

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 1167

**NOVA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA IMPULSIVA  
DE ATERRAMENTOS DE PÉ-DE-TORRE DE LINHA DE  
TRANSMISSÃO**

**CAIO HENRIQUE DUARTE DE OLIVEIRA**

DATA DA DEFESA: 20/12/2019

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

**NOVA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA IMPULSIVA  
DE ATERRAMENTOS DE PÉ-DE-TORRE DE LINHA DE  
TRANSMISSÃO**

**CAIO HENRIQUE DUARTE DE OLIVEIRA**

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**  
**DEZEMBRO–2019**

O48n

Oliveira, Caio Henrique Duarte de.

Nova metodologia de medição de impedância impulsiva de aterramento de pé-de-torre de linha de transmissão [recurso eletrônico] / Caio Henrique Duarte de Oliveira. - 2019.

1 recurso online (v, 81 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Silvério Visacro Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia: f. 76-81.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Linha de transmissão - Teses.  
3. Correntes elétricas - Aterramento - Teses. I. Visacro Filho, Silvério. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)

**"Nova Metodologia de Medição de Impedância Impulsiva de Aterramento de Pé-de-torre de Linha de Transmissão"**

**Caio Henrique Duarte de Oliveira**

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 grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 20 de dezembro de 2019.

Por:



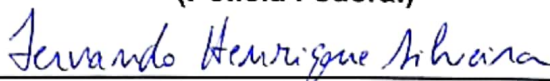
**Prof. Dr. Silvério Visacro Filho**  
DEE (UFMG) - Orientador



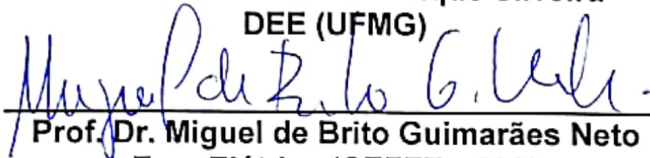
**Prof. Dr. Ronaldo Eugênio de Souza Filho**  
Eng. Elétrica (UNIFEI)



**Dr. Amilton Soares Júnior**  
(Polícia Federal)



**Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira**  
DEE (UFMG)



**Prof. Dr. Miguel de Brito Guimarães Neto**  
Eng. Elétrica (CEFET - MG)



## Agradecimentos

Aos meus pais, Hercylio e Silvana, por todo carinho, apoio e incentivo dado ao longo da minha vida, sempre priorizando minha educação e bem-estar. Aos meus irmãos, Guilherme e Victor, os maiores modelos e companheiros que possuo.

Ao professor Silvério Visacro, por me receber no Lightning Research Center, pela oportunidade e suporte oferecido. Sem seu conhecimento, orientação, esforço e dedicação, esse trabalho não seria possível.

Aos colegas de mestrado, Marcelo Arcanjo e Pedro Mattioli, o meu muito obrigado pela amizade, companhia e apoio. Aos demais companheiros de pesquisa no LRC, Miguel Guimarães, Listz Simões e Rafael Maia, por todos ensinamentos e conversas compartilhadas. Aos alunos de iniciação científica do LATER, Yasmin Guedes, Cristiano Gomes, Felipe Thomazi, Laís Eduarda, Rafael Delacqua, Paula Teixeira, Kevin Dias e Gabriel Bertolim pela paciência, auxílio nos experimentos e convivência ao longo dos anos.

A todas as pessoas que fazem parte da minha vida e que influenciaram a minha formação pessoal e profissional, gostaria de expressar meu profundo agradecimento!

---

## Resumo

Essa dissertação investiga uma nova técnica de medição da resposta transitória de aterramentos elétricos, notadamente a impedância impulsiva, utilizando um arranjo de condutores especiais no circuito de corrente. Tais condutores, chamados de ATL (*Artificial Transmission Line*) são solenóides que, devido às características construtivas, apresentam elevada impedância de surto e baixa velocidade de propagação. As unidades ATL substituem os longos cabos e dispensam o uso de hastes auxiliares no circuito de corrente, como nas medições convencionais de aterramentos elétricos. Dessa forma, busca-se diminuir drasticamente as distâncias envolvidas, facilitando e agilizando o processo.

Primeiramente, por meio de variados experimentos realizados em laboratório, foi definido um arranjo de unidades ATL, chamado de OATL (*Open-ended Artificial Transmission Line*), e uma metodologia de medição. Em seguida, foram realizadas medições em aterramentos concentrados (instalados em solos de baixa e alta resistividade) e em aterramentos de torres reais de uma linha de transmissão. Tais medições foram realizadas utilizando uma configuração convencional, que utiliza longos cabos e hastes auxiliares no circuito de corrente, e uma configuração com o arranjo OATL no circuito de corrente.

Os resultados obtidos pelas medições em ambas as configurações e por meio de simulações computacionais foram analisados através do cálculo da impedância impulsiva, da impedância harmônica e da impedância transitória. A comparação dos resultados aponta para a consistência do uso do arranjo OATL em medições de aterramentos, apresentando diferenças percentuais entre 2% e 24%, em comparação com medições convencionais.

Palavras-chave: Linha de transmissão artificial, ATL, medição de aterramentos, resposta de aterramento, impedância impulsiva, resistência de aterramento.

## Abstract

This dissertation studies a new technique for measuring the transient response of grounding systems, notably impulsive impedance, using an arrangement of special conductors in the current circuit. Such conductors, called ATL (Artificial Transmission Line) are solenoids that, due to their constructive characteristics, have high surge impedance and low propagation speed. ATL units replace long cables and do not require the use of auxiliary rods in the current circuit such as in conventional measurements of electrical grounds. Thus, the aim is to drastically reduce the distances involved, facilitating and streamlining the process.

First, through various experiments carried out in the laboratory, an arrangement of ATL units, called the OATL (Open-ended Artificial Transmission Line), and a measurement methodology were defined. Then, measurements were made on concentrated grounding systems (installed on low and high resistivity soils) and on tower grounding of an actual transmission line. Such measurements were made using a conventional configuration, which uses long cables and auxiliary rods in the current circuit, and a configuration with the OATL arrangement in the current circuit.

The results obtained by measurements in both configurations and by means of computer simulations were analyzed through the calculation of impulsive impedance, harmonic impedance and transient impedance. The comparison of the results points to the consistency of the use of the OATL arrangement in grounding measurements, showing percentage differences between 2% and 24%, in comparison with conventional measurements.

Keyword: Artificial Transmission Line, ATL, grounding measurement, grounding response, impulsive impedance, grounding resistance.

---



---

## Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Relevância e Motivação.....	1
1.2	Objetivo .....	2
1.3	Metodologia.....	3
1.4	Organização do texto .....	3
2	Comportamento de Aterramentos Elétricos .....	5
2.1	Introdução .....	5
2.2	Aterramentos em Baixa Frequência.....	5
2.3	Aterramentos em Alta Frequência .....	7
2.3.1	Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência .....	11
2.3.2	Efeitos da Propagação de Ondas no Solo .....	13
2.3.3	Efeito da Intensidade da Corrente .....	15
2.3.4	Influência conjunta dos Fatores .....	15
3	Medição da Resposta de Aterramentos Elétricos.....	17
3.1	Introdução .....	17
3.2	Método da Queda de Potencial .....	18
3.3	Medição de Aterramentos de Torres de LT's .....	21
3.3.1	Medição Impulsiva .....	23
3.4	Considerações Práticas .....	26
4	Aspectos Básicos sobre a Linha de Transmissão Artificial .....	28
4.1	Introdução .....	28
4.2	Características Construtivas e Parâmetros .....	32
4.3	Associação de Unidades ATL.....	39
4.3.1	Associação em Série.....	40
4.3.2	Associação em Paralelo .....	41

---

---

4.4	Configuração de Medição .....	42
5	Resultados Experimentais e Análises.....	45
5.1	Introdução .....	45
5.2	Desenvolvimentos.....	48
5.2.1	Testes em Aterramentos Concentrados .....	48
5.2.2	Testes em Aterramentos Extensos (de linha de transmissão).....	49
5.3	Resultados da Resposta do Aterramento Concentrado em Solo de Baixa Resistividade ( $\rho=200 \Omega\text{m}$ ).....	50
5.4	Resultados da Resposta do Aterramento Concentrado em Solo de Alta Resistividade ( $\rho=2000 \Omega\text{m}$ ).....	56
5.5	Resultados da Resposta do Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão 62	
5.5.1	Resultados obtidos para a Torre 56 (Autoportante).....	63
5.5.2	Resultados obtidos para a Torre 123 (Estaiada).....	67
6	Conclusões e Propostas de Continuidade.....	72
6.1	Introdução .....	72
6.2	Conclusões .....	73
6.3	Propostas de Continuidade.....	75
	Referências Bibliográficas.....	76

---

# 1 Introdução

## 1.1 Relevância e Motivação

O sistema elétrico de potência (SEP) é um complexo conjunto de instalações e equipamentos responsáveis por garantir geração, transmissão, distribuição e consumo da energia elétrica. Desta forma, é fundamental assegurar a qualidade e a continuidade do funcionamento desse sistema, uma vez que interrupções de fornecimento de energia elétrica aos grandes centros consumidores têm grandes impactos sociais e econômicos.

No contexto da transmissão de energia elétrica, o desempenho das linhas de transmissão (LT) é um dos parâmetros utilizado para certificar a qualidade do sistema elétrico. Os desligamentos não-programados de LT's são os responsáveis por afetar tal desempenho, sendo causados, na maioria das vezes, pela incidência direta de descargas atmosféricas nas fases ou nos cabos guardas da linha. Afim de reduzir as taxas de desligamento de LT's, normalmente são empregadas técnicas de redução do valor de impedância do aterramento das torres das linhas de transmissão.

Particularmente no Brasil, o desligamento de LT's é mais frequente devido ao alto índice de incidência de descargas atmosféricas e ao valor elevado de resistividade do solo em grande parte do território. Isso torna a disponibilidade de métodos precisos e confiáveis de medição da resposta de aterramentos de pé-de-torres para a qualificação do desempenho de LT's ainda mais relevante.

Nestas circunstâncias, é imprescindível que as companhias brasileiras de energia disponham de métodos precisos e confiáveis de medição da resposta de aterramentos de pé-de-torres para serem capazes de avaliar o desempenho das LT's e, se necessário, projetar melhorias.

Atualmente, a avaliação da qualidade do aterramento de torres de linhas de transmissão é realizada, na maioria das vezes, por meio do valor da sua resistência medida em baixa frequência. Entretanto, sabe-se que, quando um aterramento é

solicitado por correntes típicas de descargas atmosféricas, sua resposta apresenta características de uma impedância e, por isso, o uso da resistência de baixa frequência como parâmetro de desempenho de LT' torna-se questionável. Uma forma mais adequada de caracterizar a resposta transitória de aterramentos é por meio da impedância impulsiva ( $Z_P$ ) (VISACRO, 2007). Porém, a medição desse parâmetro é uma tarefa complexa que apresenta diversas dificuldades de ordem técnica e prática, tais como a falta de instrumentos dedicados disponíveis no mercado e de metodologias de medição consolidadas. Em razão disso, a medição e uso da resistência de aterramento de pé-de-torre como parâmetro de qualificação do desempenho de LT's ainda são bastante disseminados.

Nesse cenário, esse trabalho procura contribuir para desenvolver uma técnica de medição capaz de obter, de maneira eficiente, precisa e confiável, os valores de impedância impulsiva e de resistência de baixa frequência, contribuindo nos procedimentos de medição desses parâmetros.

## **1.2 Objetivo**

Este trabalho objetiva apresentar, discutir e aperfeiçoar uma técnica de medir a resposta transitória de aterramentos de torres de LT's, que utiliza condutores especiais, chamados de ATL (do inglês, *Artificial Transmission Line*). Tais condutores substituem os cabos convencionais utilizados no circuito de corrente, de forma a diminuir drasticamente as distâncias associadas à prática de medição. Essa melhoria busca facilitar, agilizar e baratear o processo de medição de aterramentos de pé-de-torres, atividade que normalmente demanda um longo período para ser concluída e apresenta um custo elevado.

Tal técnica de medição busca ser capaz de fornecer, além da resistência de baixa frequência do aterramento, o valor de impedância impulsiva, parâmetro mais apropriado para avaliar a qualidade do aterramento frente a correntes típicas de descargas atmosféricas.

### **1.3 Metodologia**

Inicialmente, foi realizada uma investigação sobre o tema na literatura recente. Referências básicas sobre aterramentos e medições, como (VISACRO, 2002) e (VISACRO, 2007) servem de suporte e orientam essa dissertação. Já sobre o tema mais específico, destacam-se os trabalhos (LIMA et al, 2015), (LIMA, 2015) e (MAGALHAES, 2017), nos quais condutores especiais são utilizados para realizar a medição da resposta de aterramentos.

Em seguida, foi feito um estudo experimental dos condutores especiais ATL que serão utilizados na medição da resposta de aterramentos, buscando compreender o seu comportamento. Foram realizadas diversas modificações construtivas e analisadas as respectivas alterações na sua reposta para, assim, definir um modelo de ATL que apresente as melhores características para a aplicação desejada.

Com o modelo de ATL a ser utilizado definido e múltiplas unidades produzidas, foram efetuados diversos experimentos de medição da resposta de aterramentos frente a ondas impulsivas. Os resultados obtidos ao utilizar as unidades ATL no circuito de corrente foram comparados com aqueles que usam cabos convencionais. Também foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa HEM (VISACRO e SOARES, 2005) para aferir a qualidade dos dados obtidos.

### **1.4 Organização do texto**

O texto foi organizado em seis capítulos, incluindo o presente capítulo de Introdução, que apresenta uma visão geral desta dissertação.

O Capítulo 2 apresenta os conceitos básicos relacionados a aterramentos elétricos, dando ênfase na resposta desses aterramentos para sinais de baixa e alta frequência.

No Capítulo 3, são discutidas as técnicas mais comuns de medição de resistência e impedância de aterramentos. Em especial, são exploradas as dificuldades e cuidados necessários para a medição de aterramentos de torres de linhas de transmissão.

O Capítulo 4 trata sobre os condutores especiais ATL utilizados nesse trabalho, analisando suas características construtivas e seus parâmetros. Ademais, uma técnica de medição de aterramento que os utiliza é proposta.

Os principais resultados de medições de aterramentos e simulações computacionais obtidos são apresentados, analisados e discutidos no Capítulo 5.

O Capítulo 6 sintetiza as principais conclusões da dissertação e apresenta propostas de continuidade ao tema. As referências bibliográficas citadas ao longo da dissertação encontram-se listadas ao final do texto.

---

# 2 Comportamento de Aterramentos Elétricos

## 2.1 Introdução

Um aterramento elétrico consiste, basicamente, de eletrodos enterrados no solo e da própria terra que envolve tais eletrodos. As propriedades do solo e a disposição geométrica dos eletrodos definem as características do aterramento. Entretanto, dependendo do tipo de solicitação, um aterramento pode apresentar repostas completamente distintas.

Neste capítulo serão apresentados, de maneira concisa, a teoria básica e os principais conceitos sobre aterramentos elétricos necessários para a compreensão dos trabalhos desenvolvidos. Serão feitas as considerações e as distinções pertinentes à resposta de aterramentos quando são submetidos a correntes de baixa frequência e a correntes impulsivas.

Os desenvolvimentos desse capítulo são embasados principalmente nas referências (VISACRO, 2002) e (VISACRO, 2007), sendo complementados em alguns tópicos específicos por referências mais recentes, apontadas ao longo do texto.

## 2.2 Aterramentos em Baixa Frequência

Para analisar a natureza dos aterramentos elétricos em baixa frequência, é possível utilizar um modelo simplificado baseado na teoria de circuitos. Tal modelo de circuito elétrico deve representar a capacidade de condução de corrente para a terra por meio de elementos resistivos, capacitivos e indutivos.

Constata-se que, quando um trecho de eletrodo enterrado no solo é percorrido por uma corrente elétrica, uma parcela dessa corrente é dissipada para o solo ( $I_T$ ) e o restante flui ao longo do comprimento do eletrodo ( $I_L$ ), como mostrado na Figura 2.1(a).

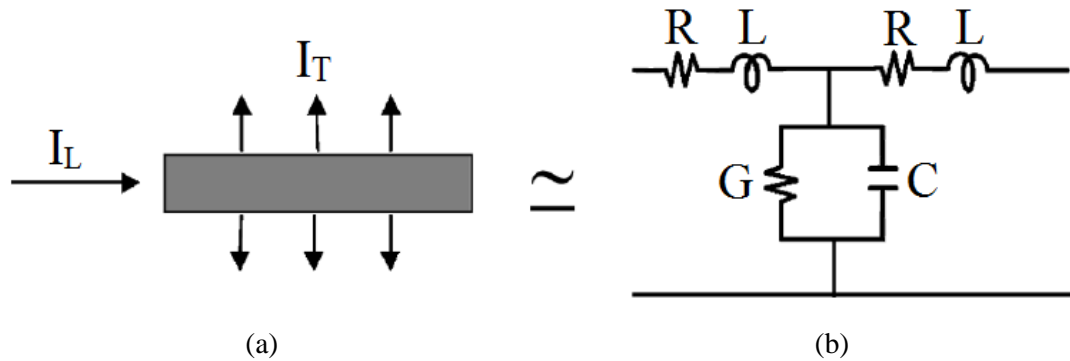


Figura 2.1 - (a) Componentes da corrente em um trecho de eletrodo enterrado e (b) circuito equivalente. Adaptado de (VISACRO, 2007).

A componente longitudinal está relacionada a perdas internas do condutor e ao campo magnético estabelecido no interior e exterior do eletrodo. Os efeitos correspondentes são representados, no circuito equivalente, por uma resistência  $R$  e uma indutância  $L$  em série. Já a componente transversal está associada à dispersão de corrente condutiva e capacitiva, devido ao campo elétrico gerado no solo, sendo retratadas por uma capacitância  $C$  e condutância  $G$  em paralelo no circuito, conforme Figura 2.1(b). Como um aterramento é formado por diversos trechos de eletrodos interligados que formam uma complexa rede de circuitos equivalentes conectados entre si, para uma análise completa, ainda devem ser computados os efeitos mútuos entre todos os elementos.

Entretanto, em muitas aplicações, as correntes injetadas nos aterramentos apresentam baixa frequência, como no caso de curto-circuito. Nesses casos, os efeitos reativos ( $\omega L$  e  $\omega C$ ) podem ser desprezados. Da mesma forma, pode-se desconsiderar a resistência longitudinal dos condutores, já que, nessa faixa de frequência o efeito pelicular é pequeno e, conseqüentemente, as perdas internas dos condutores também.

Dessa forma, o modelo de circuito equivalente de um trecho de eletrodo pode ser simplificado, passando a ser representado apenas pela condutância transversal  $G$ , como mostrado na Figura 2.2. Ainda assim, para estudar um aterramento em baixa frequência, os efeitos mútuos condutivos entre cada trecho de eletrodo precisam ser considerados.



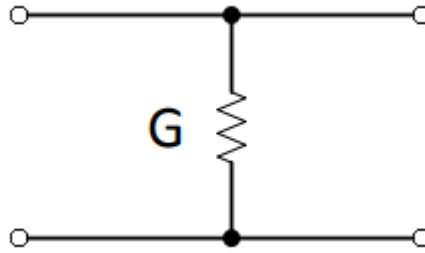


Figura 2.2 – Circuito equivalente aproximado de um trecho de eletrodo enterrado em condição de baixa frequência

Nesse caso, o conjunto de eletrodos passa a ser enxergado apenas como uma resistência de aterramento de baixa frequência ( $R_T$ ), cujo valor é calculado pela razão entre a elevação de potencial do eletrodo ( $V$ ) em relação ao infinito e a corrente ( $I$ ) injetada no aterramento:

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

Contudo, sabe-se que as características do solo em que os eletrodos estão enterrados afetam o valor da resistência de aterramento e, especificamente, é possível comprovar que a resistividade do solo ( $\rho$ ) é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento (VISACRO, 2002). Portanto, fatores que alteram significativamente o valor da resistividade (por exemplo, umidade, temperatura e tipo de solo) influenciam, na mesma proporção, o valor da resistência de aterramento.

### 2.3 Aterramentos em Alta Frequência

Em uma perspectiva mais geral, considerando toda a faixa de frequência, um aterramento é caracterizado como uma impedância complexa, como já discutido e ilustrado na Figura 2.1(b). Ao submeter um aterramento a ondas de corrente que possuem amplo espectro de frequência, como ondas impulsivas semelhantes a descargas atmosféricas, é possível determinar no domínio da frequência um valor de impedância de aterramento para cada componente de frequência. Esse termo é definido como impedância harmônica, descrita pela equação (2.2), onde  $V(\omega)$  e  $I(\omega)$  são a tensão e a corrente no domínio da frequência:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.2)$$

Ao percorrer um aterramento, a relação entre a corrente condutiva e corrente capacitiva dissipada no solo é proporcional à relação  $\sigma/\omega\epsilon$ , onde  $\sigma$  representa a condutividade do solo,  $\epsilon$  a permissividade do solo e  $\omega$  a frequência angular (VISACRO, 2007). Portanto, diante de fenômenos lentos, é evidente que a corrente condutiva predomina e pode-se desprezar a corrente de deslocamento. Porém, ao considerar eventos com componentes de alta frequência, a corrente capacitiva torna-se significativa, especialmente em solos de alta resistividade. A Figura 2.3 ilustra o comportamento do módulo e do ângulo da impedância harmônica para um eletrodo horizontal de 50 m enterrado em um solo de resistividade de 1000  $\Omega\text{m}$ .

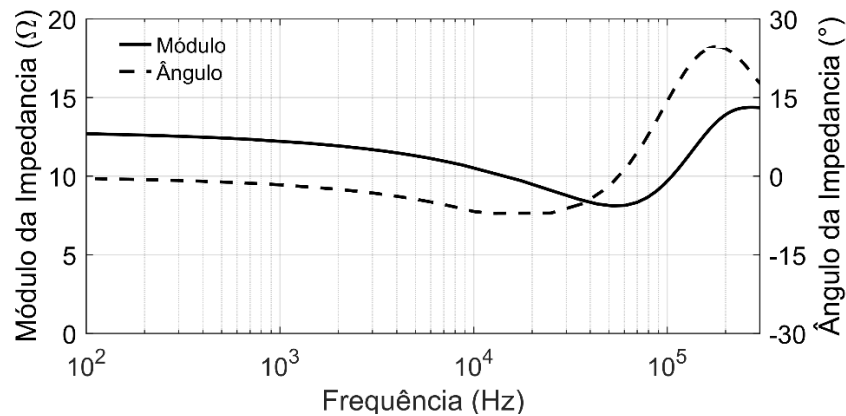


Figura 2.3 – Impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 50 m enterrado em solo de 1000  $\Omega\text{m}$ .

Apesar de corresponder a um caso específico, o gráfico acima descreve o comportamento típico de aterramentos no domínio da frequência: em baixas frequências, o aterramento comporta-se como uma resistência, apresentando módulo constante e ângulo nulo. Aumentando-se a frequência, o módulo e a fase da impedância decrescem gradativamente, devido ao fluxo de corrente capacitiva no solo. Com o aumento adicional da frequência, o efeito indutivo passa influenciar gradativamente na resposta do eletrodo. A impedância continua a diminuir até atingir seu valor mínimo e o ângulo cruzar o zero. A partir desse ponto, com o aumento da frequência, o efeito indutivo passa a prevalecer. O ângulo torna-se positivo e o módulo passa a crescer.

