impedância na extremidade das unidades para arranjos de eletrodos extensos como os de LTs e, em caso de se constatar tal eficiência, determinar-se a distância mínima adequada para posicionamento da haste auxiliar de corrente.

- Buscar aperfeiçoar a detecção dos picos de tensão e corrente para cálculo da impedância impulsiva quando do uso de unidades de ATL com extremidade em aberto e aterrada (sem casamento de impedância).

Isto incluiria a determinação do número de unidades requerido para dimensões definidas dos cabos contrapeso.

Nas duas linhas de investigação, seria interessante verificar-se o efeito da redução da distância de colocação da haste auxiliar de potencial na condição de distância reduzida do circuito de corrente sobre a impedância impulsiva de aterramento medida. Eventualmente, em função de efeitos de propagação, tal redução seria possível.

Finalmente, com base nos resultados destas linhas de investigação seria possível elaborar uma metodologia de medição de Z_P e de estimativa de R_{BF} dos aterramentos de pé de torre LTs, que utiliza-se medidores do tipo daquele desenvolvido no LRC (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES e VISACRO, 2014).

8 Referências

Bibliográficas

ALIPIO, R., VISACRO, S., **“Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes”**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 55, no. 1, pp. 132-139, fevereiro, 2013.

BELLASCHI, P. L., ARMINGTON, R. E., SNOWDEN, A. E., **“Impulse and 60-Cycle Characteristics of Driven Grounds-II”**, AIEE Transactions, vol. 61, no. 6, pp. 349-363, 1942.

CEMIG, **“Instrução para Aterramentos de Estruturas de Linhas de Transmissão de 69 a 500 kV”**, n. 30.000-ER/LT-3368a, 2003.

CHISHOLM, W. A., PETRACHE, E., BOLOGNA, F., **“Comparison of Low Frequency Resistance and Lightning Impulse Impedance on Transmission Towers”**, In: Proceedings of X SIPDA – International Symposium of Lightning Protection, Curitiba, Brasil, novembro, 2009.

CHISHOLM, W. A., PETRACHE, E., BOLOGNA, F., **“Grounding of Overhead Transmission Lines for Improved Lightning Protection”**, In: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES, New Orleans, EUA, abril, 2010.

CHISHOLM, W. A., PAULINO, J. O. S., BOAVENTURA, W. C., LOPES, I. J. S., LIMA, A. B., GUIMARÃES, M. F., BOLOGNA, F. F., **“Simultaneous Transient Soil Resistivity and Footing Impedance Measurements Using a Very Short Current Lead on**

115 kV and 138 kV Towers", In: Proceedings of GROUND'2014 & 6th LPE – International Conference on Grounding and Earthing & 6th International Conference on Lightning Physics and Effects, Manaus, Brasil, maio, 2014.

CHOI, J.-H., LEE, B.-H., **"An Analysis on the Frequency-Dependent Grounding Impedance Based on the Ground Current Dissipation of Counterpoise in Two-Layered Soils"**, Journal of Electrostatics, vol. 70, pp. 184-191, 2012.

CIGRÉ, **"Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines"**, Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltage and Insulation Coordination), outubro, 1991.

CIGRÉ, **"Methods for Measuring the Earth Resistance of Transmission Tower Equipped with Earth Wires"**, Working Group C4.2.02, junho, 2005.

CUNNINGHAM, J. H., **"Design, Construction and Test of an Artificial Transmission Line"**, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 30, no. 1, pp. 87-98, janeiro, 1911.

CUNNINGHAM, J. H., DAVIS, C. M., **"Propagation of Impulses Over a Transmission Line"**, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 31, no. 5, pp. 649-658, maio, 1912.

CURDTS, E. B., **"Some of the Fundamental Aspects of Ground Resistance Measurements"**, AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part I, vol. 77, no. 5, pp. 760-767, novembro, 1958.

DE CONTI, A., VISACRO, S., **"Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms"**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448-451, maio, 2007.

DAWALIBI, F., MUKHEDKAR, D., **"Ground Electrode Resistance Measurements in Non Uniform Soils"**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-93, no. 1, pp. 109-115, janeiro, 1974.

DAWALIBI, F., MUKHEDKAR, D., **“Resistance Measurement of Large Grounding Systems”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2348-2354, novembro, 1979.

EPRI, **“Understanding the Zed-Meter® Instrument (Draft): Lightning Impulse Impedance of Transmission Tower Footings and Ground Electrodes”**, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA: 2008. 1015904, 2008.

FISHER, F. A., ANDERSON, J. G., HAGENGUTH, J. H., **“Determination of Lightning Response of Transmission Lines by Means of Geometrical Models”**, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems, vol. 78, no. 4, pp. 1725-1734, fevereiro, 1960.

GUIMARÃES, M., **“Investigação da Resposta de Malhas de Aterramentos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, julho, 2013.

IEEE STD 80, **“IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding”**, Revisão da IEEE Std 80-2000, IEEE Power and Energy Society, EUA, 2013.

IEEE STD 81, **“IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System”**, Revisão da IEEE Std 81-1983, IEEE Power and Energy Society, EUA, 2012.

IEEE STD 81.2, **“IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems”**, IEEE Std 81.2-1991, IEEE Power and Energy Society, EUA, 1991.

LIEW, A. C., DARVENIZA, M., **“Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths”**, Proc. IEE, vol. 121, no. 2, pp. 123-135, fevereiro, 1974.