Para fenômenos rápidos no domínio do tempo, é usual definir a impedância transitória, dada pela razão da tensão desenvolvida no aterramento  $V(t)$  pela corrente injetada  $I(t)$ , conforme a equação (2.3). A impedância transitória calculada durante um intervalo de tempo de variação lento, como na cauda de ondas impulsivas, tem valor próximo à resistência de baixa frequência, visto que a cauda da onda está associada às suas componentes de baixa frequência.

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)} \quad (2.3)$$

Apesar da importância da definição do termo impedância harmônica e da impedância transitória, é bastante desejável dispor de um parâmetro conciso, capaz de qualificar um aterramento frente a fenômenos impulsivos no domínio do tempo. Para esse propósito, é definida a impedância impulsiva ( $Z_P$ ), obtida pela razão entre o valor de pico da elevação de potencial do aterramento ( $V_P$ ) e o valor de pico da corrente injetada ( $I_P$ ).

$$Z_P = \frac{V_P}{I_P} \quad (2.4)$$

Usualmente, os picos das ondas de tensão e de corrente não ocorrem simultaneamente no tempo, devido às reatâncias de natureza indutiva e capacitiva de um aterramento. Apesar disso, o conceito de impedância impulsiva é muito utilizado, visto que permite uma rápida estimativa do valor máximo da elevação de potencial em um aterramento para qualquer valor de corrente impulsiva injetada. Tal parâmetro é muito apropriado para estudos relacionados a análises de sensibilidade, sobretudo no âmbito de desempenho de linhas de transmissão.

É importante notar que o valor da impedância impulsiva de um aterramento não varia apenas com a configuração do arranjo ou com as características do solo, mas também com a forma de onda do fenômeno solicitante, principalmente com o tempo de frente da onda. A Figura 2.4 exemplifica esse comportamento:

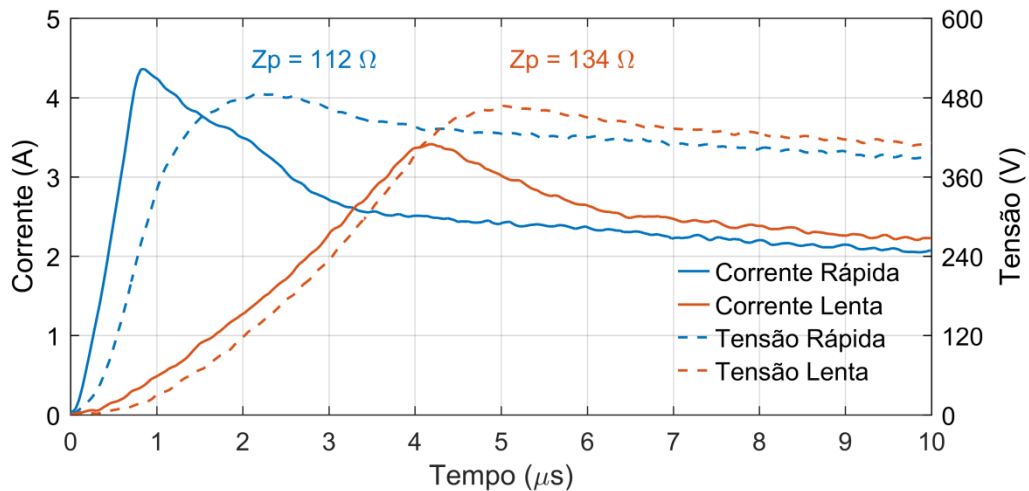


Figura 2.4 – Resposta impulsiva de um mesmo aterramento para ondas com tempos de frente diferentes. Para a onda rápida, com tempo de frente de  $0,8 \mu\text{s}$ , tem-se uma impedância impulsiva de  $112 \Omega$ , enquanto que, para a onda lenta, com tempo de frente de  $4 \mu\text{s}$ , a impedância impulsiva medida é de  $134 \Omega$ . Em ambos os casos, é possível obter uma estimativa da resistência de baixa frequência pelo valor instantâneo de corrente e tensão na cauda das ondas:  $R_T = 187 \Omega$ .

O gráfico da Figura 2.4 apresenta duas formas de onda de correntes impulsivas com tempos de frente distintos ( $0,8 \mu\text{s}$  para a onda rápida e  $4 \mu\text{s}$  para a onda lenta) e as respectivas elevações de potencial medidas. Tais ondas foram injetadas em um aterramento composto por 10 hastes verticais de 1 m instalado em solo de resistividade próxima de  $2000 \Omega\text{m}$ . Observa-se que, para a onda lenta, a impedância impulsiva obtida é de  $134 \Omega$ , ao passo que, para a onda rápida, é de  $112 \Omega$ , uma diferença maior que 15%. Destaca-se ainda que é possível obter uma estimativa da resistência de baixa frequência tomando a razão dos valores instantâneos de tensão e de corrente na cauda das ondas, sendo em ambos os casos, próximo de  $187 \Omega$ .

Existem algumas maneiras distintas de obter o valor da impedância impulsiva de um aterramento. A primeira, e mais usual, ocorre por meio de medições realizadas utilizando geradores de impulso, como será discutido mais a frente neste trabalho. Outra forma de calcular  $Z_P$  é por meio de expressões analíticas, como as apresentadas em (VISACRO e SILVEIRA, 2016; ALIPIO E VISACRO, 2014). Por último, a impedância impulsiva pode ser determinada através do coeficiente de impulso ( $I_C$ ) (VISACRO e ROSADO, 2009), sendo esse parâmetro definido pela razão entre  $Z_P$  e  $R_T$ , conforme a equação (2.5).

$$I_C = \frac{Z_P}{R_T} \quad (2.5)$$

O gráfico da Figura 2.5 exibe o perfil típico da curva do coeficiente de impulso  $I_C$  em função do comprimento do eletrodo de aterramento. Nota-se que inicialmente  $I_C$  mantém-se constante até alcançar o chamado de comprimento efetivo ( $L_{EF}$ ), conceito que será apresentado posteriormente. Em seguida, a curva  $I_C$  aumenta gradativamente com o crescimento do comprimento  $L$  do eletrodo, podendo apresentar valor menor, maior ou igual à unidade. Percebe-se, ainda que, para eletrodos muito curtos, o valor do coeficiente de impulso pode variar entre 0,4 a 1, dependendo se o solo apresenta alta ou baixa resistividade, respectivamente.

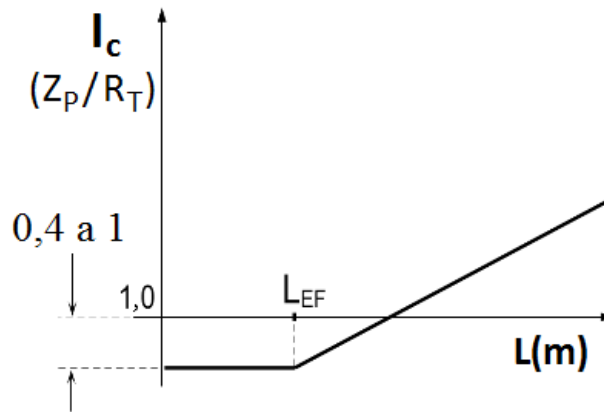


Figura 2.5 – Perfil típico da curva do coeficiente de impulso  $I_C$  em função do comprimento  $L$  do eletrodo enterrado. Adaptado de (VISACRO e SILVEIRA, 2016)

### 2.3.1 Variação dos Parâmetros do Solo com a Frequência

A dependência da frequência da resistividade ( $\rho$ ) e da permissividade ( $\epsilon$ ) do solo são fenômenos bem discutidos na literatura (SMITH-ROSE, 1933; SCOTT, 1966; VISACRO E PORTELA, 1987), apresentando diversos resultados que apontam, de forma geral, que tais parâmetros decrescem com o aumento da frequência, enquanto a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) permanece similar à do ar. Porém, a falta de formulações capazes de expressar esses comportamentos de forma precisa fazia com que esses efeitos fossem, muitas vezes, desprezados.

Trabalhos recentes (VISACRO et al, 2011; VISACRO e ALIPIO, 2012; ALIPIO e VISACRO, 2013) que investigaram tal fenômeno concluíram que a suposição de

valores constantes para resistividade e permissividade, leva a erros consideráveis em simulações de injeção de correntes impulsivas em aterramentos quando comparados com resultados reais de medições, especialmente em solos de alta resistividade. Além disso, verificou-se que a variação da resistividade do solo apresenta uma notável dependência com o seu valor em baixas frequências, enquanto que a variação da permissividade relativa, apesar de apresentar uma grande dispersão em baixas frequências, tendem a valores próximos em alta frequência.

As equações (2.6) e (2.7), formuladas em (VISACRO e ALIPIO, 2012) descrevem, respectivamente, a variação da resistividade do solo ( $\rho$ ) e da permissividade relativa do solo ( $\epsilon_r$ ) para frequências ( $f$ ) entre 10 kHz e 4 MHz, na qual  $\rho_0$  refere-se à resistividade do solo em 100 Hz:

$$\rho(f) = \rho_0 \{1 + [1,2 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0,73}] \cdot [(f - 100)]^{0,65}\}^{-1} \quad (2.6)$$

$$\epsilon_r(f) = 7,6 \cdot 10^3 \cdot f^{-0,4} + 1,3 \quad (2.7)$$

A Figura 2.6 exemplifica, no domínio da frequência, o comportamento da resistividade do solo para três tipos de solos diferentes (com resistividade de baixa frequência de 100  $\Omega\text{m}$ , 1000  $\Omega\text{m}$  e 10000  $\Omega\text{m}$ ) e da permissividade do solo, de acordo com as equações (2.6) e (2.7).

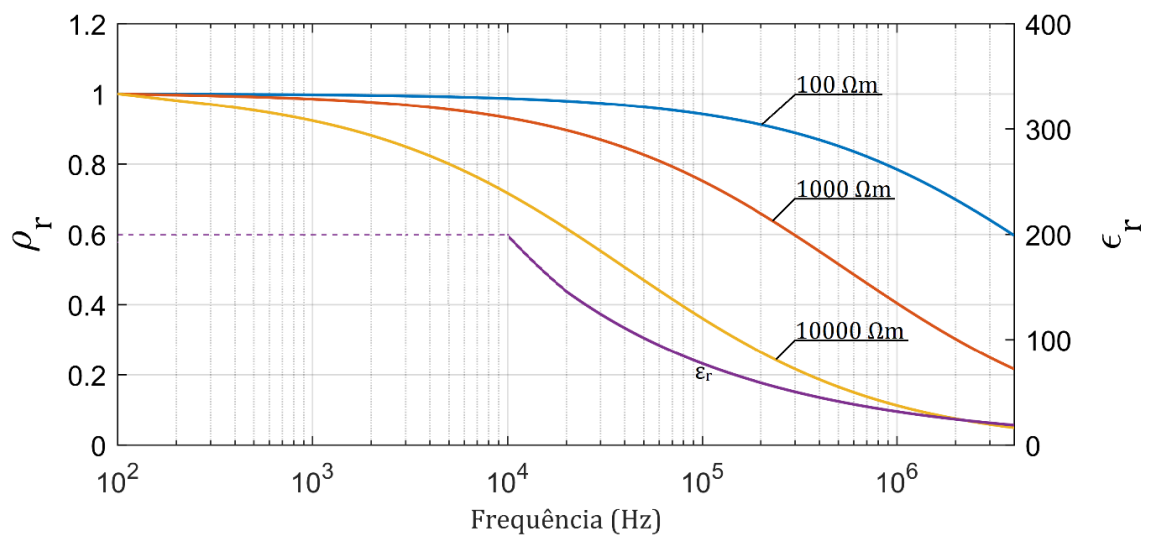


Figura 2.6 – Dependência da frequência da permissividade e da resistividade do solo para diferentes tipos de solo (100  $\Omega\text{m}$ , 1000  $\Omega\text{m}$  e 10000  $\Omega\text{m}$ ).

Pelo gráfico, verifica-se que a resistividade relativa do solo apresenta maior variação para o solo de alta resistividade ( $10000 \Omega\text{m}$ ), sendo que, neste caso, na frequência de 1 MHz, a resistividade do solo diminuiu para 10% do seu valor em 100 Hz. Já para o solo de  $100 \Omega\text{m}$ , a resistividade reduziu para 60% nessa mesma faixa de frequência.

Em relação ao comportamento da permissividade relativa do solo, em (VISACRO e ALIPIO, 2012) os autores estabelecem que, para baixas frequências, seja adotado o valor de 200 e que, a partir de 10 kHz, adote os valores fornecidos pela equação (2.7), que estipula que, a medida que a frequência aumenta, a permissividade relativa diminui, tendendo para aproximadamente 20 em alta frequência, como mostra o gráfico da Figura 2.6.

### ***2.3.2 Efeitos da Propagação de Ondas no Solo***

Como abordado na seção 2.2, quando um aterramento é submetido a uma corrente de baixa frequência, as perdas longitudinais podem ser desprezadas e, assim, o aterramento apresenta um potencial constante em toda sua extensão. Contudo, frente a correntes de alta frequência, as perdas longitudinais se tornam relevantes e a condição de equipotencialidade deixa de existir.

Para a melhor compreensão dessa situação, um aterramento pode ser tratado como uma linha de transmissão imersa em um meio com perdas, ou seja, as ondas de corrente e tensão estão sujeitas a efeitos de propagação, a saber, atenuação e distorção. Dessa forma, uma onda que propaga em um aterramento está submetida a perdas de energia, resultando na diminuição de sua amplitude ao longo do eletrodo. Ademais, como tais atenuações são maiores com o aumento da frequência e da condutividade do solo, cada componente de frequência da onda viajante será submetida a uma atenuação diferente, o que leva à distorção desse sinal, sobretudo da frente da onda, como mostra a Figura 2.7.

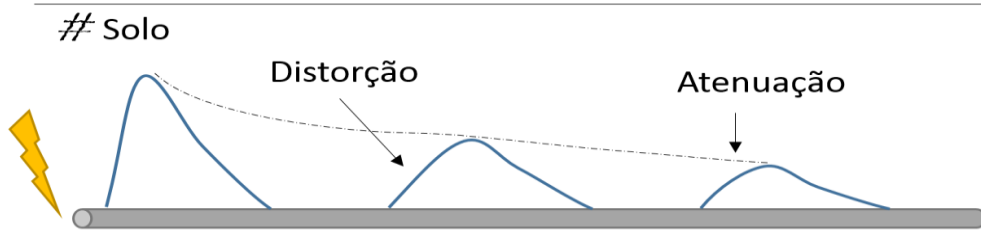


Figura 2.7 – Distorção e atenuação de uma onda ao longo de um eletrodo enterrado no solo.

Como consequência da atenuação das ondas propagantes em um aterramento, surge o conceito de comprimento efetivo do eletrodo ( $L_{ef}$ ), introduzido em (GUPTA e THAPAR, 1980). Este corresponde ao comprimento de eletrodo a partir do qual o seu prolongamento não resulta mais na redução da impedância impulsiva, devido às atenuações das componentes de alta frequência. O aumento do comprimento do eletrodo além de  $L_{ef}$  resulta apenas na diminuição da resistência de baixa frequência.

O valor do comprimento efetivo diminui com o aumento da condutividade do solo e da frequência, já que ambos os fatores são responsáveis pelo crescimento da atenuação das ondas propagantes em um aterramento. A Figura 2.8 demonstra o comportamento do conceito de comprimento efetivo: o gráfico expressa a impedância impulsiva de um eletrodo horizontal em função do seu comprimento para três solos distintos e deixa evidente que, após certo limite de comprimento de eletrodo para cada tipo de solo, não há redução significativa do valor de impedância impulsiva.

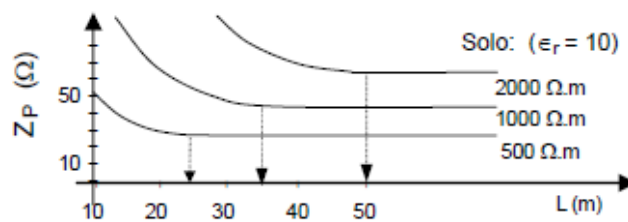


Figura 2.8 – Curva da impedância impulsiva pelo comprimento do eletrodo horizontal para diferentes valores de resistividade do solo. O início da região plana identifica o valor do comprimento efetivo. Adaptado de (VISACRO, 2007).

Desta forma, constata-se que um baixo valor de resistência em baixa frequência  $R_{BF}$  não resulta necessariamente em um baixo valor de impedância impulsiva  $Z_P$ , apenas



nos casos de eletrodos muito curtos. Para eletrodos longos (comprimento maior que o comprimento efetivo), a  $R_{BF}$  será sempre menor que  $Z_P$ .

### ***2.3.3 Efeito da Intensidade da Corrente***

O processo de ionização do solo ocorre quando o campo elétrico na região circunvizinha de eletrodos enterrados ultrapassa determinado valor, chamado de *Campo Elétrico Crítico* ( $E_{CR}$ ). A ocorrência desse fenômeno depende da resistividade e umidade do solo, da dimensão do aterramento e, principalmente, da intensidade da corrente injetada (LIEW E DARVENIZA, 1974), adotando-se, muitas vezes, valores de  $E_{CR}$  entre 300 kV/m a 400 kV/m (CIGRÉ, 1991) (MOUSA, 1994).

Na ionização do solo, o elevado valor de campo elétrico provoca descargas disruptivas no meio, originando canais ionizados de plasma que apresentam alta condutividade. Desta forma, o fenômeno pode ser modelado como um aumento da área efetiva do eletrodo (BELLASCHI et al, 1942) ou pela redução da resistividade do solo na região próxima do eletrodo (LIEW e DARVENIZA, 1974).

Em termos práticos, a ionização do solo é equivalente à redução da impedância do aterramento, resultando na melhoria da resposta transitória de eletrodo concentrados. Entretanto, para aterramentos extensos, como os longos cabos contrapeso típicos de torres de linhas de transmissão brasileiras, esse efeito não é tão importante, podendo ser desprezado (VISACRO, 2015).

### ***2.3.4 Influência conjunta dos Fatores***

O estudo da resposta transitória de aterramentos submetidos a correntes típicas de descargas atmosféricas é uma tarefa complicada, visto que todos os efeitos discutidos nos tópicos anteriores ocorrem simultaneamente.

Cada fator irá exercer influência no comportamento do aterramento, entretanto, dependendo das características da corrente e da configuração dos eletrodos, um efeito pode prevalecer sobre os demais. Saber identificar e atribuir um determinado comportamento da impedância de aterramento aos fenômenos discutidos é um trabalho

diffícil e, se não realizado com o devido cuidado, pode levar a análises e interpretações equivocadas.

Atualmente, com inúmeros estudos presente na literatura, avanços computacionais, diversas modelagens e formulações para cada fenômeno, é possível realizar o estudo do comportamento de aterramentos de forma sistemática, explorando cada aspecto de forma separada. Desta forma, é possível minimizar a probabilidade de ocorrência de eventuais erros nos estudos de resposta de aterramentos.

# 3 Medição da Resposta de Aterramentos Elétricos

## 3.1 Introdução

Como apresentado no Capítulo 2, a avaliação da qualidade de aterramentos elétricos é feita principalmente por meio da resistência ou impedância de aterramento. A determinação correta e de forma precisa destes parâmetros, por meio de medições, se torna uma tarefa fundamental e relevante.

A medição da resposta de aterramentos é uma tarefa complexa e trabalhosa, podendo apresentar diversas complicações que, caso não sejam tomados os devidos cuidados, podem levar a erros e análises equivocadas, além de consequências indesejáveis.

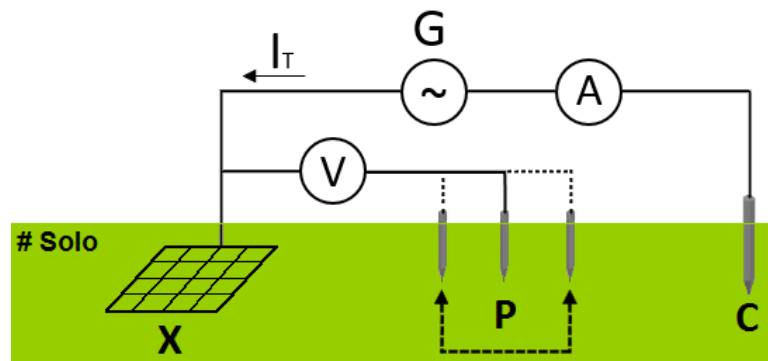
Assim, esse capítulo busca descrever o método considerado mais consistente de medição de aterramentos elétricos, tanto de resistência de baixa frequência quanto da impedância, abordando as limitações e dificuldades encontradas durante as práticas de medição e maneiras de contorná-las. É discutida, em especial, a medição de aterramentos de torres de linhas de transmissão utilizando ondas impulsivas, que se trata do foco principal dessa dissertação.

As normas e estudos técnicos mais relevantes sobre o tema (IEEE STD 81, 2012; IEEE STD 81.2, 1991; CIGRÉ, 2005) também serviram como base para a elaboração dessa seção.

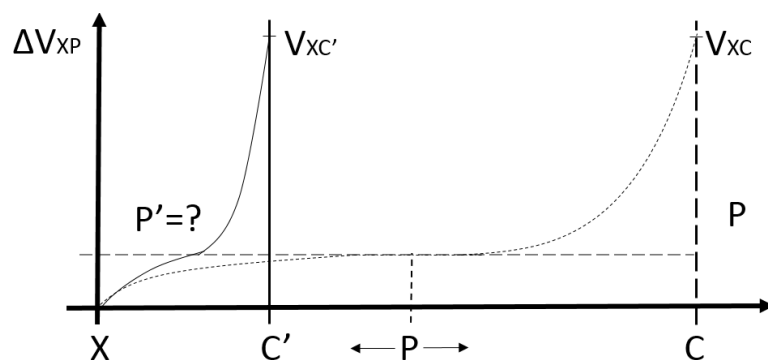
### 3.2 Método da Queda de Potencial

A técnica considerada de maior confiabilidade utilizada para medição de resistência ou impedância de aterramentos é chamada de *Método da Queda de Potencial*. Esse tópico sintetiza os desenvolvimentos do artigo (VISACRO et al, 2019), apresentando e discutindo tal técnica, uma vez que ela serve de base para os experimentos realizados nesta dissertação

A Figura 3.1(a) mostra uma montagem típica para a implementação da medição de aterramento pelo Método da Queda de Potencial. Nela, uma fonte G é usada para injetar uma corrente  $I_T$  no sistema de aterramento, representado por uma malha X, que irá percorrer uma porção do solo e retornar por um eletrodo auxiliar de corrente C. Tal circulação de corrente causa uma elevação de potencial no solo (em inglês, *Grounding Potential Rise*, ou GPR), que será detectada pelo eletrodo auxiliar de potencial P. Com a medição dos valores de corrente e de tensão, que são realizados pelos medidores A e V na figura, é possível calcular o valor da resistência de aterramento  $R_T$ .



(a)



(b)

Figura 3.1 – (a) Esquema de medição de aterramento seguindo o Método da Queda de Potencial e (b) perfil de potencial no solo devido ao deslocamento da haste P entre o aterramento X e o retorno auxiliar de corrente C.

Deslocando a haste sonda de potencial P entre os eletrodos X e C e registrando-se os valores da diferença de potencial  $V_{XP}$ , obtém-se a curva do perfil de potencial, mostrada na Figura 3.1(b). É possível observar a existência de uma região plana nessa curva, a qual denota queda de tensão desprezível entre dois pontos consecutivos, ou seja, quase toda a diferença de potencial entre o eletrodo X e um ponto infinitamente afastado localiza-se até esse patamar, chamado também de terra remoto. Para uma medição confiável da resistência ou impedância de aterramento, é necessário garantir-se que a haste P esteja localizada no patamar de potencial, onde a influência dos eletrodos auxiliares é desprezível.

A existência do terra remoto no perfil de potencial do solo é garantida se o eletrodo C for posicionado suficientemente afastado do aterramento X, assegurando que não há acoplamento mútuo entre tais eletrodos. A Figura 3.1(b) expõe também um caso em que a haste C' está posicionada mais próxima do aterramento, de forma que a distância XC' é tão pequena que não é mais possível identificar a região plana na curva do perfil de potencial do solo. Por isso, é recomendado que a distância XC seja de pelo menos cinco vezes maior que a maior dimensão do aterramento sob teste (VISACRO, 2002; IEEE STD 81, 2012) e que sejam realizadas medições sucessivas enquanto se desloca a haste de potencial P, com o intuito de se localizar a região do patamar de potencial (CIGRÉ, 2005).

Na prática, recomenda-se que, se em três medições consecutivas não ocorra uma variação expressiva do valor da resistência de aterramento (menor que 3%), pode-se considerar que o patamar foi atingido: a primeira realizada com a haste P posicionada próxima de 60% da distância XC e as outras duas variando cerca de 10% dessa distancia em torno do ponto inicial. Caso seja detectado que a curva de potencial não apresenta um patamar bem definido, possivelmente o aterramento X e o eletrodo C ainda estão próximos, portanto à distância XC deve ser aumentada e o processo de medição repetido até que resultados satisfatórios sejam obtidos (VISACRO, 2002; CIGRÉ, 2005; IEEE STD 81, 2012).

Outra prática aconselhável é a repetição do procedimento de medição com o eletrodo auxiliar de potencial P em direção oposta ao eletrodo de corrente C ou em direção ortogonal. Essa ação permite a comparação de resultados obtidos e aumenta a confiabilidade do processo. Há casos em que condutores enterrados no solo (tubulações,

---

cabos ou outros aterramentos) e estendidos na mesma direção da medição, são responsáveis por modificar a distribuição de potencial no solo, levando a uma falsa identificação do patamar de potencial e valores errados de resistência (VISACRO, 2002; IEEE STD 81, 2012).

Em relação à fonte utilizada na montagem de medição, essa deve ser capaz de fornecer uma corrente elevada o suficiente para sensibilizar os sistemas de medição e minimizar a interferência de sinais espúrios presentes no solo (VISACRO et al, 2019; CIGRÉ, 2005; IEEE STD 81, 2012). Por isso, deve-se assegurar que o eletrodo de corrente C apresente baixa resistência de aterramento, caso contrário é possível que ele limite a corrente fornecida pela fonte e que a maior parte da tensão fornecida pela fonte seja alocada sobre ele. Nessa condição, hastes adicionais podem ser cravadas no solo em paralelo com o eletrodo C para diminuir o valor da sua resistência, aumentar a corrente injetada no aterramento e melhorar a relação sinal-ruído da queda de potencial no aterramento. Se ainda assim os sinais presentes no solo interferirem na medição, filtros podem ser usados, com o objetivo de atenuar tais sinais com frequências diferentes daquela utilizada no experimento (CIGRÉ, 2005; IEEE STD 81.2, 1991).

A maioria dos instrumentos comerciais utilizados na medição de resistência de aterramento, chamados de terrômetro, operam com sinais de baixa frequência, nas proximidades de 100 Hz (VISACRO, 2002). Dessa forma, o acoplamento eletromagnético entre os cabos do circuito de tensão e do circuito de corrente é, muitas vezes, desprezado. Porém, no caso de extensas malhas de aterramentos que apresentam baixo valor de resistência e cujo processo de medição necessita de longos cabos auxiliares para alcançar o terra remoto, o acoplamento eletromagnético se torna significativo, mesmo em baixa frequência, podendo afetar a medição (IEEE STD 81, 2012). A minimização do efeito desse acoplamento pode ser feita com o devido distanciamento entre os cabos utilizados ou posicionando os cabos em direção oposta/ortogonal.

### 3.3 Medição de Aterramentos de Torres de LT's

Os sistemas de aterramento de torres de linhas de transmissão são, sobretudo devido à alta resistividade do solo brasileiro, constituídos de longos cabos contrapeso, estendidos ao longo da faixa de servidão da LT e conectados à fundação da estrutura, como no exemplo da Figura 3.2. O comprimento de tais cabos varia com a resistividade do solo em que está instalado, buscando obter valores de resistência suficientemente baixos para satisfazer os limites de desligamentos impostos pelas normas de desempenho de linha (ONS, 2016).

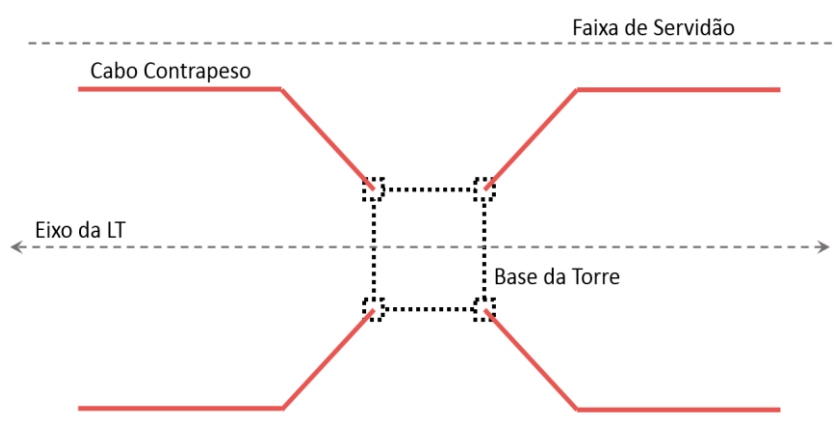


Figura 3.2 – Arranjo típico de aterramento de torres metálicas autoportantes de linhas de transmissão, composto por cabos contrapeso.

A grande maioria das linhas de transmissão possuem cabos de blindagem para a proteção contra incidência direta de descargas atmosféricas nos condutores de fase. Tais cabos deverão estar conectados ao aterramento, seja por meio da própria estrutura (no caso de torres metálicas) ou por um cabo de descida (no caso de torres de madeira ou concreto). Esse cenário dificulta a medição da resistência de aterramento utilizando equipamentos que empregam correntes de baixa frequência, visto que uma parcela da corrente injetada na base da torre será desviada para torres adjacentes via cabo da blindagem, como mostra a Figura 3.3. Dessa forma, o valor obtido pela medição será o valor da resistência de aterramento equivalente do conjunto de torres da linha de transmissão, e não apenas do aterramento daquela torre específica.

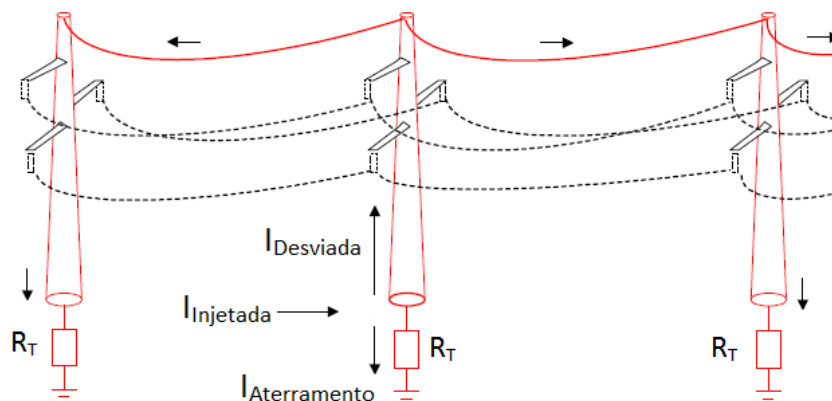


Figura 3.3 – Aterramentos de torres de uma LT estão conectados via cabos de blindagem, levando a uma divisão da corrente injetada. Adaptado de (CIGRE, 2005)

A desconexão do cabo guarda para realizar a medição da resistência de baixa frequência é uma tarefa trabalhosa e muitas vezes inviável, já que necessita ou de desenergizar a linha ou utilizar uma equipe especializada em trabalhos de linha viva. Uma alternativa, possível em alguns casos, consiste em desconectar os cabos contrapeso para posteriormente interligá-los em um ponto comum para efetuar a medição, ou então, realizar a medição em cada cabo separadamente. Além de não ser sempre possível de executar, essa prática ainda desconsidera o papel do concreto e das ferragens presente nas fundações das torres, que funcionam como elementos do aterramento, podendo ter valores de resistência comparáveis com a resistência de eletrodos (THAPAR et al., 1989).

Outra solução mais simples para a medição de resistência de aterramento de torres de LT's, sem a desconexão de cabos guardas ou cabos contrapesos, consiste em utilizar instrumentos especiais que injetam sinais de alta frequência (10 a 30 kHz) (CIGRÉ, 2005). Nessa faixa de frequência o efeito pelicular é pronunciado, tornando a impedância longitudinal dos cabos guardas muito maior que a resistência do aterramento. Assim, a parcela de corrente que flui para torres próximas diminui significativamente, podendo ser desprezada. A medição fornecerá valores muito próximos da resistência de aterramento da torre sob teste.

Quando instrumentos de alta frequência são usados, são necessários cuidados adicionais durante a medição: os acoplamentos eletromagnéticos se tornam muito



acentuados se os cabos auxiliares de corrente e potencial forem dispostos paralelos no solo. Desta forma, é imprescindível que tais condutores sejam colocados em direção oposta para realizar uma medição precisa do valor da resistência de aterramento (VISACRO et al, 2019).

Mesmo com a aplicação de instrumentos de alta frequência na medição de aterramentos de LT, uma parte significativa da corrente ainda pode fluir para torres adjacentes, principalmente nos casos em que a resistência do aterramento da torre sob teste apresenta valor elevado (VISACRO et al, 2019). Há situações em que a desconsideração dessa parcela de corrente pode levar a erros na medição maiores que 50% (VISACRO et al, 2019).

Mesmo em circunstâncias que possibilitem o uso de instrumentos de alta frequência na medição da resistência de aterramento com erros reduzidos, é importante salientar que essa resistência medida em uma frequência específica é diferente da resistência de baixa frequência e da impedância impulsiva. Essa distinção é ainda mais marcante em solos de alta resistividade, devido aos efeitos da dependência da frequência e da corrente capacitiva, mostrando que tal resistência não é representativa da resposta transitória do aterramento frente a descargas atmosféricas.

Desse modo, se torna cada vez mais atrativa a medição da impedância impulsiva de aterramentos de torres para a avaliação de desempenho de linhas de transmissão: primeiro porque esse parâmetro expressa mais adequadamente a resposta de aterramentos frente a descargas atmosféricas (VISACRO, 2018); e segundo porque, devido às componentes de alta frequência presentes na frente da onda impulsiva, a medição desse parâmetro pode ser realizada sem a desconexão dos cabos de blindagem, fornecendo resultados com pequenos erros (VISACRO et al, 2019).

### ***3.3.1 Medição Impulsiva***

A medição da impedância impulsiva pode ser realizada seguindo o *Método da Queda de Potencial*, apresentado no item 3.2, dispendo-se de alguns cuidados. A Figura 3.4 apresenta uma configuração típica para esse tipo de medição.

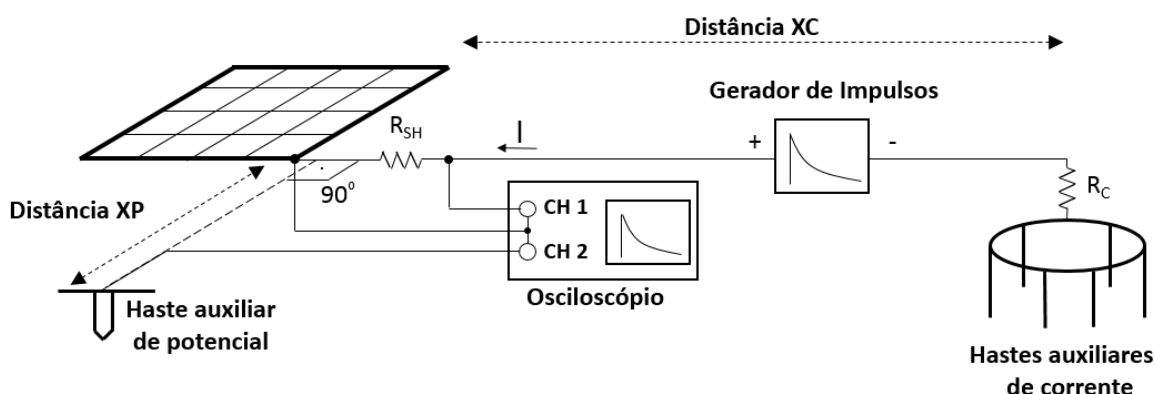


Figura 3.4 – Configuração típica de medição impulsiva, seguindo o método da queda de potencial.

Na configuração da Figura 3.4, um gerador de impulsos é utilizado como fonte de corrente, enquanto um osciloscópio é responsável por medir a corrente injetada no aterramento, através de um resistor shunt ( $R_{SH}$ ), e medir a elevação de potencial do solo (GPR). Outro resistor ( $R_C$ ) é encarregado de realizar o casamento de impedância entre o cabo do circuito de corrente e as hastas auxiliares, evitando assim a ocorrência de reflexões que poderiam atrapalhar a medição. Observa-se também que os cabos auxiliares de corrente e potencial são dispostos em direção ortogonal, buscando reduzir a ocorrência de acoplamentos eletromagnéticos entre si, bem como entre estes e os eletrodos de aterramento. Por fim, diversas hastas são usadas no retorno de corrente, buscando aumentar a corrente injetada no aterramento e aumentar a elevação de potencial no aterramento, conforme já discutido anteriormente.

Nas medições de impedância impulsiva realizadas nesta dissertação, o gerador de ondas impulsivas portátil utilizado foi apresentado em trabalhos anteriores (GUIMARÃES, 2013; MAGALHÃES, 2017). Tal gerador é capaz de fornecer ondas com formato côncavo no início, similar ao formato de descargas reais (VISACRO, 2005), além de prover até 1,5 kV de pico e o tempo de frente ajustável. Ao variar alguns componentes do circuito, foi possível alterar o tempo de frente da onda dentro da faixa de  $3 \mu s$  a  $5 \mu s$ , valores típicos de primeiras descargas atmosféricas (VISACRO, 2005). Na Figura 3.5 é apresentada uma forma de onda de tensão estabelecida pelo gerador, com tempo de frente de  $5 \mu s$  e tempo de meia onda de  $100 \mu s$ .

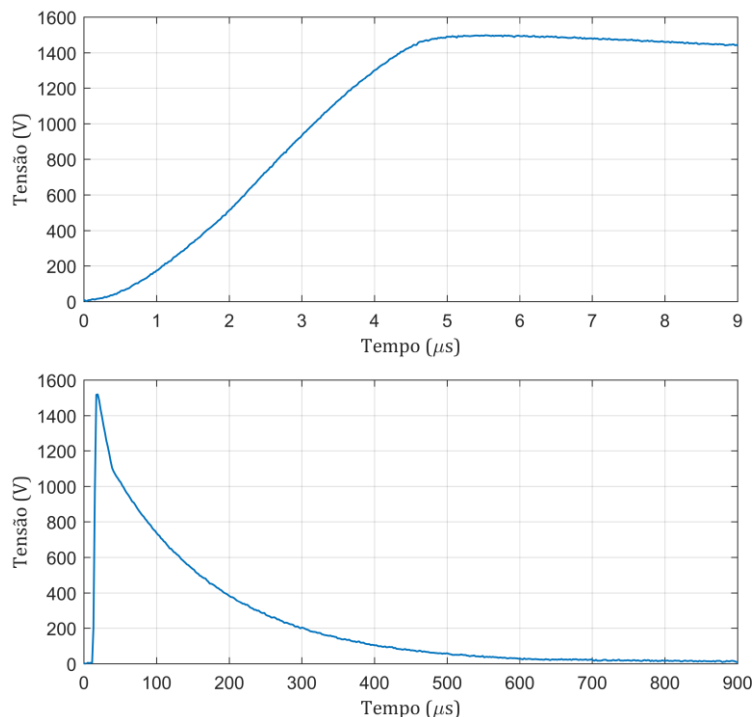


Figura 3.5 – Detalhe da frente e da cauda da onda obtida com o gerador impulsivo utilizado nessa dissertação, cuja amplitude é de 1,5kV, tempo de frente de 5  $\mu$ s e tempo de meia onda de 100  $\mu$ s.

Após realização da medição e com as formas de onda da corrente injetada e da elevação de potencial do solo salvas no osciloscópio, é possível calcular não só a impedância impulsiva pelos valores de pico de tensão e corrente, mas também a impedância harmônica  $Z(\omega)$ , pela transformada de Fourier dos sinais, e a impedância transitória  $Z(t)$ . Isso mostra que, com apenas a medição impulsiva, é possível obter diversas informações sobre a resposta do aterramento sob teste, tanto frente a descargas atmosféricas, quanto para sinais com frequências definidas.

Nesse contexto, nos últimos anos instrumentos específicos para a medição de impedância impulsiva vêm sendo desenvolvidos. O *Electric Power Research Institute* (EPRI) desenvolveu em 2008 o Zed-Meter (EPRI, 2008), um instrumento portátil de medição de impedância de aterramentos de torres de linhas de transmissão. Tal instrumento realiza a medição injetando repetidamente no aterramento pulsos de tensão de baixa amplitude com forma de onda semelhante a descargas atmosféricas, calculando a impedância transitória  $Z(t)$  através da média dos valores de corrente e tensão obtidos.

Recentemente, foi desenvolvido no LRC um instrumento portátil e de baixo custo para a medição de impedância impulsiva de aterramentos, equipado com um processador digital de sinais (DSP), um gerador de onda impulsiva e memória flash. Esse medidor é capaz de fornecer sinais de até 500 V, com tempos de 3,5/500  $\mu$ s e 0,4/500  $\mu$ s, representando primeira descarga e descarga subsequente, respectivamente. O dispositivo armazena o valor da impedância impulsiva  $Z_P$  e da resistência de baixa frequência  $R_{BF}$ , estimada na cauda da onda (RODRIGUES, 2014; RODRIGUES E VISACRO, 2014).

### 3.4 Considerações Práticas

A impedância impulsiva é mais representativa do comportamento de aterramentos frente a descargas atmosféricas quando comparado à resistência de baixa frequência, tornando-se o principal parâmetro a ser analisado em aplicações de desempenho de linhas e proteção contra raios (VISACRO, 2018). Estudos recentes mostram que o uso de  $Z_P$  como parâmetro conciso em modelagens para representar os eletrodos de torres de LT leva a resultados praticamente idênticos daqueles obtidos ao utilizar a representação física desses eletrodos, enquanto que o uso de  $R_{BF}$  leva a erros de 20% a 50% na avaliação de desempenho de linhas (VISACRO e SILVEIRA, 2016).

Entretanto, além das diversas complexidades já discutidas que envolvem a medição da impedância impulsiva, essa tarefa ainda é bastante laboriosa e demorada. Por exemplo, em condições em que o solo apresenta resistividade elevada (como no caso de grande parte do solo brasileiro) é comum os cabos contrapesos dos aterramentos das torres de LT apresentarem comprimentos extensos, entre 20 a 90m (CEMIG, 2003). Devido à longa extensão desses eletrodos, não são raras as situações de medição de aterramentos em que os cabos do circuito de corrente apresentam comprimentos superiores a 200m, para garantir que não haja acoplamento entre a haste auxiliar e o aterramento. A necessidade de deslocar essas distâncias para realizar a medição, somada à necessidade de cravar diversos eletrodos, que atuam como retorno de corrente, tornam o serviço de medição de todos aterramentos de torres de uma certa LT uma atividade trabalhosa, prolongada e onerosa.

Com intenção de facilitar tais medições, este trabalho busca aperfeiçoar uma nova técnica que dispensa o uso de longos cabos no circuito de corrente. Essa metodologia substitui esses longos cabos por condutores curtos especiais, chamados de ATL, que serão apresentados no próximo capítulo.

---

# 4 Aspectos Básicos sobre a Linha de Transmissão Artificial

## 4.1 Introdução

O uso de arranjos especiais de condutores para obter baixa velocidade de propagação de ondas de corrente e tensão foi proposto pela primeira vez em (CUNNINGHAM, 1911; CUNNINGHAM e DAVIS, 1912). Tais arranjos foram chamados de *Artificial Transmission Line*, ou ATL (em português, *Linha de Transmissão Artificial*). Em seu trabalho, o autor buscou reproduzir em laboratório as condições de uma linha de transmissão de longa distância, a fim de investigar fenômenos transitórios, como chaveamentos e mudança de carga. Para isso, cada unidade ATL foi construída com 240 espiras de fio de cobre enroladas em volta de um cilindro de vidro de 15 cm de diâmetro e 1,36m de comprimento. Esse arranjo apresenta valores de indutância e capacitância por unidade de comprimento muito superiores ao de uma linha de transmissão aérea, gerando parâmetros de propagação que correspondem a um trecho de 800 m da LT analisada por Cunningham. Em seus trabalhos, Cunningham et al. utilizaram 400 unidades ATL em série, cuja características correspondia a uma linha de transmissão de 320 km.

Na literatura, encontram-se publicações relativas a pesquisas que envolvem o uso de unidades ATL para outras aplicações, como por exemplo, para modelagem de canal de descarga atmosférica (FISHER et al, 1960; YOKOYAMA, 1984). Em investigações mais recentes, essas unidades vêm sendo usadas para substituir os longos

cabos auxiliares de corrente em arranjos de medição de impedância de aterramentos elétricos (LIMA, 2015; LIMA et al, 2015; MAGALHÃES, 2017).

Em (LIMA, 2015), cada unidade ATL foi construída com cerca de 800 a 850 espiras enroladas em tubos de PVC (policloreto de vinila) de 3m de comprimento e 20 mm de diâmetro, por metro. Segundo o autor, as unidades apresentam indutância por unidade de comprimento entre 252  $\mu\text{H/m}$  e 285  $\mu\text{H/m}$ , velocidade de propagação de aproximadamente 2,14% da velocidade da luz ( $c$ ) e impedância de surto próxima de 1900  $\Omega$ . Neste trabalho, no arranjo de medição impulsiva de aterramento, são utilizadas quatro unidades no circuito de corrente, com a extremidade aterrada por uma haste auxiliar de corrente. O autor compara diversos resultados de impedância transitória  $Z(t)$  obtidos através de simulações e de medições com o uso de cabos convencionais e com uso das unidades, para algumas configurações de aterramentos concentrados (eletrodos horizontais de 18 m, 12 m e 2,4 m de comprimento) colocados em solos de resistividade aparente de 1190  $\Omega\text{m}$ , 1091  $\Omega\text{m}$  e 525  $\Omega\text{m}$ . O trabalho sugere que a aplicação das unidades ATL neste tipo de medição mostra-se promissora.