LIMA, J. L. C., **“Avaliação Experimental Sobre o Efeito de Ionização do Solo Devido à Injeção de Correntes Impulsivas”**, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, setembro, 2008.

LIMA, A. B., **“Medição da Impedância e da Resistência de Aterramento Utilizando Ondas Impulsivas e Cabos de Pequeno Comprimento nos Circuitos de Tensão e de Corrente”**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, julho, 2015.

LIMA, A. B., PAULINO, J. O. S., BOAVENTURA, W. C., LOPES, I. J. S., GUIMARÃES, M. F., CHISHOLM, W. A., JAMALI, B., BOLOGNA, F., **“Transient Grounding Impedance and Transient Resistivity Measurements Using a Very Short Current Lead”**, Electric Power Systems Research, vol. 118, pp. 69-75, 2015.

MOTOYOMA, H., **“Electromagnetic Transient Response of Buried Bare Wire and Ground Grid”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1673-1679, julho, 2015.

RODRIGUES, B. D., **“Concepção e Desenvolvimento de um Medidor de Impedância Impulsiva de Aterramentos de Linhas de Transmissão”**, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, fevereiro, 2014.

RODRIGUES, B. D., VISACRO, S., **“Portable Grounding Impedance Meter Based on DSP”**, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 63, no. 8, pp. 1916-1925, agosto, 2014.

SALAMANCA, H. L. L., BLOCK, P. A. B., RETORTA, F. S., DAHLKE, D. B., GAMBOA, L. R. A., BEE, R. T., AQUINO, T. F., **“Residual Current Method of Grounding Resistance Measurement in Transmissions Towers with Earth Wire – Part 1: Study of Residual Current in Transmition Towers”**, In: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), IEEE/PES, maio, 2016a.

SALAMANCA, H. L., DAHLKE, D., GAMBOA, L. A., SHIONO, O. M., BLOCK, P., COSTA, A., SONODA, E. K., BEE, R. T., **“Residual Current Method of Grounding Resistance Measurement in Transmissions Towers with Earth Wire – Part 2: Measurement System, Experimental Results and Comparative Study”**, In: Proceedings of GROUND’2016 & 7th LPE – International Conference on Grounding

and Earthing & 7th International Conference on Lightning Physics and Effects, Porto de Galinhas, Brasil, junho, 2016b.

TAGG, G. F., “**Measurement of Earth-Electrode Resistance with Particular Reference to Earth-Electrode Systems Covering a Large Area**”, In: Proceedings of IEE, vol. 111, no. 12, pp. 2118-2130, dezembro, 1964.

TAGG, G. F., “**Measurement of the Resistance of and Earth-Electrode System Covering a Large Area**”, In: Proceedings of IEE, vol. 116, no. 3, pp. 475-479, março, 1969.

TAGG, G. F., “**Measurement of the Resistance of Physically Large Earth-Electrode Systems**”, In: Proceedings of IEE, vol. 117, no. 11, pp. 2185-2190, novembro, 1970.

THAPAR, B., GEREZ, V., BALAKRISHNAN, A., “**Foundations in Power System Act as Grounding Elements**”, In: Proceedings of Twenty-First Annual North-American Power, EUA, outubro, 1989.

VISACRO, S., “**Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**”, livro, pp. 1-159, Artliber Editora, São Paulo, 2002.

VISACRO, S., “**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**”, livro, pp. 1-272, Artliber Editora, São Paulo, 2005.

VISACRO, S., SOARES, A., “**HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems**”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1206-1208, abril, 2005.

VISACRO, S., “**A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Current**”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 381-386, janeiro, 2007.

VISACRO, S., ROSADO, G., **“Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation”**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 1, pp. 161-164, fevereiro, 2009.

VISACRO, S., ALIPIO, R., VALE, M. H. M., PEREIRA, C., **“The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity”**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 53, no. 2, pp. 401-406, maio, 2011.

VISACRO, S., ALIPIO, R., **“Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 27, no. 2, pp. 927-935, abril, 2012.

VISACRO, S., **“What Engineers in Industry Should Know about the Response of Grounding Electrodes Subject to Lightning Currents”**, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, novembro/dezembro, 2015.

VISACRO, S., ALIPIO, R., PEREIRA, C., GUIMARÃES, M., SCHROEDER, M. A. O., **“Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results”**, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 57, no. 1, pp. 121-127, fevereiro, 2015.

VISACRO, S., **“Comunicação pessoal relativa aos erros no uso de medidores de resistência de aterramento de torres de linhas de transmissão com cabos de blindagem isolados e conectados relativos a trabalho de consultoria da Linha 220 kV Jaurú-Vilena”**, Trabalho de Consultoria, agosto, 2016.

VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., **“Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 31, no. 4, pp. 1524-1532, agosto, 2016.

WENNER, F., **“Method of Measuring Earth Resistivity”**, Bulletin of the Bureau Standards, vol. 12, Washington D. C., EUA, julho, 1915.

XEMARD, A., LEGRAND, X., DUQUERROY, P., AURIOL, P., MOUYCHARD, C., LASSAIGNE, T., **“Study of the Grounding Electrodes of Towers: Theoretical Approach and on Site Measurements”**, Proceedings in: Session 2008, CIGRÉ, Paris, 2008.

YOKOYAMA, S., **“Calculation of the Lightning-Induced Voltages on Overhead Multiconductor Systems”**, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, no. 1, pp. 100-108, janeiro, 1984.