Já em (MAGALHÃES, 2017) as unidades ATL, constituídas por 1020 espiras enroladas em tubos de PVC de 3 m de comprimento e diâmetro 21,2 mm, apresentam valor de indutância de 462  $\mu\text{H/m}$ . Quando as unidades eram colocadas diretamente sobre o solo, isso resultava em velocidade de propagação de 2,5 % da velocidade da luz e em impedância de surto de aproximadamente 3460  $\Omega$ . Em seu trabalho, o autor avalia o uso das unidades ATL no circuito de corrente, no circuito de potencial e nos dois circuitos simultaneamente. Analisa, também, o efeito de se adotar a extremidade do ATL oposta àquela de injeção de corrente em aberto ou aterrada. Foram realizados testes com aterramentos concentrados e relativamente extensos (escala semirreal), com valores de impedância impulsiva  $Z_P$  nas faixas de 190  $\Omega$  e 5,4  $\Omega$ , respectivamente. No que concerne aos resultados obtidos da medição com as unidades ATL da resposta impulsiva de aterramentos elétricos, a conclusão do trabalho aponta a validade do uso dessas unidades no circuito de corrente com a extremidade em aberto. Indica, ainda, a inadequação de seu uso na condição de extremidade aterrada, devido aos efeitos mútuos entre o aterramento em medição e o aterramento de retorno de corrente. O uso das unidades no circuito de tensão envolve dificuldades muito difíceis de superar, não sendo recomendado.

Esta dissertação busca dar continuidade a esses dois últimos trabalhos, propondo mudanças nas características construtivas das unidades e na metodologia de medição adotada. Uma representação genérica do esquema de medição que foi utilizado nesta pesquisa é apresentada na Figura 4.1. Nela, observam-se unidades ATL conectadas em série, com uma extremidade ligada à saída do gerador e a outra extremidade em aberto. Entre a saída do gerador e o aterramento sob teste é colocado um resistor shunt, no qual um osciloscópio realiza a medição de corrente. Já o circuito de tensão é constituído por um cabo comum que está aterrado com uma haste na extremidade distante.

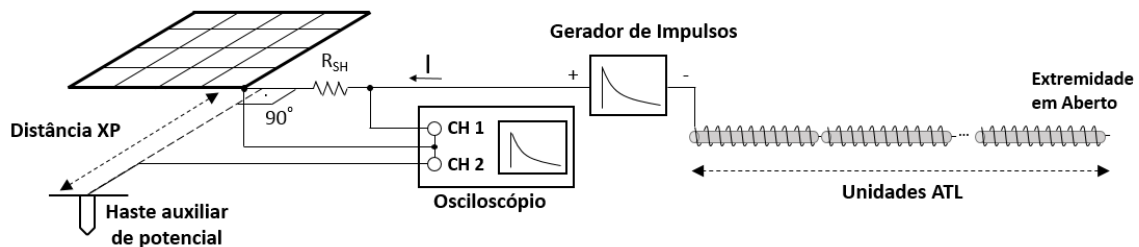


Figura 4.1 - Configuração típica de medição impulsiva aplicando unidades ATL no circuito de corrente com a extremidade em aberto.

No que concerne à forma de onda aplicada ao aterramento na medição da sua resposta impulsiva com o uso das unidades ATL em aberto (*Open-ended Artificial Transmission Line* ou OATL), o que se pretende é reproduzir aproximadamente a forma de onda da corrente de primeira descarga nos seus  $10 \mu s$  iniciais (inclui a frente de onda, o pico e o início do decaimento da onda de corrente), seguida de um intervalo de variação lenta de corrente da ordem  $15$  a  $20 \mu s$ , que antecede o início do decaimento muito rápido da onda de corrente (quase abrupto), devido à chegada ao aterramento da onda negativa de corrente, refletida na extremidade em aberto do arranjo OATL. Estas características possibilitam efetuar-se o cálculo da impedância impulsiva do aterramento (como quociente dos picos das ondas medidas de GPR e corrente) e se estimar o valor da resistência de baixa frequência do aterramento no intervalo de variação lenta.

Note que, quando o gerador é acionado, a onda de corrente se propaga em ambas as direções: uma em direção ao aterramento e outra em direção à extremidade aberta e distante do arranjo OATL. Após percorrer todas as unidades, a onda de corrente é totalmente refletida na extremidade em aberto, retornando ao aterramento, após mais



um tempo de trânsito. A onda de corrente resultante no aterramento é o resultado da superposição das ondas incidente e refletida. A queda rápida dos valores instantâneos das ondas de GPR e corrente, causada pela chegada da onda refletida, dificulta a estimativa da resistência de baixa frequência do aterramento, obtida tradicionalmente como o quociente dos valores instantâneos do GPR e corrente na cauda das ondas medidas. Assim, *interessa que a velocidade de propagação da onda no OATL seja a menor possível*, permitindo um intervalo mais longo de variação lenta de corrente e tensão. Neste aspecto, vale realçar os parâmetros envolvidos na velocidade de propagação e na impedância de surtos de linhas de transmissão. Aproximando-se cada unidade ATL como uma linha de transmissão com perdas desprezíveis, sua velocidade de propagação  $v_p$  e impedância de surto  $Z_S$  são definidas como (HAYT e BUCK, 2012):

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L' \cdot C'}} \quad (4.1)$$

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

onde  $L'$  e  $C'$  são respectivamente a indutância e capacitância por unidade de comprimento.

Ademais, cada unidade ATL pode ser vista como um solenóide, cuja indutância  $L'$  por unidade de comprimento pode ser calculada como (HAYT e BUCK, 2012):

$$L' = \mu_0 \cdot A \cdot N^2 \quad (4.3)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo,  $A$  é a área da seção das espiras e  $N$  o número de espiras por unidade de comprimento enroladas no tubo.

Já o cálculo analítico da capacitância por unidade de comprimento  $C'$  da unidade colocada sobre o solo é mais complexo, devido à geometria da configuração. O valor de  $C'$  tem forte influência da altura da unidade em relação ao solo, como comentado adiante.

Por outro lado, um fator fundamental para se alcançar alta qualidade no resultado de medição da impedância/resistência de aterramento é a amplitude da corrente impressa aos eletrodos. A elevação de potencial dos eletrodos é proporcional a

---

tal amplitude. Nas aplicações, é a impedância de surto das unidades ATL que limitam o valor da corrente e, por consequência, da elevação de potencial. Quando a impedância de surto é muito elevada, a corrente e o respectivo GPR tornam-se muito reduzidos, sobretudo na medição de arranjos de aterramento de baixa impedância. Nesse caso, a amplitude dos sinais espúrios de tensão presentes no solo pode ser igual ou superior à de teste, o que pode comprometer seriamente a qualidade do resultado da medição (VISACRO et al, 2019).

## 4.2 Características Construtivas e Parâmetros

A aplicação das unidades ATL no circuito de corrente de um arranjo de medição de aterramento requer que tal elemento apresentasse baixa impedância de surto e baixa velocidade de propagação.

Pela equação (4.3), ao definir-se as características construtivas de cada unidade, por exemplo, o número de espiras por metro e o diâmetro do tubo, é possível obter-se uma estimativa da sua indutância por unidade de comprimento. De acordo com as equações (4.1) e (4.2), um valor elevado de  $L'$  implica uma baixa velocidade de propagação e uma elevada impedância de surto. Na aplicação da ATL em medição de aterramentos, é importante alcançar-se baixa velocidade de propagação (para reduzir as distâncias de medição) e baixa impedância de surto (para obter correntes e tensões elevadas). Dessa forma, conclui-se pela necessidade de alcançar um valor de  $L$  que implique em baixa velocidade de propagação sem que a impedância de surto seja muito elevada.

Nesta dissertação, foram construídos diferentes modelos de unidades ATL, com o intuito de se estudar o efeito das variações de seus parâmetros. Foram realizadas análises de sensibilidades com mudanças no número de espiras e diâmetro do tubo.

Por fim, foi definido que cada unidade da linha de transmissão artificial fosse construída utilizando-se tubos de PVC de ½” (cerca de 21,2 mm de diâmetro externo) e 3m de comprimento, para serem leves e facilitarem o transporte. Foi escolhido o fio de cobre esmaltado AWG #28 (seção de  $0.08 \text{ mm}^2$ ) que é fino o suficiente para permitir um elevado número de espiras por metro (aproximadamente 2600 espiras/m), porém

sem comprometer a sua resistência mecânica. O fio é fixado no tubo com fita isolante, evitando também fuga de corrente para o solo. A Figura 4.2 ilustra uma unidade ATL.



Figura 4.2 – (a) Unidade ATL construída com tubos PVC ½” e 3m de comprimento, (b) utilizando fio esmaltado de cobre AWG #28, resultando em aproximadamente 2600 espiras/m

De acordo com as características construtivas e pela equação (4.3), estimou-se uma indutância de cada unidade ATL produzida ( $L'$ ) da ordem de 3 mH/m. Tal valor de indutância é significativamente maior que aqueles obtidos em MAGALHÃES, 2017 (462 $\mu$ H/m) e LIMA, 2015 (285  $\mu$ H/m). Naturalmente, as unidades produzidas neste trabalho apresentaram velocidade de propagação menor e impedância de surto maior que os valores apresentados nas referências.

O experimento indicado na Figura 4.3 foi utilizado para se determinar a velocidade de propagação e a impedância de surto das unidades ATL. A unidade ATL é conectada ao gerador de impulso por um resistor *shunt*, enquanto a outra saída do gerador é ligada ao aterramento. Um osciloscópio é utilizado para a medição das ondas de corrente e tensão.

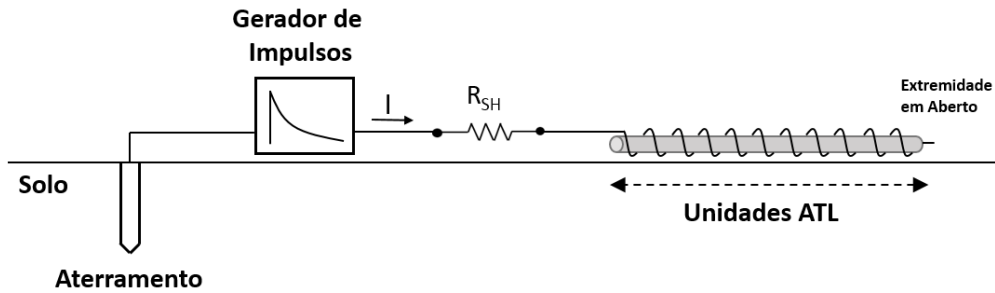


Figura 4.3– Configuração de experimento usado para obter a velocidade de propagação e impedância de surto das unidades ATL.

Sabe-se que, após a onda de corrente percorrer o tubo, ser totalmente refletida na extremidade em aberto e retornar ao ponto de medição, ocorrerão variações abruptas na forma de onda da corrente, que podem ser observadas no osciloscópio. Tomando o tempo da ocorrência dessa mudança abrupta, ou seja, duas vezes o tempo de trânsito da onda, e sabendo o comprimento do tubo (3m), é possível obter uma estimativa da velocidade de propagação  $v_p$ . A Figura 4.4 a seguir apresenta a forma de onda da corrente de testes realizados em laboratório seguindo o arranjo da Figura 4.3.

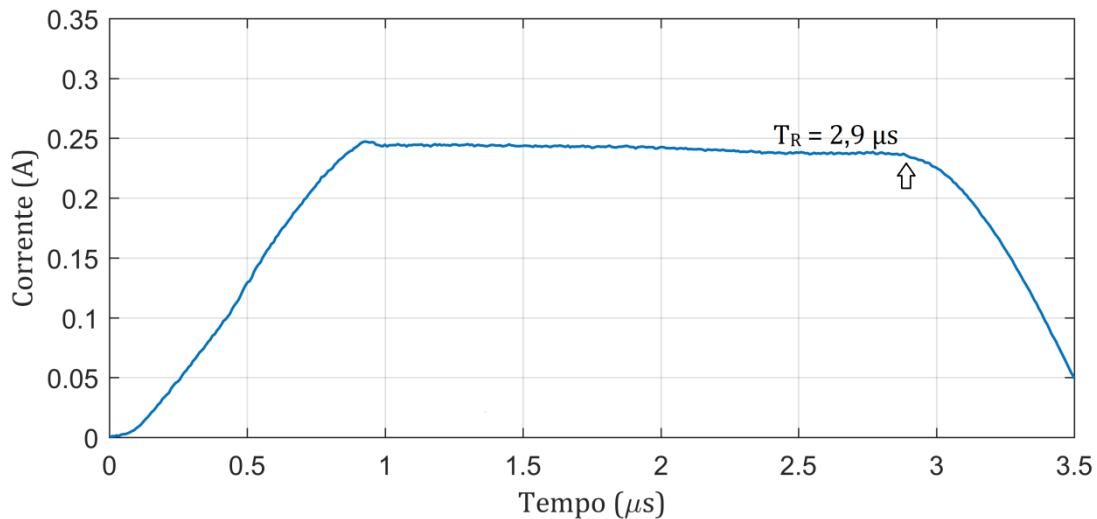


Figura 4.4 – Curva da onda de corrente para o teste realizado em laboratório, apontando a chegada da onda refletida na extremidade em aberto no instante  $T_R = 2,9 \mu s$ , o que corresponde à velocidade de propagação de 0,69% da velocidade da luz.

Pelo primeiro gráfico, nota-se que, após a frente da onda, há um intervalo de estabilidade de valor de corrente que antecede a chegada da onda refletida no instante de tempo  $t = 2,9 \mu s$ , responsável pelas alterações rápidas. Considerando que a onda

refletida percorre duas vezes o comprimento do tubo (ida e volta) até atingir o aterramento em  $2,9 \mu\text{s}$ , isso resulta na velocidade de propagação de  $v_p = \frac{2 \cdot 3 \text{ m}}{2,9 \mu\text{s}} = 2,07 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}$ , ou então 0,69% da velocidade da luz.

Já a impedância de surto da unidade ATL pode ser obtida pelo quociente entre a tensão produzida pelo gerador e a corrente injetada, uma vez que a impedância do aterramento utilizado é pode ser desconsiderada, por ser muito inferior à impedância de surto (ordens de  $10^0$  versus  $10^3$ , respectivamente). O gráfico da Figura 4.5 exibe a impedância transitória calculada em testes realizados em laboratório, segundo o arranjo mostrado na Figura 4.3, utilizando uma onda impulsiva de tensão, cujo tempo de frente é de  $0,8 \mu\text{s}$  e pico de  $1,5 \text{ kV}$ . Na parte plana da curva do gráfico, determina-se uma impedância de surto média  $Z_s = 6,1 \text{ k}\Omega$ .

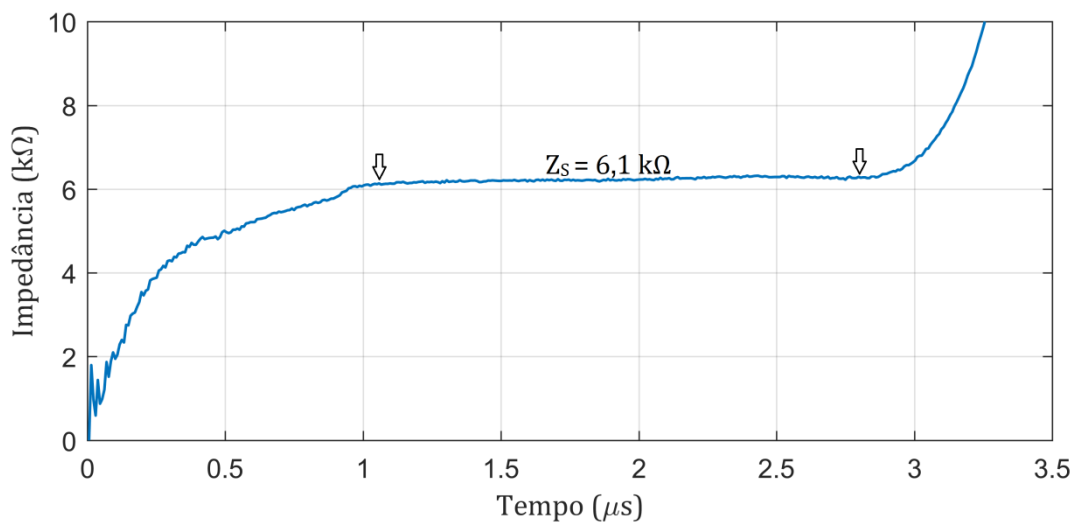


Figura 4.5 - Curva da impedância transitória para o teste realizado em laboratório, indicando que a impedância de surto da unidade ATL é de aproximadamente  $Z_s = 6,1 \text{ k}\Omega$ .

Os valores de velocidade de propagação e de impedância de surto das unidades ATL produzidas podem apresentar pequenas diferenças, devido às variações construtivas. Em laboratório, foram determinados os parâmetros de cada tubo, confirmando uma variação da impedância de surto entre  $5,8 \text{ k}\Omega$  a  $6,2 \text{ k}\Omega$  e da velocidade de propagação entre 0,72% a 0,64% da velocidade da luz. Como esperado,

as características das unidades ATL utilizadas nessa dissertação são bastantes distintas das apresentadas em (MAGALHÃES, 2017) e (LIMA, 2015). Neste trabalho, obteve-se uma impedância de surto maior enquanto a velocidade de propagação é menor.

As condições dos testes realizados podem alterar os parâmetros das unidades. No caso dos gráficos das Figura 4.4 e Figura 4.5, as formas de ondas foram obtidas em testes realizados em laboratório, ou seja, com os tubos apoiados no piso liso de cimento. Caso os testes fossem realizados em campo, ou seja, em solo com relevo irregular, os resultados seriam diferentes, como é discutido adiante.

Como comentado anteriormente, o valor da capacitância por unidade de comprimento das unidades ATL depende fortemente da sua altura em relação ao solo. Para se avaliar esse comportamento, foi realizado um teste com o arranjo mostrado na Figura 4.3, variando-se a altura do tubo gradativamente. Os resultados da variação da velocidade de propagação e da impedância de surto são mostrados nos gráficos das Figura 4.6 e Figura 4.7 a seguir.

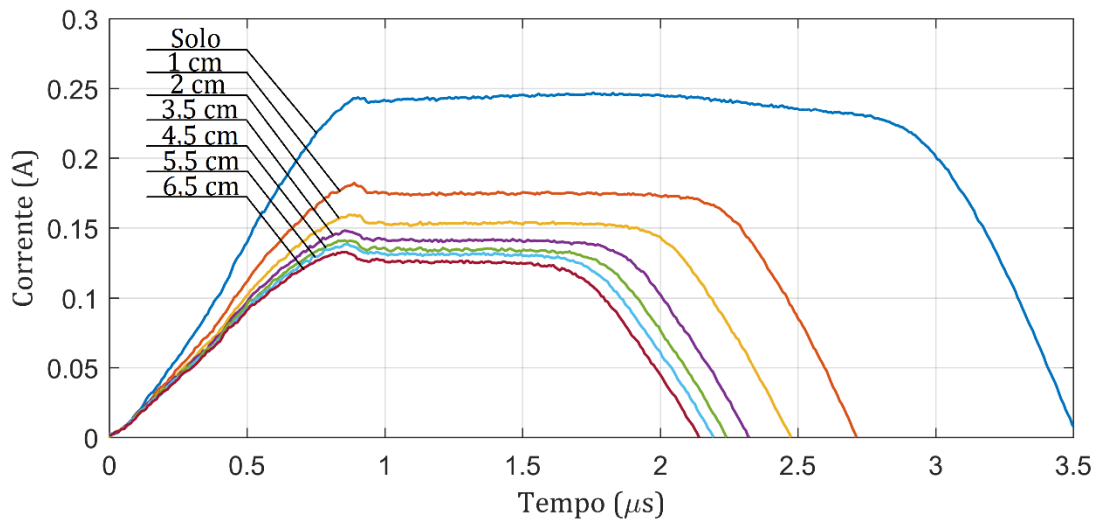


Figura 4.6 – Curvas das ondas de corrente em função da altura da unidade em relação ao solo.

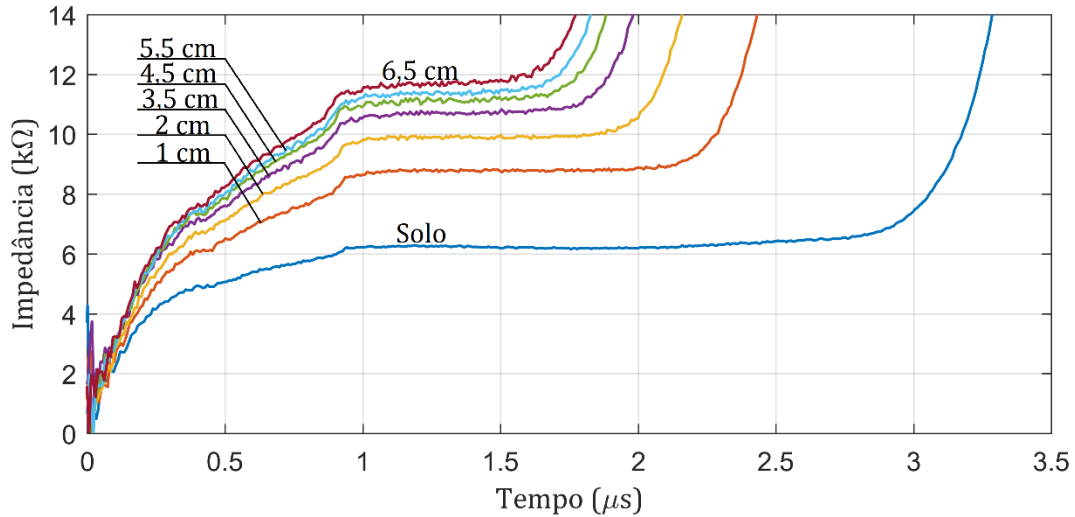


Figura 4.7 - Curvas da impedância vista pelo gerador em função da altura da unidade em relação ao solo.

Observa-se que, com o aumento da altura dos tubos em relação ao solo, a velocidade de propagação e a impedância de surto dos tubos aumentam. Como denota a análise das equações (4.1) e (4.2), isto ocorre devido à diminuição da capacitância por unidade de comprimento dos tubos. Pelos resultados, é visível que o melhor desempenho das unidades para a aplicação desejada ocorre com o posicionamento da unidade o mais próximo possível do solo. Os gráficos ainda expõem que pequenas variações, como 1 cm ou 2 cm acima do solo, já causam um aumento significativo em ambos  $v_p$  e  $Z_s$ , o que significa que durante uma medição, pequenas irregularidades do relevo do solo podem causar uma mudança considerável no comportamento das unidades.

Para avaliar os efeitos do relevo e das características do solo no comportamento das unidades ATL, foi realizado em campo um experimento como o mostrado na Figura 4.3, posicionando-se os tubos em um solo de baixa resistividade (aproximadamente  $200 \Omega m$ ) e relativamente plano. A Figura 4.8 exhibe a forma de onda da corrente resultante em duas situações distintas: com a extremidade do tubo em aberta e aterrada. Com a extremidade em aberto, há uma queda rápida no valor da corrente devido à polaridade negativa da onda refletida. Já com a extremidade aterrada, a polaridade da onda refletida é positiva, causando um aumento rápido da corrente. Isto possibilita melhor definição na determinação do tempo de retorno da onda refletida, como fica evidente nas curvas

da figura. Estas são coincidentes até o instante da chegada da onda refletida, que é o ponto em que as curvas começam a se separar.

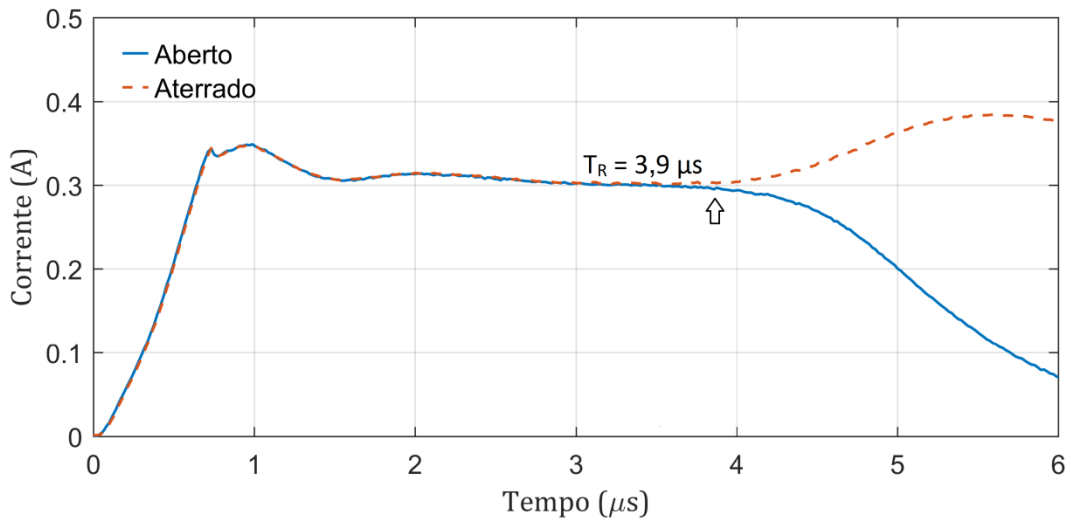


Figura 4.8 - Curvas da onda de corrente para o teste realizado em campo com a extremidade em aberto e aterrada, apontando a chegada da onda refletida no instante  $T = 3,9 \mu s$ , o que corresponde a velocidade de propagação de 0,26% da velocidade da luz.

As pequenas oscilações próximas ao pico da onda de corrente, que não foram observadas nos testes realizados em laboratório, podem, aparentemente, ser atribuídas ao relevo do solo sob a unidade ATL, pois a variação da altura do tubo pode influenciar nas suas características. A Figura 4.9 apresenta o gráfico da impedância transitória da unidade ATL para o teste realizado em campo.

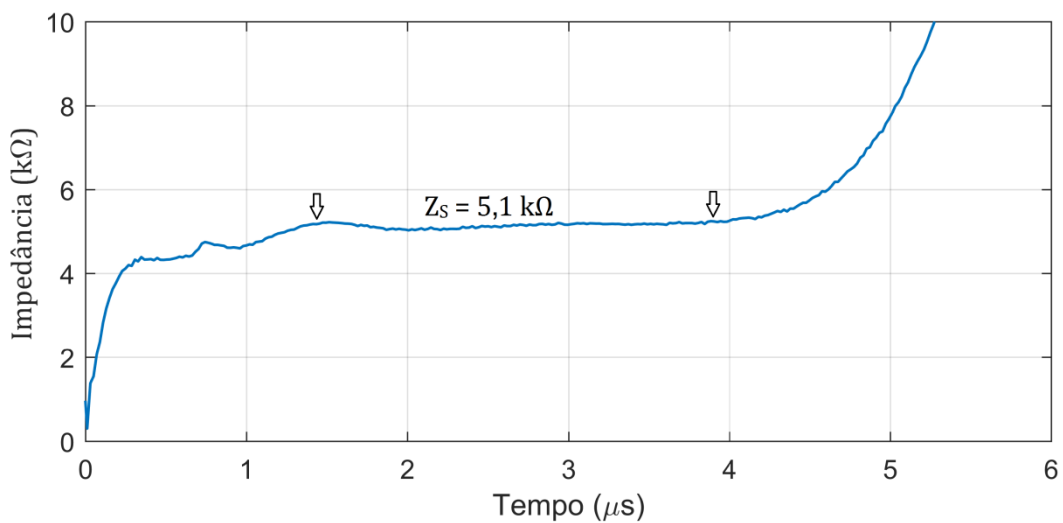


Figura 4.9 - Curva da impedância transitória para o teste realizado em campo, indicando que a impedância de surto da unidade ATL é de aproximadamente  $Z_S = 5,1 k\Omega$ .



Comparando os tempos da chegada da onda refletida e a impedância de surto nos testes realizados em laboratório e em campo, percebe-se a diminuição da velocidade de propagação (tempo de chegada da reflexão passa de 2,9  $\mu\text{s}$  para 3,9  $\mu\text{s}$ ) e da impedância de surto (passa de 6,1  $\text{k}\Omega$  para 5,1  $\text{k}\Omega$ ). A variação significativa dessas grandezas indica a sensibilidade dos parâmetros das unidades ATL frente a variações das condições de teste.

### **4.3 Associação de Unidades ATL**

Para a análise do desempenho de uma LT, é de interesse conhecer o comportamento do aterramento quando submetido a correntes impulsivas, cuja forma de onda seja representativa da corrente da primeira descarga nuvem-solo, que tem tempo de frente compreendido entre 1,5 a 10  $\mu\text{s}$ , com valor mediano próximo a 4  $\mu\text{s}$  (VISACRO, 2018). Os testes realizados na seção anterior apontam que, em uma unidade ATL construída neste trabalho, a onda refletida leva entre 3  $\mu\text{s}$  a 4  $\mu\text{s}$  para retornar ao ponto de medição. Assim, o uso de apenas uma unidade seria suficiente para realizar a medição da impedância impulsiva de aterramento representativa da corrente da primeira descarga de retorno. Porém, a chegada da onda refletida neste tempo impossibilita a detecção da cauda da forma de onda, o que impede o cálculo da impedância transitória ou da resistência de baixa frequência.

Outro aspecto importante refere-se à amplitude da corrente de teste, que é basicamente definida pelo valor da impedância de surto do ATL, cujo valor é elevado, entre 5 e 6  $\text{k}\Omega$ , já que os valores típicos de impedância de aterramento têm a ordem de alguns ohms a dezenas de ohms. Para geradores de impulso com tensão de pico da ordem de 1,5 kV, a amplitude de corrente injetada no aterramento seria inferior a 300 mA. Consequentemente, também a elevação de potencial do solo seria baixa para aterramentos típicos de LT (valores de resistência de pé de torre usualmente menores que 20  $\Omega$ ). Esta condição aumenta a importância relativa dos ruídos presentes no solo, que podem interferir nos resultado da medição.

Esses dois aspectos sugerem a necessidade de utilizar unidades ATL adicionais, interligadas tanto em série quanto em paralelo, com objetivo de se aumentarem o tempo de propagação e a amplitude das ondas injetadas nos aterramentos, respectivamente.

### 4.3.1 Associação em Série

O gráfico da Figura 4.10 ilustra o comportamento da onda de corrente em uma montagem como a da Figura 4.3, porém aumentando o número de unidades ATL interligadas em série.

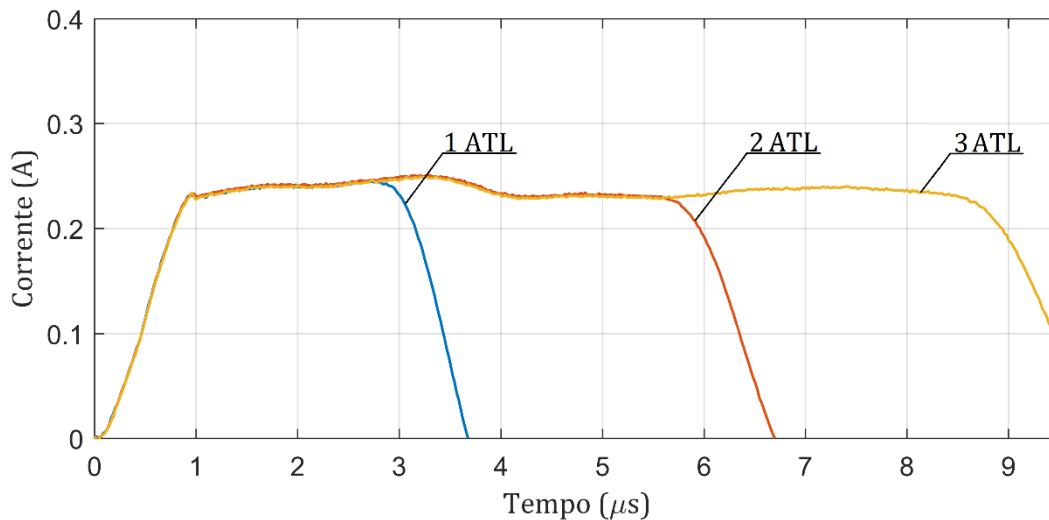


Figura 4.10 - Curvas das ondas de corrente ao variar o número de unidades interligadas em série.

Cada unidade ATL pode ser considerada como um trecho de linha de transmissão de parâmetros indutância e capacitância por unidade de comprimento definidos. Assim, a associação em série de várias unidades não altera sua impedância de surto e, portanto, não deve haver reflexão de ondas na interface destas (há casamento de impedâncias, o que resulta em um coeficiente de reflexão próximo de zero). O gráfico da Figura 4.10 demonstra tal consideração. Praticamente, a associação em série desses “trechos de linha de mesmo parâmetros” apenas prolonga a região plana após o pico, devido ao aumento do tempo de trânsito da onda propagada.

Assim, com a associação de unidades ATL em série consegue-se prolongar o tempo de trânsito. Este é aumentando “n” vezes, sendo n o número de unidades ATL

conectadas em série. Com este aumento, passa a ser viável, não apenas distinguir-se na onda de corrente o pico com tempo de frente típico de primeira descarga (no qual pode ser estimada a impedância impulsiva), como, também, um intervalo longo após o pico, de variação relativamente lenta da corrente, no qual podem ser estimadas a impedância transitória, que inclui a resistência de baixa frequência.

### 4.3.2 Associação em Paralelo

A partir da aproximação da unidade ATL como um trecho de LT, espera-se que a associação das unidades em paralelo reduza a impedância de surto vista pelo gerador de impulso. Em princípio, caso a distância entre as “n” unidades em paralelo seja muito elevada, de forma a evitar os efeitos de acoplamento entre estas, a impedância de surto equivalente deve ser reduzida “n” vezes.

Para analisar os efeitos mútuos entre duas unidades ATL associadas em paralelo e determinar uma distância suficiente para minimizar os acoplamentos, foi realizada uma montagem similar àquela da Figura 4.3, na qual a distância entre as unidades associadas em paralelo foi aumentada gradativamente. Os gráficos da Figura 4.11 e Figura 4.12 exibem o comportamento da velocidade de propagação e da impedância de surto com a variação do distanciamento entre dois tubos.

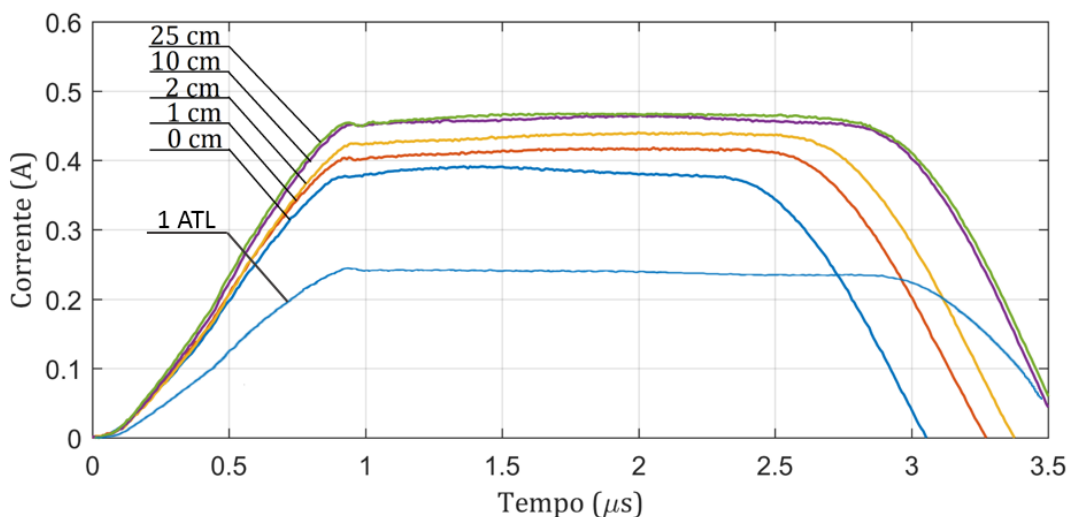


Figura 4.11 - Curvas das ondas de corrente ao variar a distância entre dois tubos interligados em paralelo (tubos colocados ao nível da superfície do chão do laboratório, diretamente sobre o concreto).

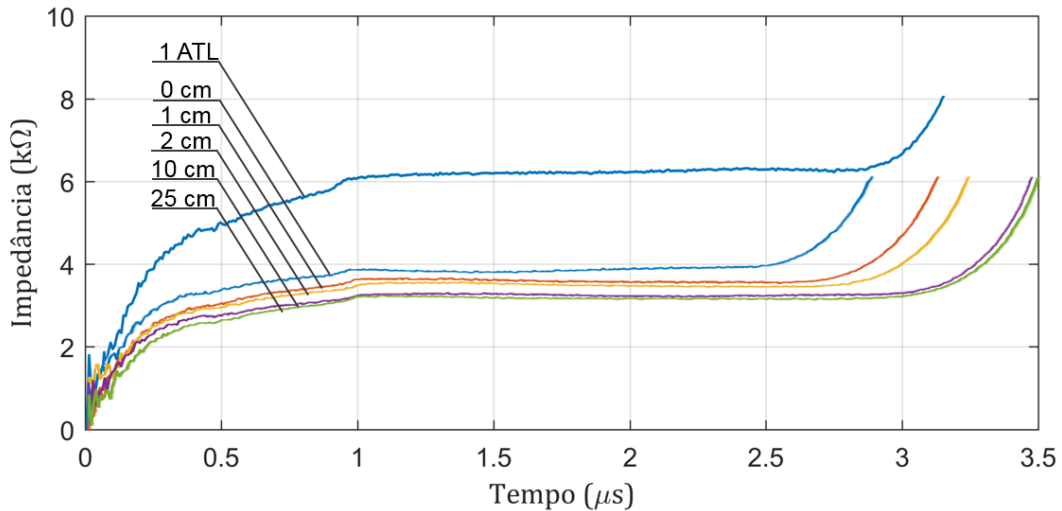


Figura4.12 - Curvas da impedância vista pelo gerador ao variar a distância entre dois tubos interligados em paralelo (tubos colocados ao nível da superfície do chão do laboratório, diretamente sobre o concreto).

O experimento denota o intenso acoplamento entre unidades ATL's colocadas muito próximas. Mostra, também, que, para unidades posicionadas a distância superior a 10 cm, o acoplamento torna-se muito reduzido, pois a corrente é praticamente o dobro daquela de um único ATL (a impedância de surto é próxima da metade, como mostra a Figura 4.11). Vale observar que quando o acoplamento é muito desprezível, a velocidade de propagação (e correspondente tempo de chegada da onda refletida de corrente ao aterramento) é basicamente a mesma daquela de uma unidade apenas. Neste caso, as duas unidades comportam-se como duas linhas de transmissão idênticas e independentes e iguais a LT de uma unidade. Por outro lado, à medida que o acoplamento aumenta pela aproximação das unidades em paralelo, verifica-se que a velocidade de propagação aumenta, com redução do correspondente tempo de chegada da onda refletida. Credita-se tal comportamento ao fato de tal configuração corresponder a um trecho de LT com indutância inferior àquela de uma única unidade.

#### 4.4 Configuração de Medição

Como visto, a associação de unidades ATL em série permite prolongar a região de variação lenta da onda de corrente, atrasando a chegada da onda refletida na

extremidade em aberto, enquanto a associação em paralelo proporciona um aumento na amplitude da corrente injetada ao reduzir a impedância de surto dos tubos.

Contudo, o uso de muitas unidades ATL em série tende a contrariar o principal objetivo de seu uso, que consiste na redução das distancias envolvidas na medição de aterramentos. Por isso, é importante definir uma configuração de tubos que permita uma medição confiável da resposta de aterramentos sem comprometer o rendimento do procedimento.

A Figura 4.13 apresenta o arranjo de unidades ATL utilizado nessa dissertação, que têm as características construtivas expostas nas seções anteriores e apresentam comportamentos semelhantes. Como o conjunto de unidades não tem sua extremidade aterrada, este arranjo passa a ser designado OATL (*Open-ended Artificial Transmission Line*).

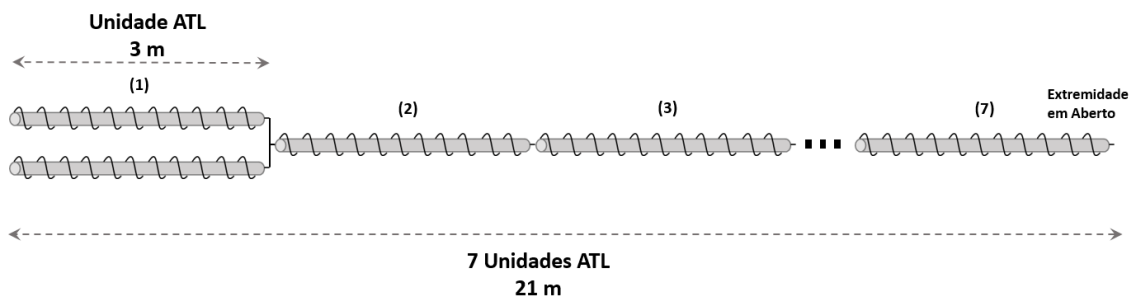


Figura 4.13 – Arranjo de unidades OALT utilizada nas medições de aterramentos: são conectadas 6 unidades em série, conectadas a duas unidades em paralelo na entrada do conjunto.

O arranjo compreende duas unidades ATL em paralelo na entrada do circuito, seguidas por seis unidades conectadas em série. Com esse arranjo, a menor impedância de surto da associação em paralelo, resulta em maior corrente injetada no aterramento nos instantes que antecedem o retorno da onda refletida na entrada do arranjo em série. Devido à diferença entre as impedâncias de surto das unidades em paralelo e em série, há reflexão parcial da onda incidente na interface destas associações, ocasionando queda brusca da corrente. Consegue-se realçar o pico da corrente, ajustando o tempo de frente da onda do gerador próximo ao tempo de chegada da onda refletida. Esse pico é seguido por uma região de decaimento lento de corrente, na qual se torna possível estimar-se a resistência de baixa frequência do aterramento. Neste trabalho, foi adotada tal

similaridade de tempos para se alcançar esta forma de onda de corrente. A Figura 4.14 ilustra a forma de onda típica de corrente obtida utilizando essa configuração em uma medição de aterramento.

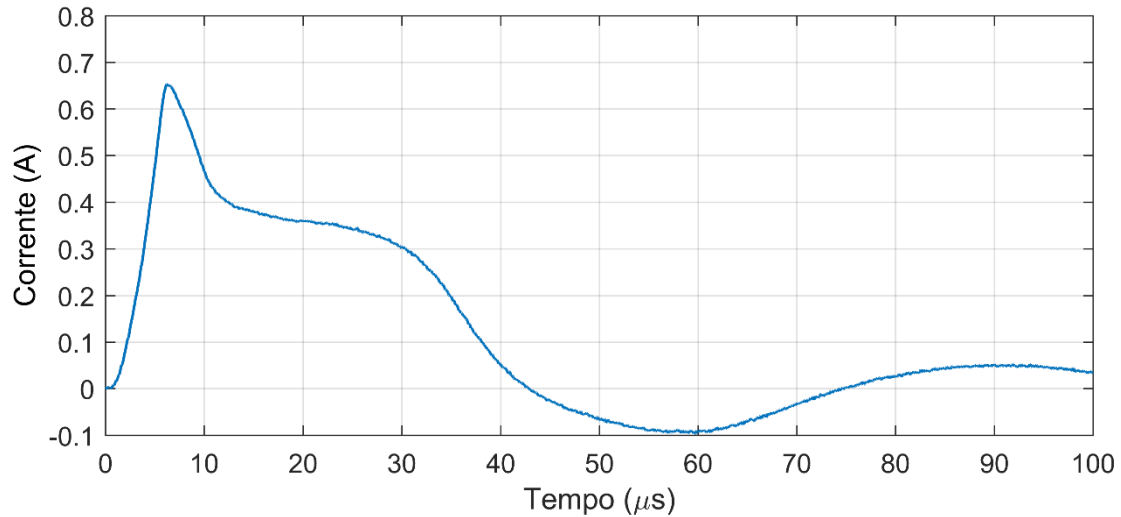


Figura 4.14 – Forma de onda típica da corrente utilizando a configuração de tubos apresentada nessa dissertação.

O arranjo em paralelo na entrada do conjunto facilita o cálculo de  $Z_P$ , pois o aumento do pico de corrente diminui a relação sinal/ruído, reduzindo a interferência de tensões espúrias presentes no solo no resultado da medição. A escolha de seis unidades interligadas em série foi feita com base em experimentos que buscaram definir o número mínimo de unidades ATL capaz de garantir intervalo de variação lenta da corrente (e respectivo GPR) longo o suficiente para possibilitar estimar-se a resistência de baixa frequência do aterramento.

Nota-se que o decaimento rápido da onda de corrente após o longo intervalo de variação lenta, definido pela chegada da onda de corrente refletida na extremidade em aberto das unidades leva a valores negativos de corrente, mas não afeta o cálculo de  $Z_P$  ou da resistência.

---

# 5 Resultados

## Experimentais e Análises

### 5.1 Introdução

Este capítulo apresenta os resultados experimentais da dissertação e detalha as condições do solo e arranjos de aterramentos que foram utilizados nos testes realizados em campo para fins de comparação. Tais testes empregaram condições distintas para medição da resposta impulsiva do aterramento: a primeira, considerada como referência, utiliza cabos comuns de longo comprimento no circuito de corrente. Já a segunda utiliza os designados OATL no circuito de corrente, tal qual apresentado na seção 4.4 deste trabalho.

As montagens para medição seguiram o mesmo esquema indicado nas Figura 5.1 e Figura 5.2, sendo o circuito de tensão posicionado em lado oposto ao do circuito de corrente e a haste prova de potencial posicionada suficientemente distante do aterramento sob teste.

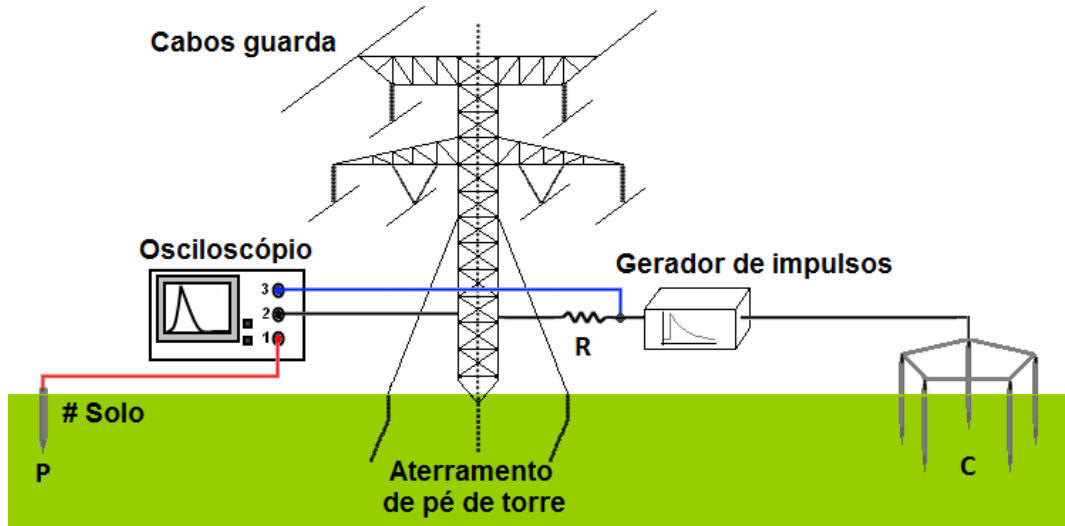


Figura 5.1 – Montagem para medição da resposta impulsiva do aterramento, utilizando cabos convencionais no circuito de corrente. Circuito de tensão e circuito de corrente posicionados em lados opostos, na direção ortogonal àquela da linha de transmissão.

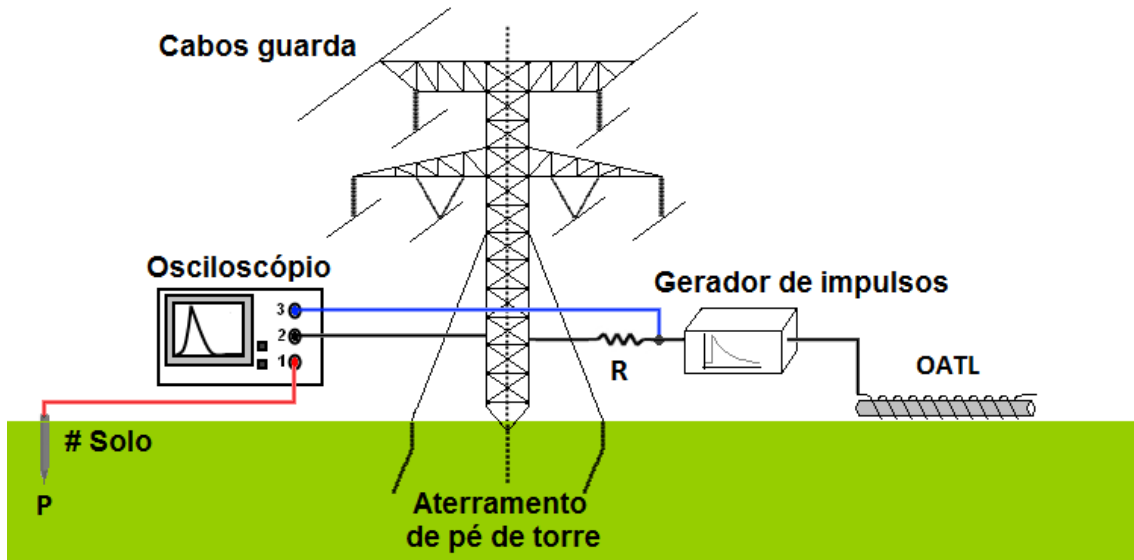


Figura 5.2 - Montagem para medição da resposta impulsiva do aterramento, utilizando o arranjo OATL no circuito de corrente.

Para injetar as correntes de teste nos aterramentos, foi utilizado o gerador de impulso de 1,5 kV construído em laboratório. A Figura 3.5 apresenta a forma de onda do gerador, cujo tempo de frente foi ajustado para próximo de 3,5  $\mu$ s nas medições realizadas. Um osciloscópio Tektronix TDS 3012C foi utilizado para gravar as ondas de corrente e correspondente GPR resultantes dos experimentos.

A definição da onda de corrente a ser utilizada nos testes experimentais foi realizada na perspectiva de obtenção de resposta impulsiva de aterramento representativa daquela obtida frente a descargas atmosféricas. Para tal definição, foram



realizadas simulações computacionais com uso do modelo eletromagnético HEM (VISACRO e SOARES, 2005). Inicialmente, simulou-se a resposta do aterramento adotando-se uma onda de corrente com as características típicas de uma primeira descarga de retorno, incluindo a concavidade inicial, derivada máxima próxima do primeiro pico, um segundo pico com amplitude superior ao primeiro e um decaimento lento na cauda.

A Figura 5.3 apresenta a curva da corrente duplo pico utilizada na simulação. Esta onda reproduz todos os parâmetros medianos de amplitude de corrente e de tempo da base de dados de Berger (BERGER et al, 1975), apresentando valor de pico de 31 kA e tempo de frente é de 3.8  $\mu\text{s}$  ( $T_{D30}$ ) (VISACRO, 2004; CONTI e VISACRO, 2007).

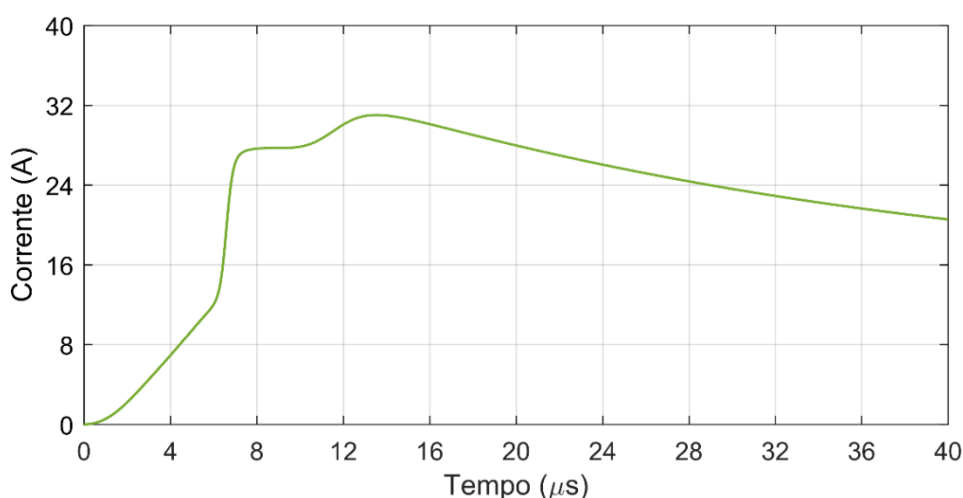


Figura 5.3 – Forma de onda da corrente duplo pico utilizada nas simulações no programa HEM. Adaptado de (VISACRO, 2004; CONTI e VISACRO, 2007).

Na simulação com a onda duplo pico, considerou-se diferentes arranjos de eletrodos em diferentes solos. Com a corrente injetada e a elevação de potencial do solo, determinou-se a impedância impulsiva, impedância transitória e a impedância harmônica em cada caso. Em seguida, verificou-se que a simulação gerava resultados similares aos obtidos experimentalmente com o uso da onda de corrente da Figura 4.14, que apresenta um único pico.

Por outro lado, como indicado em (VISACRO, 2018), a variação do tempo de frente da onda duplo pico entre 1,5 e 10  $\mu\text{s}$  gera valores de impedância impulsiva de aterramento praticamente iguais àquele obtido ao adotar o tempo de frente mediano de

primeira descarga de  $3,8 \mu\text{s}$  ( $T_{D30}$ ). Logo, a onda de um único pico utilizada na medição pode ser considerada representativa da resposta de uma primeira descarga

## 5.2 Desenvolvimentos

Neste trabalho, inicialmente foram realizadas sucessivas medições em dois arranjos de eletrodos de aterramentos concentrados: o primeiro instalado em solo de baixa resistividade e o segundo em solo de alta resistividade. Posteriormente, foram efetuados diversos testes em torres de linha de transmissão de 230 kV real, cujos aterramentos consistem em longos cabos contrapesos.

### 5.2.1 Testes em Aterramentos Concentrados

A Figura 5.4 mostra o arranjo de aterramento composto por cinco hastes verticais, espaçadas de 1,2 m, conectadas por cabos isolados de cobre, e cravadas em formato de pentágono num solo de resistividade de  $200 \Omega\text{m}$ , conforme obtido pela aplicação do método de Wenner (WENNER, 1915). Cada haste tem 0,7 cm de raio e 0,5 m de comprimento.

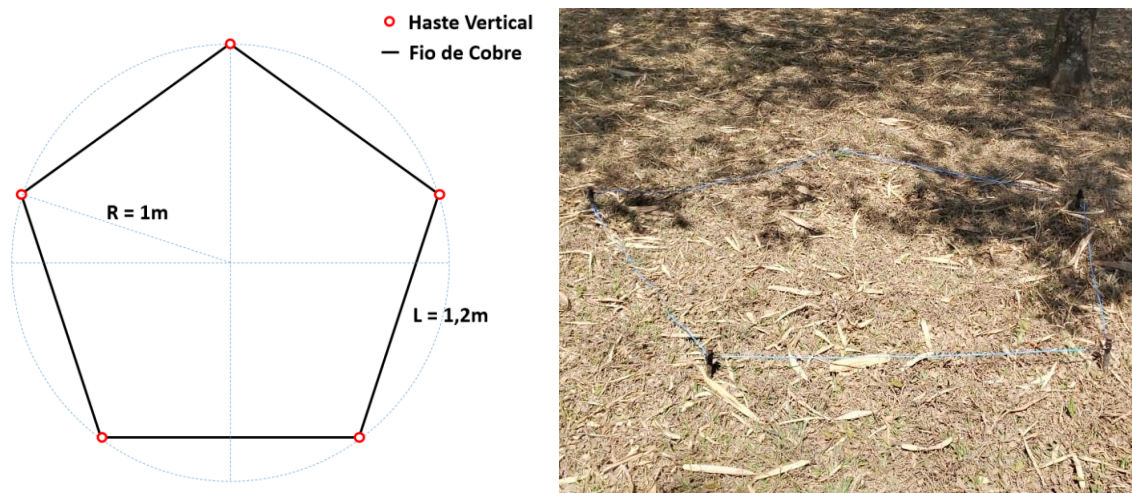


Figura 5.4 -Configuração do aterramento concentrado instalado em solo de baixa resistividade da UFMG, próximo ao prédio do LRC.

O outro aterramento concentrado, formado por dez hastes verticais é retratado na Figura 5.5. Nesse aterramento, colocado em um solo de cerca de  $2000 \Omega\text{m}$ , foram usadas 10 hastes de cobre de 0,7 cm de raio, enterradas 1 m no solo. O número de hastes

e a configuração do aterramento foram escolhidos de forma a buscar valores menores de resistência de aterramento com uma extensão ainda reduzida.

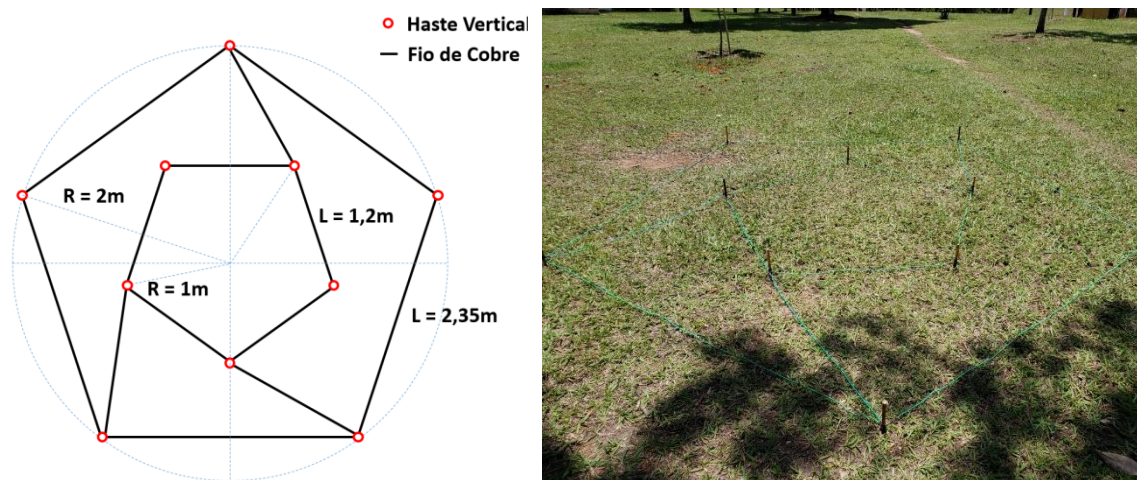


Figura 5.5 - Configuração do aterramento concentrado instalado em solo de alta resistividade da UFMG, próximo ao prédio da FAE.

### 5.2.2 Testes em Aterramentos Extensos (de linha de transmissão)

A Figura 5.6 mostra duas estruturas típicas da LT de 230 kV na qual foram realizadas medições: uma autoportante e outra estaiada. Os comprimentos dos cabos contrapeso estão compreendidos na faixa de 60 a 90 metros, conforme informação de projeto.



Figura 5.6 – Torre (a) autoportante e (b) estada, da linha de transmissão 230 kV, localizada próxima a cidade de Cuiabá, Mato Grosso.

### **5.3 Resultados da Resposta do Aterramento Concentrado em Solo de Baixa Resistividade ( $\rho=200 \Omega\text{m}$ )**

Os gráficos da Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam as formas de onda de corrente e tensão resultantes das medições realizadas no aterramento concentrado instalado em solo de baixa resistividade ( $\rho=200 \Omega\text{m}$ ), presente na Figura 5.4.

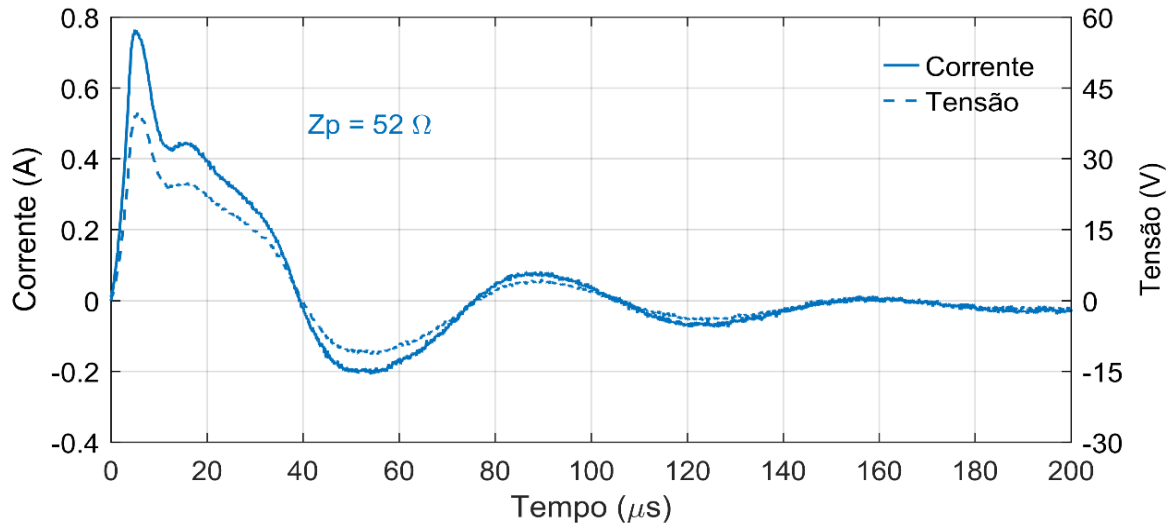


Figura 5.7 – Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, utilizando no circuito de corrente o arranjo OATL. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_P = 52 \Omega$ .

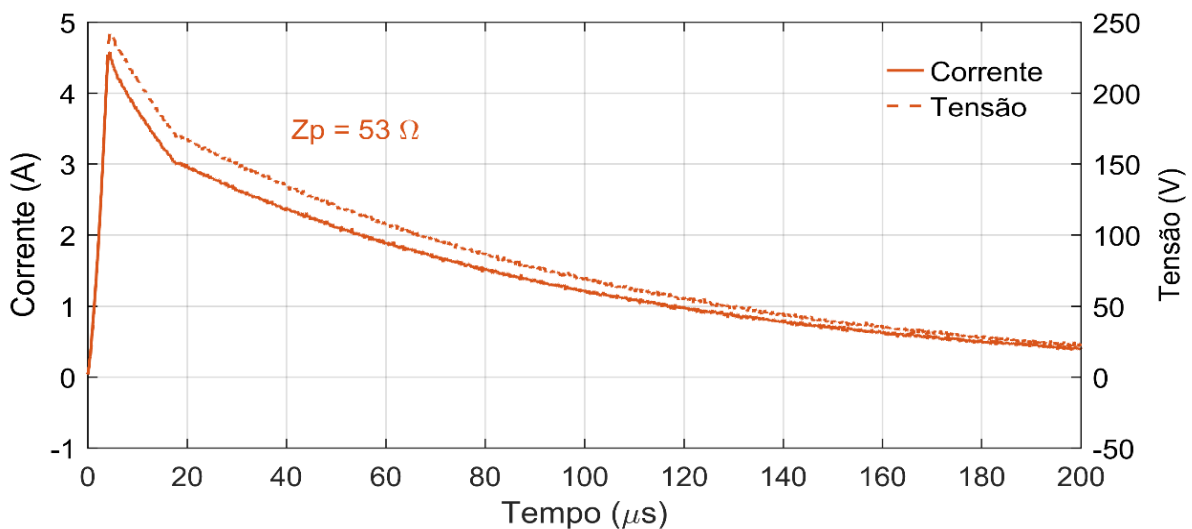


Figura 5.8 – Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, utilizando no circuito de corrente um cabo comum de 50 m aterrado com casamento de impedância. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_P = 53 \Omega$ .

Os tempos de frente da onda impulsiva de corrente dos testes convencional e com o arranjo OATL são similares e próximos a  $3,5 \mu s$ . Os resultados obtidos indicam valores semelhantes de  $Z_P$ ,  $53 \Omega$  para a medição de referência e  $52 \Omega$  para a medição com OATL, ou seja, uma diferença menor que 2%.

A Figura 5.9 a seguir apresenta os detalhes da frente das ondas mostradas nas Figura 5.7 e Figura 5.8, bem como a impedância transitória calculada nesse intervalo de tempo, para ambos os casos.

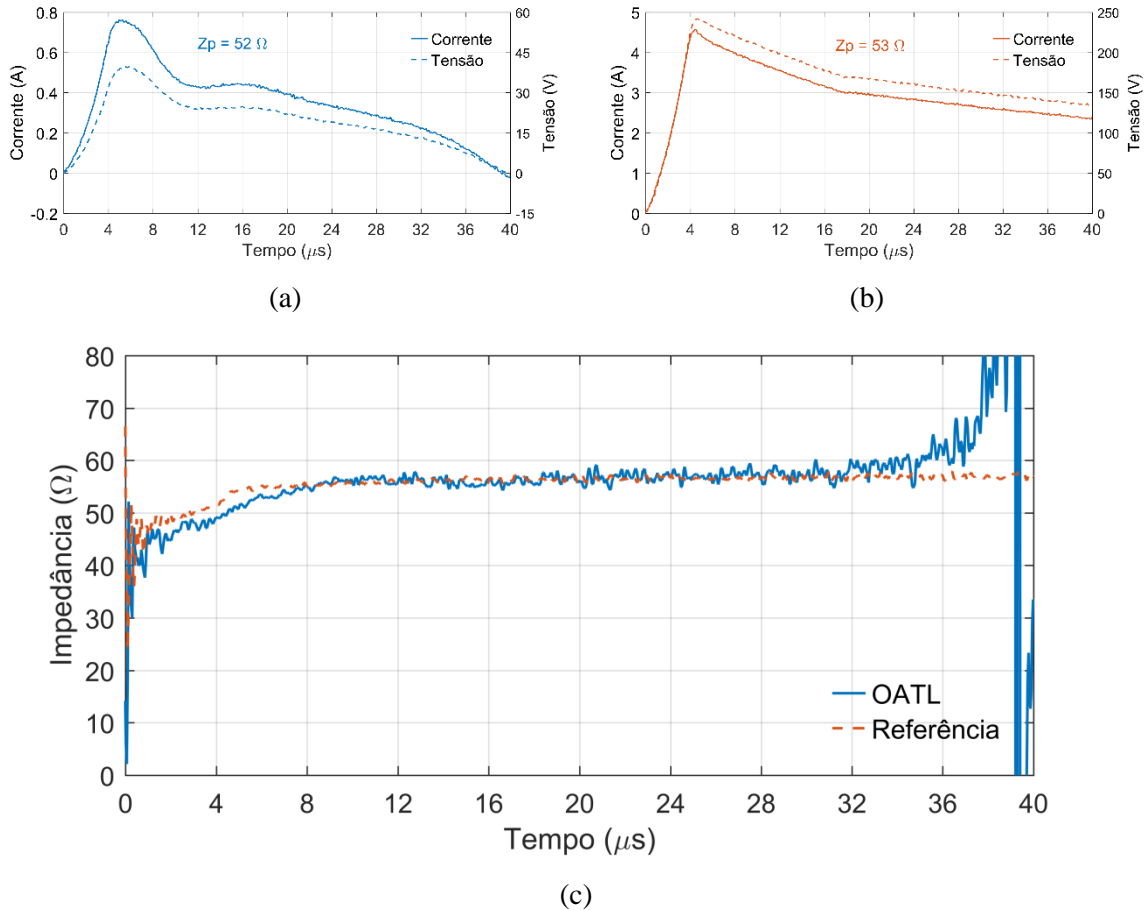


Figura 5.9 – Detalhe do início das curvas de tensão e corrente para os casos da medição do aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, utilizando no circuito de corrente: (a) arranjo OATL e (b) cabos comuns (referência). (c) Impedância transitória calculada nesse intervalo para ambos os casos.

Pelo gráfico da Figura 5.9(a) nota-se que, após o pico, a onda não teve variação muito lenta num intervalo tão longo como aquele da Figura 4.13. Ocorre certa oscilação, seguida de decaimento relativamente suave, provavelmente causada pelo relevo do solo. Apesar desse comportamento, as curvas de impedância transitória da Figura 5.9(c) estão coincidentes nos instantes de tempo que precedem a chegada da reflexão em  $T = 32 \mu s$ . Em ambos os casos, a impedância transitória apresenta um valor médio de  $56 \Omega$  no intervalo de tempo  $10 \mu s$  a  $32 \mu s$ , sinalizando que as mudanças na forma de onda causadas pela variação da altura dos tubos não afetaram os resultados.

A Figura 5.10 apresenta o gráfico da impedância harmônica calculada aplicando-se a transformada de Fourier nas curvas das Figura 5.7 e Figura 5.8. Percebe-se que as curvas são semelhantes em baixa frequência, tendo em 2,5 kHz valor de impedância igual a  $57 \Omega$ . Próximo de 25 kHz, a curva referente à medição realizada utilizando o arranjo OATL tem um decaimento e, a partir dessa frequência, passa a apresentar uma discreta diferença em relação a referência (cerca de 8%).

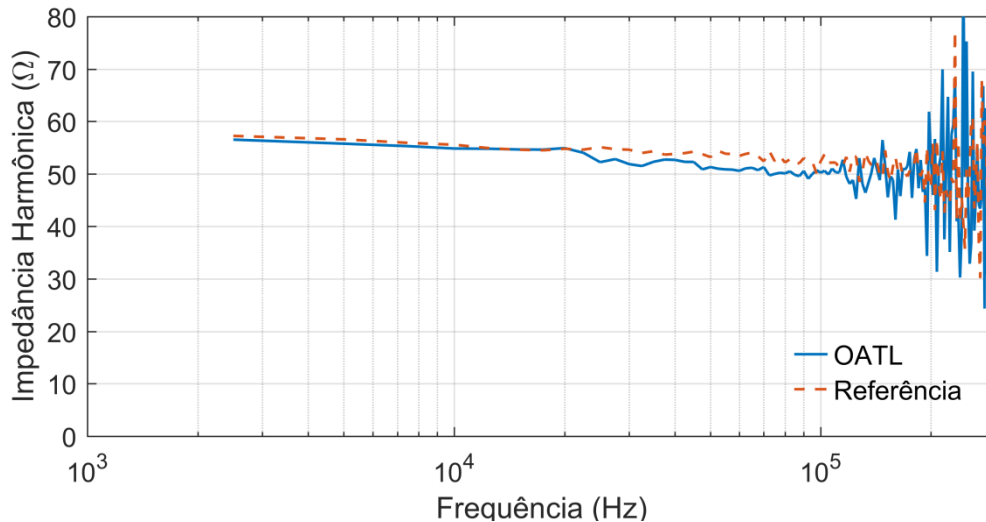


Figura 5.10 - Impedância harmônica calculada para os casos que utilizam no circuito de corrente o arranjo OATL e cabo comum (referência).

Os resultados obtidos com as medições utilizando as unidades ATL também foram comparados com a simulação realizada no HEM para verificar a resposta do aterramento para fenômenos atmosféricos. A Figura 5.11 apresenta as curvas referentes à simulação, das quais foi obtido um valor de impedância impulsiva de  $56 \Omega$ . Nota-se que este valor de impedância impulsiva é próximo daquele obtido na medição com OATL ( $52 \Omega$ ), configurando diferença de apenas 7%.

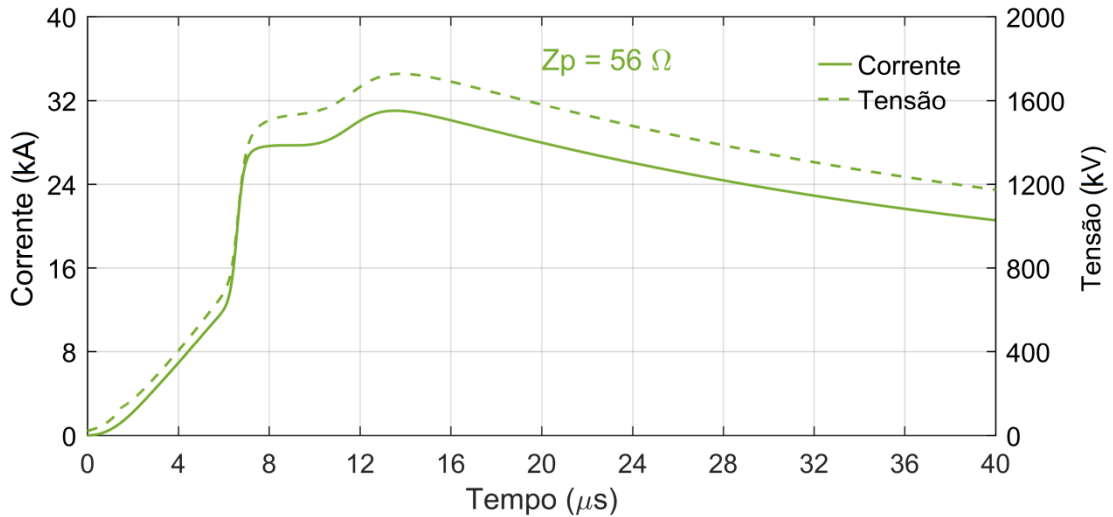


Figura 5.11 - Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo calculada pelo programa HEM para o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,8 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_p = 56 \Omega$ .

A partir dos resultados da simulação, foram também calculadas a impedância transitória e a harmônica. A comparação entre tais impedâncias simuladas e as obtidas pela medição com o arranjo OATL estão apresentadas na Figura 5.12 e Figura 5.13, respectivamente.

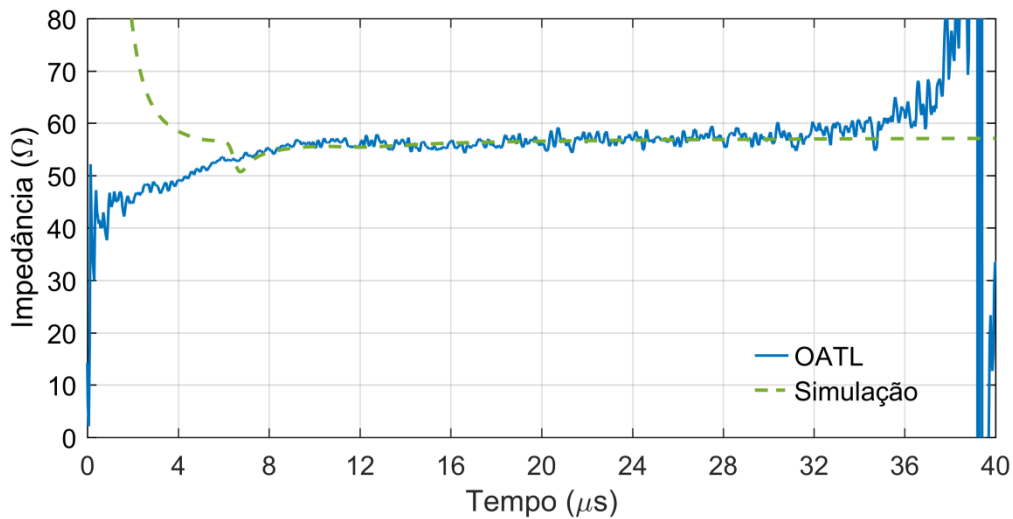


Figura 5.12 - Impedância transitória calculada para a medição realizada com o OATL e para a simulação computacional com a onda duplo pico, considerando o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade.



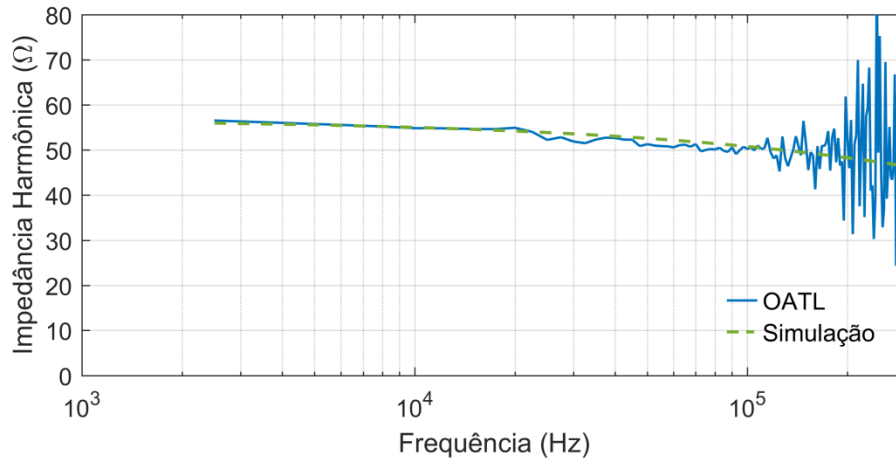


Figura 5.13 - Impedância harmônica calculada para a medição realizada com o OATL e para a simulação computacional com a onda duplo pico, considerando o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade.

Novamente, observa-se que, no intervalo de tempo que precede a chegada da onda refletida, as curvas de impedância transitória apresentadas na Figura 5.12 são coincidentes, ambas possuem valor médio de 56 Ω. Isto exclui a parte inicial da curva, onde defasamentos entre as ondas de corrente e tensão, ainda que muito reduzidos, podem levar a grande variação da impedância transitória, como aquelas observadas antes de 4 μs no caso simulado. Já na Figura 5.13, nota-se que as curvas de impedância harmônica estão praticamente sobrepostas na faixa de 2,5 kHz até 25 kHz. A partir da frequência de 25 kHz, as curvas se distanciam e passam a apresentar uma diferença de cerca de 4%.

A Tabela 5.1 contém o resumo dos resultados de impedância impulsiva, impedância transitória e impedância harmônica obtidos para os três casos analisados: a medição realizada com OATL no circuito de corrente, a medição convencional com longo cabo no circuito de corrente e a simulação realizada com onda de corrente duplo pico.

Tabela 5.1 – Resumo dos resultados obtidos para o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, para os casos da medição realizada com o arranjo OATL, da medição realizada com cabo comum (referência) e da simulação com onda duplo pico.

	$Z_P$	$Z(t)^*$	$Z(\omega)^{**}$
<b>OATL</b>	52 Ω	56 Ω	57 Ω
<b>Referência</b>	53 Ω	56 Ω	57 Ω
<b>Simulação</b>	56 Ω	56 Ω	56 Ω

Nota: \* Valor médio da impedância transitória no intervalo de tempo que precede a chegada da onda refletida;  
 \*\* Valor da impedância harmônica em 2,5 kHz.

Pela tabela, é possível observar a proximidade dos valores alcançados nas medições e na simulação. Em relação à impedância impulsiva, por exemplo, verifica-se uma diferença percentual menor que 2% entre as medições com o arranjo OATL e com a referência, e uma diferença de cerca de 7% entre o OATL e a simulação. Ao comparar os valores de impedância transitória e impedância harmônica, a diferença é ainda menor, uma vez que as curvas apresentadas são praticamente coincidentes.

#### 5.4 Resultados da Resposta do Aterramento Concentrado em Solo de Alta Resistividade ( $\rho=2000 \Omega\text{m}$ ).

Os resultados desta seção estão retratados nas Figura 5.14 e Figura 5.15. Novamente, as medições impulsivas foram realizadas seguindo os arranjos apresentados nas Figura 4.1 e Figura 3.4.

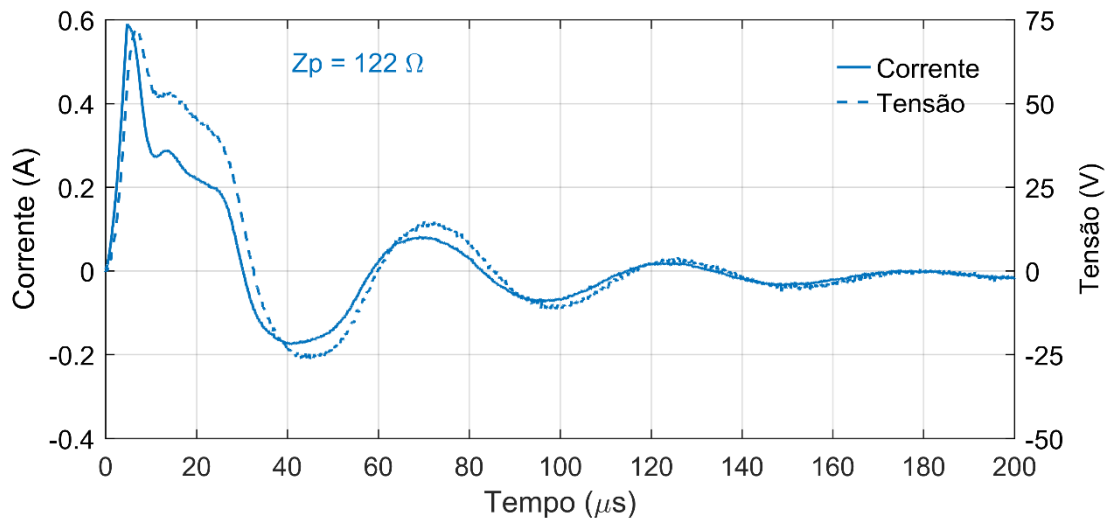


Figura 5.14 – Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento concentrado em solo de alta resistividade, utilizando no circuito de corrente o OATL em aberto. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu\text{s}$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_p = 122 \Omega$ .

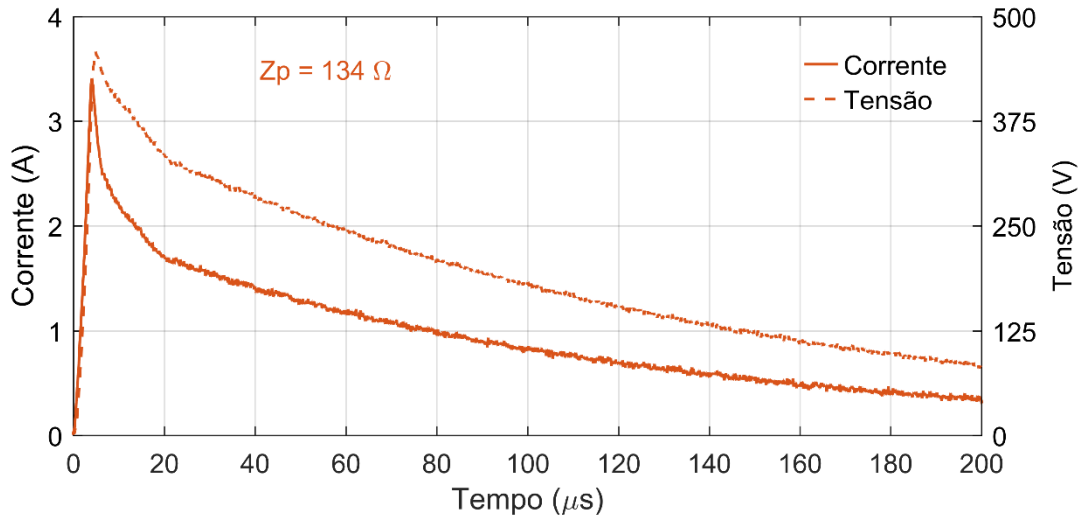


Figura 5.15 – Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento concentrado em solo de alta resistividade, utilizando no circuito de corrente um cabo comum de 110 m aterrado com casamento de impedância. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_P = 134 \Omega$ .

Primeiramente, confrontando as formas de ondas exibidas nas Figura 5.14 e Figura 5.7, observa-se que, em solo de alta resistividade, o valor de pico da corrente injetada e o instante de tempo da chegada da onda refletida foram menores. Esses comportamentos podem ser explicados pelo fato de que, quando posicionado sob um solo de maior resistividade, as características das unidades ATL são modificadas.

Os resultados indicam valores de impedância impulsiva de  $134 \Omega$  para a medição de referência e de  $122 \Omega$  para a medição com o arranjo OATL, ou seja, uma diferença próxima de 9%. Embora tal diferença seja maior que a encontrada no caso do aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, esta não é muito significativa.

A frente das ondas de tensão e corrente exibidas nas Figura 5.14 e Figura 5.15 estão detalhadas na Figura 5.16(a) e Figura 5.16(b), respectivamente. As impedâncias transitórias calculadas para cada tipo de medição são comparadas na Figura 5.16(c).

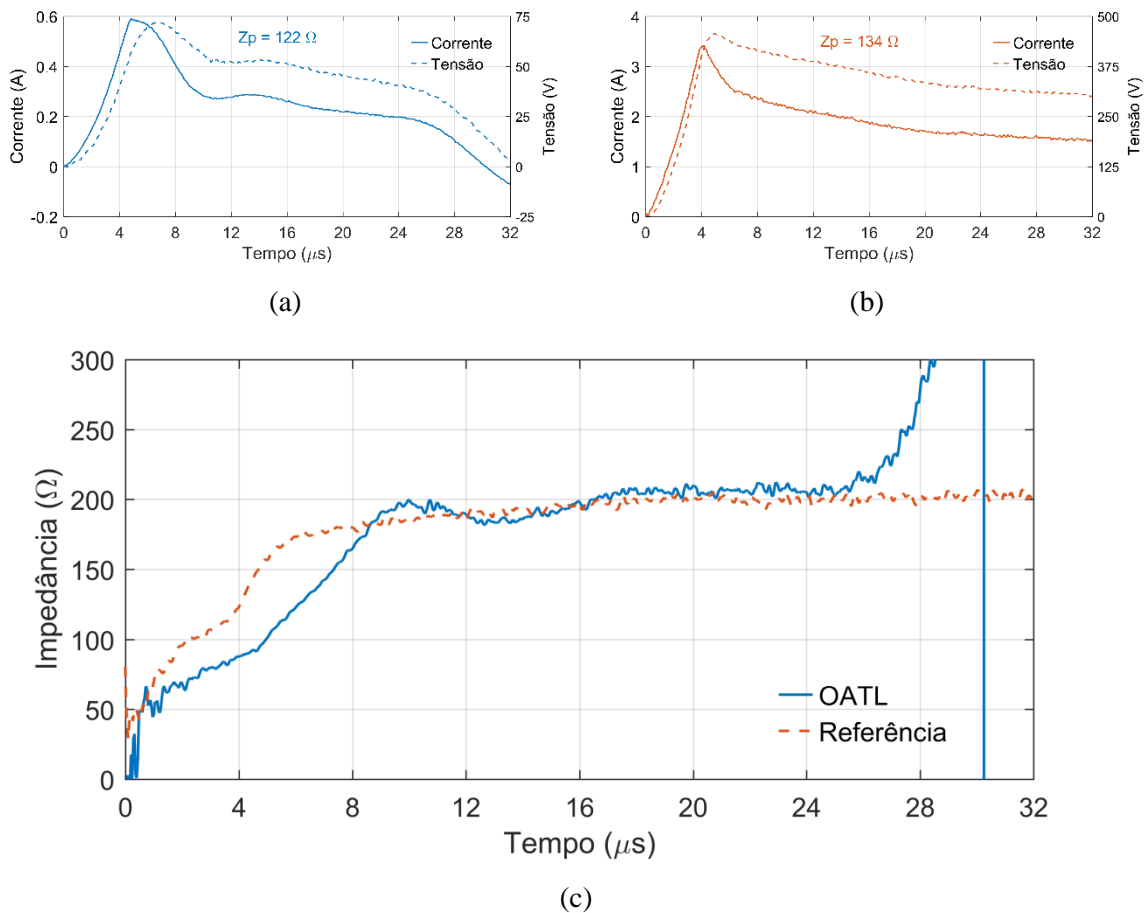


Figura 5.16 – Detalhe do início das curvas de tensão e corrente para os casos da medição do aterramento concentrado em solo de alta resistividade, utilizando no circuito de corrente: (a) arranjo OATL e (b) cabos comuns (referência). (c) Impedância transitória calculada nesse intervalo para ambos os casos.

As curvas de impedância transitórias estão próximas na janela de tempo anterior à chegada da onda refletida em  $T = 25 \mu s$ . Para a medição com o arranjo OATL, a impedância transitória apresenta um valor médio de  $199 \Omega$  entre os instantes de  $10 \mu s$  a  $25 \mu s$ . Já na medição de referência tal valor é de  $196 \Omega$ , considerando o mesmo intervalo de tempo, isto é, uma diferença menor que 2%.

A Figura 5.17 apresenta as curvas de impedância harmônica calculadas ao aplicar a transformada de Fourier nas curvas de tensão e corrente retratadas nas Figura 5.14 e Figura 5.15.

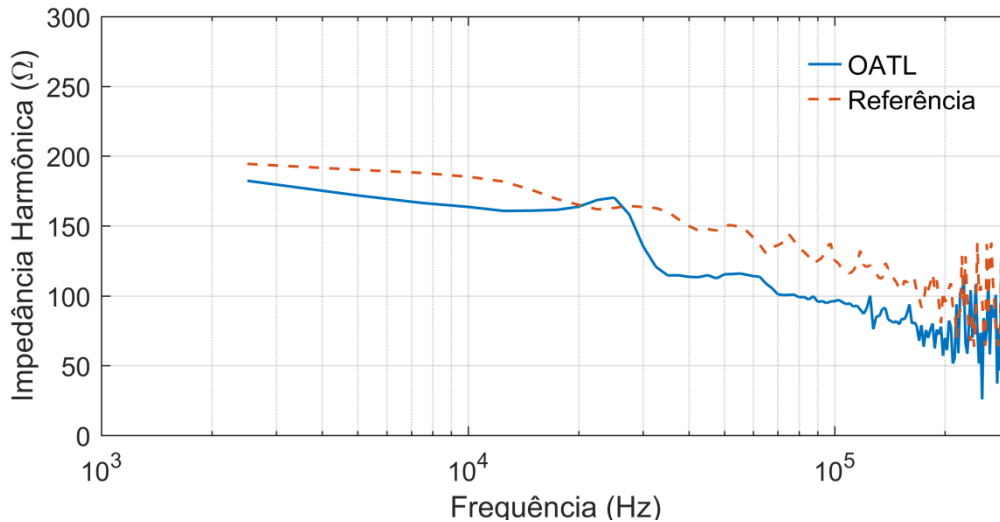


Figura 5.17 – Impedância harmônica calculada para os casos que utilizam no circuito de corrente o OATL e cabo comum (referência).

Pelo gráfico, é possível reparar que na frequência de 2,5 kHz o valor de impedância harmônica é igual a 182 Ω no caso da medição com o arranjo OATL. Por outro lado, no caso da medição de referência, o valor encontrado foi de 194 Ω, sendo assim, uma diferença próxima de 6%. Novamente, observa-se na curva relativa à medição com o arranjo OATL um decaimento próximo da frequência de 25 kHz. A partir dessa frequência, as curvas passam a apresentar uma diferença de cerca de 30% até as altas frequências.

O programa computacional HEM foi utilizado para simular a injeção da corrente duplo pico no aterramento em questão. A elevação de potencial e o valor da impedância impulsiva fornecidos pelo programa estão apresentados na Figura 5.18. Comparando o valor de  $Z_P$  encontrado na simulação (139 Ω) com o medido utilizando o arranjo OATL (122 Ω), verifica-se uma diferença próxima de 12%.

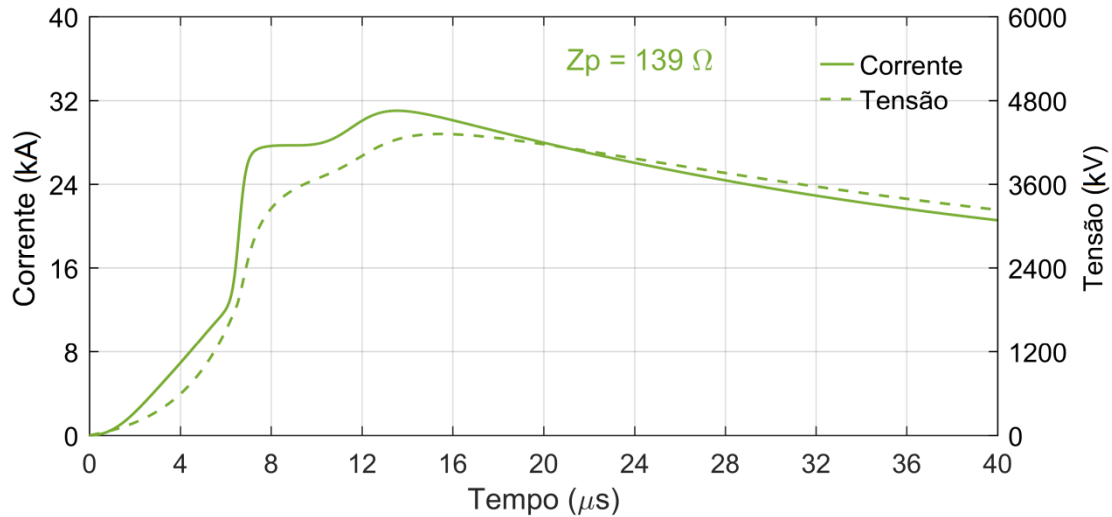


Figura 5.18 – Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo calculadas pelo programa HEM para o aterramento concentrado em solo de baixa resistividade. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,8 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_p = 139 \Omega$ .

As Figura 5.19 e Figura 5.20 exibem, respectivamente, a comparação entre as impedâncias transitórias e entre as impedâncias harmônicas adquiridas pela simulação e pela medição em campo utilizando o arranjo OATL.

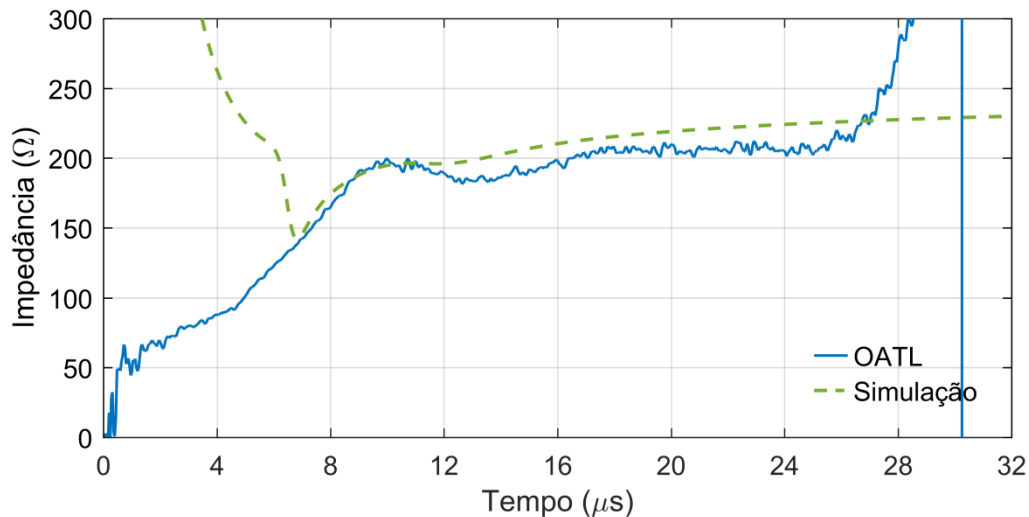


Figura 5.19 – Impedância transitória calculada para a medição realizada com o OATL e para a simulação computacional com a onda duplo pico, considerando o aterramento concentrado em solo de alta resistividade.

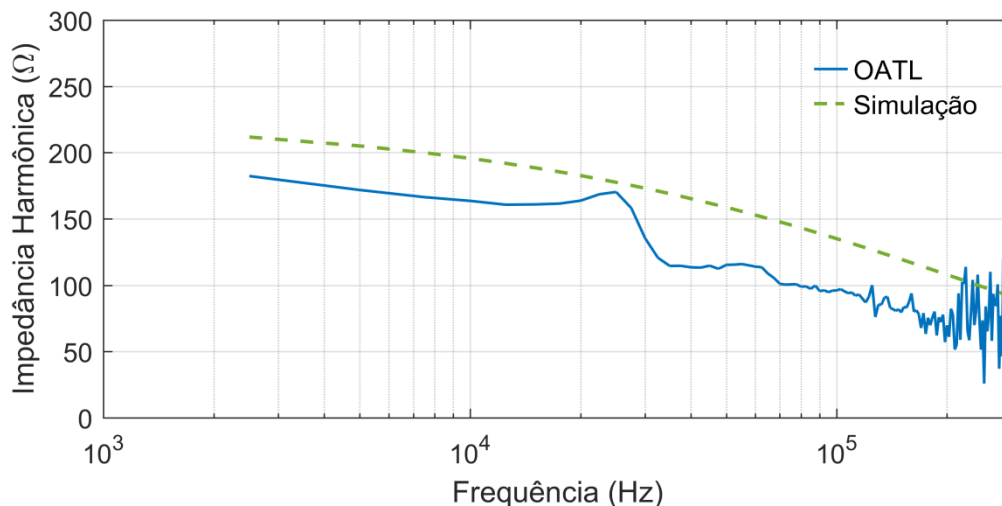


Figura 5.20 – Impedância harmônica calculada para a medição realizada com o arranjo OATL e para a simulação computacional com a onda duplo pico, considerando o aterramento concentrado em solo de alta resistividade.

Nota-se que, no intervalo de tempo de 10  $\mu$ s a 24  $\mu$ s, correspondente à variação lenta da onda impulsiva, as curvas de impedâncias transitórias apresentadas na Figura 5.19 estão próximas. Tais curvas apresentam valor médio de 210  $\Omega$  e 199  $\Omega$  para o caso da simulação computacional e da medição em campo com o arranjo OATL, respectivamente, uma diferença de apenas 5%. Já na Figura 5.20, as curvas de impedância harmônica retratam uma diferença mais significativa entre a simulação e a medição. Em baixa frequência (2,5 kHz), a simulação indica 212  $\Omega$  enquanto a medição com tubos 182  $\Omega$ , uma diferença próxima de 15%.

O resumo dos resultados para o aterramento concentrado em solo de alta resistividade é apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Resumo dos resultados obtidos para o aterramento concentrado em solo de alta resistividade, para os casos da medição realizada com o OATL, da medição realizada com cabo comum (referência) e da simulação com onda duplo pico.

	$Z_P$	$Z(t)^*$	$Z(\omega)^{**}$
<b>OATL</b>	122 $\Omega$	199 $\Omega$	182 $\Omega$
<b>Referência</b>	134 $\Omega$	196 $\Omega$	194 $\Omega$
<b>Simulação</b>	139 $\Omega$	210 $\Omega$	212 $\Omega$

Nota: \* Valor médio da impedância transitória no intervalo de tempo que precede a chegada da onda refletida;

\*\* Valor da impedância harmônica em 2,5 kHz.

A Tabela 5.2 indica diferenças percentuais maiores para os resultados obtidos em solo de alta resistividade: A impedância impulsiva e a impedância harmônica apresentaram erros de 9% e 6%, respectivamente, entre as medições com o arranjo OATL e com cabos convencionais. As diferenças são ainda mais significativas quando se compara a medição com o arranjo OATL e a simulação, essas diferenças ficam mais evidentes, aumentando para 12% e 15%, respectivamente. Tais diferenças são superiores às obtidas em aterramento concentrado em solo de baixa resistividade, conforme apresentado no item 5.3.

## **5.5 Resultados da Resposta do Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão**

Durante a elaboração deste trabalho, foram realizadas medições da resposta impulsiva do aterramento de diversas torres de uma linha de transmissão real de 230 kV, instalada próxima à cidade de Cuiabá, Mato Grosso. Foram feitas medições com as duas configurações de circuito de medição já descritas nesta dissertação, uma utilizando o arranjo OATL e outra com cabos convencionais.

É importante destacar algumas condições em que as medições foram realizadas e que podem interferir nos resultados obtidos. Primeiramente, no trecho da linha de transmissão em questão estão instaladas, em paralelo e relativamente próximas, outras quatro LTs. As pequenas distâncias entre as torres de linhas de transmissão diferentes dificultam o posicionamento das hastes sondas dos circuitos de corrente e de tensão. Além disso, tais torres contribuem para a injeção de sinais espúrios no solo, especialmente ruídos de 60 Hz.

Outro problema encontrado durante as medições foi o relevo e a vegetação no entorno das torres. O pasto apresentava uma altura considerável, impossibilitando o posicionamento do OATL rente ao solo. Esse fato leva ao aumento significativo da impedância de surto dos tubos e, conseqüentemente, diminuição da amplitude da onda impulsiva injetada pelo gerador. Nos casos de medições realizadas em torres cujo aterramento apresentava baixo valor ôhmico, a pequena corrente injetada produz uma elevação de potencial no solo (GPR) muito baixa (menor que 2 V no caso da Torre 56,



por exemplo), tornando o experimento extremamente susceptível a interferências e ruídos.

Em todas as medições realizadas os cabos-guardas permaneceram conectados às estruturas da LT, de maneira que as componentes de baixa frequência das ondas injetadas fluem para o aterramento de torres adjacentes. Isto resulta na modificação das ondas de corrente impressa aos eletrodos, em relação àquela provida pelo gerador.

A seguir, são apresentados os resultados de medição de duas torres: uma autoportante e uma estada.

### 5.5.1 Resultados obtidos para a Torre 56 (Autoportante)

A Figura 5.21 apresenta a montagem da medição impulsiva realizada na Torre 56 (autoportante). Na foto, é possível observar os equipamentos de medição próximos a um pé da torre, além das unidades ATL dispostas no solo e o cabo do circuito de potencial esticado na direção oposta.



Figura 5.21 – Montagem da medição impulsiva na Torre 56 (autoportante) da LT 230 kV, utilizando o OATL no circuito de corrente.

As formas de onda de tensão e corrente para as medições realizadas na Torre 56 (autoportante) estão representadas nas Figura 5.22 e Figura 5.23. Os experimentos foram realizados seguindo as metodologias já expostas neste texto, utilizando no circuito de corrente o arranjo OATL e cabos longos convencionais, respectivamente.

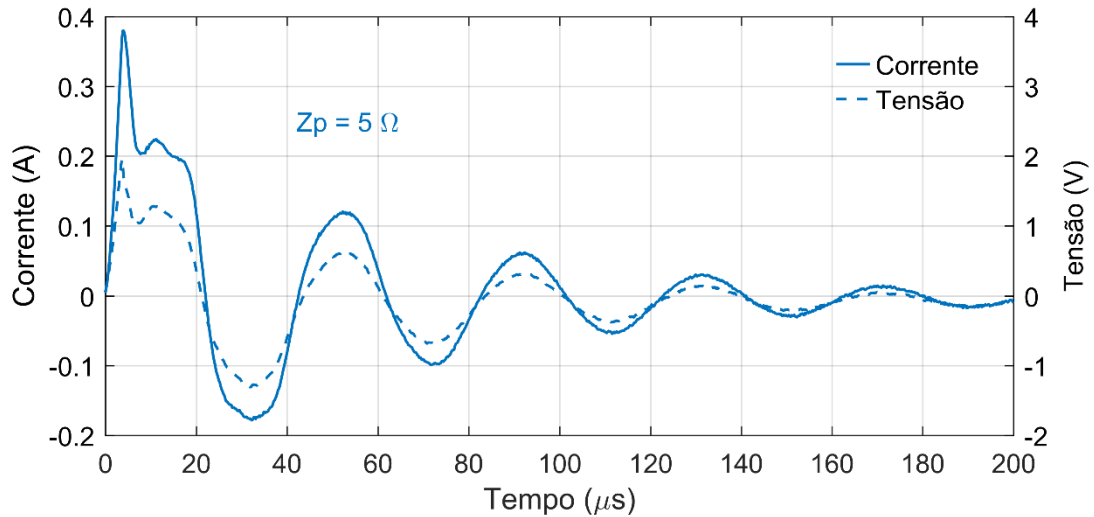


Figura 5.22 - Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento da Torre 56 (autoportante), utilizando no circuito de corrente o arranjo OATL em aberto. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_p = 5 \Omega$ .

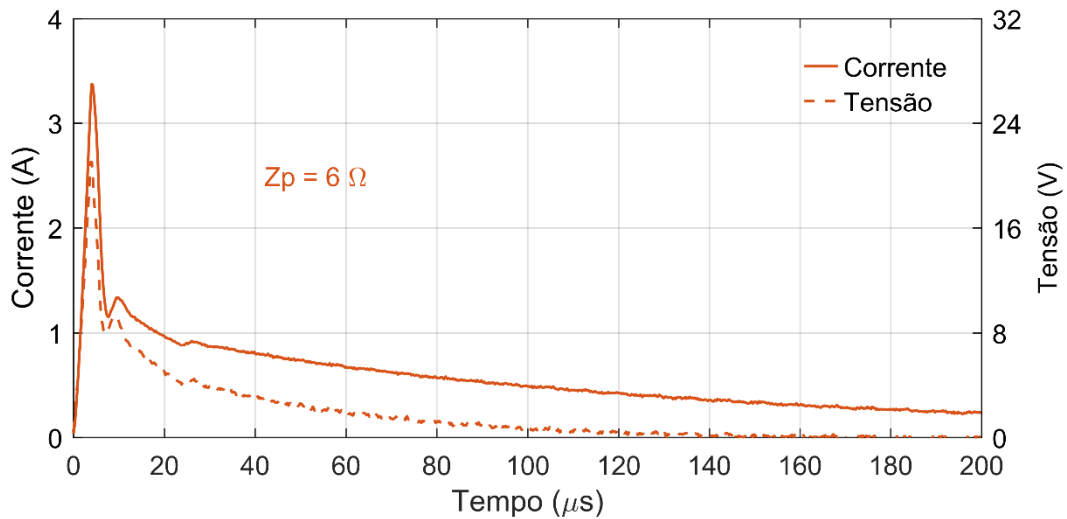


Figura 5.23 - Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento da Torre 56 (autoportante), utilizando no circuito de corrente um cabo comum de 150m. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_p = 6 \Omega$ .

Observa-se na Figura 5.22 que a amplitude e o tempo de cauda da onda de corrente estão menores quando comparados com outras medições que utilizam o arranjo OATL. Esse fato ocorreu porque o OATL foi posicionado em cima de uma vegetação alta, ficando distante do solo. Consequentemente a impedância de surto e a velocidade de propagação aumentam. Nota-se que a baixa corrente injetada e o baixo valor do aterramento resultam em um GRP de apenas 2 V, deixando a onda de tensão detectada susceptível a ruídos. Já na Figura 5.23 percebe-se que há uma queda acentuada após o pico dos sinais, causada pela reflexão das ondas no aterramento auxiliar do circuito de corrente, visto que não foi realizado o casamento de impedância no aterramento auxiliar.

Os resultados obtidos indicam impedância impulsiva  $5 \Omega$  para a medição com os OATL e  $6 \Omega$  para a medição de referência. Embora a diferença absoluta seja de apenas  $1 \Omega$ , percentualmente esse valor indica uma diferença próxima de 17%.

A Figura 5.24 apresenta os detalhes da frente das ondas de tensão e corrente medidas para a Torre 56, assim como a impedância transitória calculada.

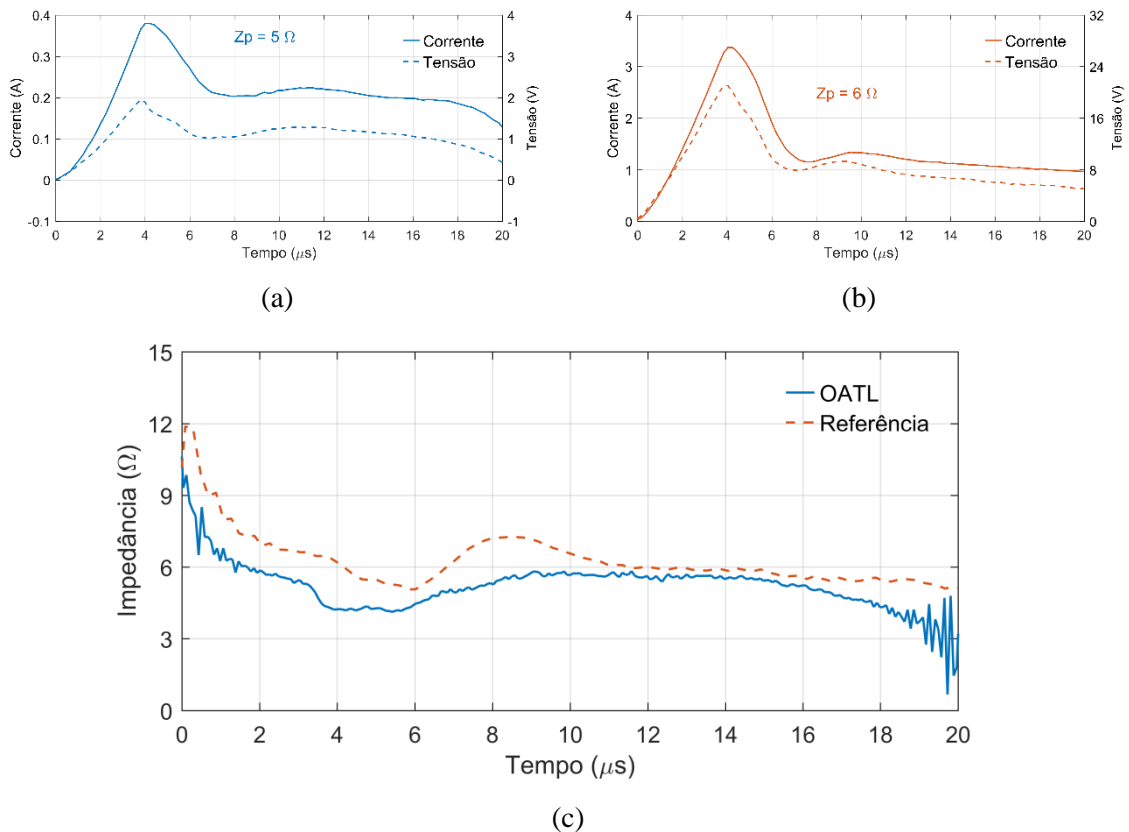


Figura 5.24 - Detalhe do início das curvas de tensão e corrente para os casos da medição da Torre 56 (autoportante), utilizando no circuito de corrente: (a) arranjo OATL e (b) cabos comuns (referência). (c) Impedância transitória calculada nesse intervalo para ambos os casos.

Na Figura 5.24(c), no entorno de  $T=8 \mu\text{s}$ , há uma oscilação considerável na impedância transitória que diz respeito medição de referência, provavelmente devido à reflexão no aterramento auxiliar do retorno de corrente. Em seguida, no intervalo de tempo de  $T=10 \mu\text{s}$  a  $T=17 \mu\text{s}$ , percebe-se que as curvas de impedância transitórias estão próximas. Para a medição com o OATL, a impedância transitória apresenta um valor médio de  $5,6 \Omega$ , enquanto que na medição de referência tal valor é de  $5,9 \Omega$ , uma diferença de 5%.

A Figura 5.25 apresenta o gráfico da impedância harmônica para as medições com o arranjo OATL e com os cabos convencionais. Novamente, as curvas são semelhantes em baixa frequência. Em  $2,5 \text{ kHz}$ , o valor de impedância é igual a  $5,5 \Omega$  para ambas as curvas. Mais uma vez, a curva de impedância harmônica apresenta um decaimento acentuado, dessa vez próxima a frequência de  $40 \text{ kHz}$ .

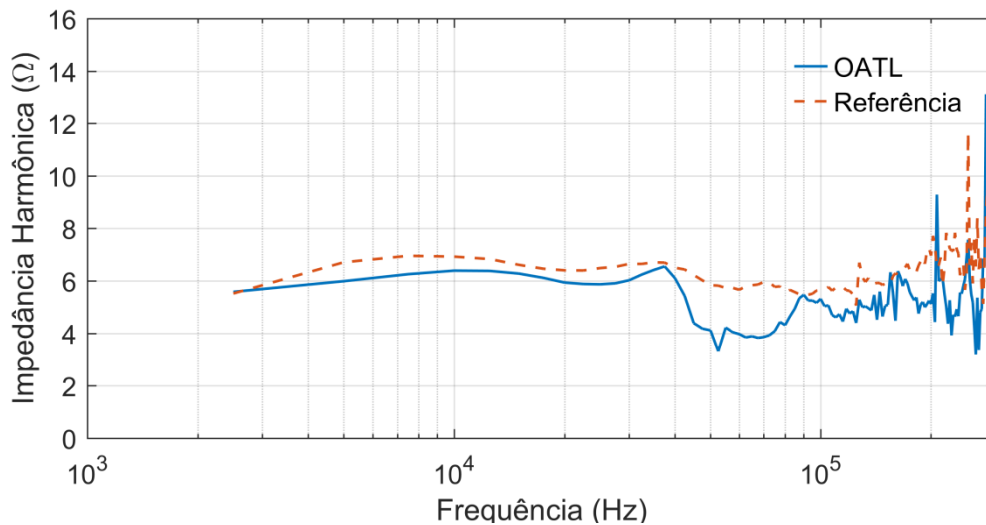


Figura 5.25 - Impedância harmônica calculada para os casos que utilizam no circuito de corrente o arranjo OATL e cabo comum (referência).

A Tabela 5.3 a seguir apresenta a síntese dos resultados obtidos para a Torre 56. Pela tabela, fica evidente a proximidade dos valores medidos de impedância impulsiva, transitória e harmônica.

Tabela 5.3 - Resumo dos resultados obtidos para a Torre 56, para os casos das medições realizadas com o arranjo OATL e com cabo convencional (referência).

	$Z_P$	$Z(t)^*$	$Z(\omega)^{**}$
OATL	5 $\Omega$	5,6 $\Omega$	5,5 $\Omega$
Referência	6 $\Omega$	5,9 $\Omega$	5,5 $\Omega$

Nota: \* Valor médio da impedância transitória no intervalo de tempo que precede a chegada da onda refletida;

\*\* Valor da impedância harmônica em 2,5 kHz.

### 5.5.2 Resultados obtidos para a Torre 123 (Estaiada)

Na Figura 5.26 está a configuração da medição impulsiva realizada na Torre 123 (estaiada). Nota-se o arranjo OATL disposto sobre o solo e os equipamentos de medição próximos do mastro central da torre. O cabo de potencial foi lançado em direção oposta aos tubos.

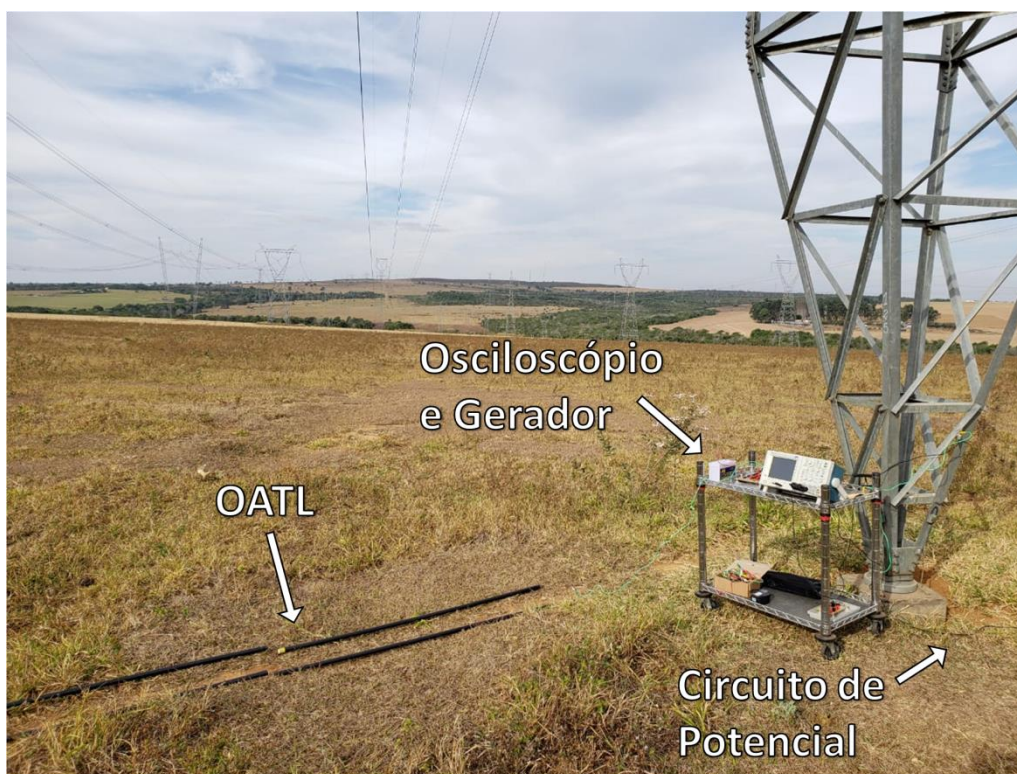


Figura 5.26 - Montagem da medição impulsiva na Torre 123 (estaiada) da LT 230 kV, utilizando as unidades ATL no circuito de corrente.

As Figura 5.27 e Figura 5.28 exibem as ondas de corrente e tensão para as medições realizadas na Torre 123 (estaiada). Na Figura 5.27, os testes foram feitos utilizando o OATL no circuito de corrente, enquanto na Figura 5.28 foram usados cabos convencionais.

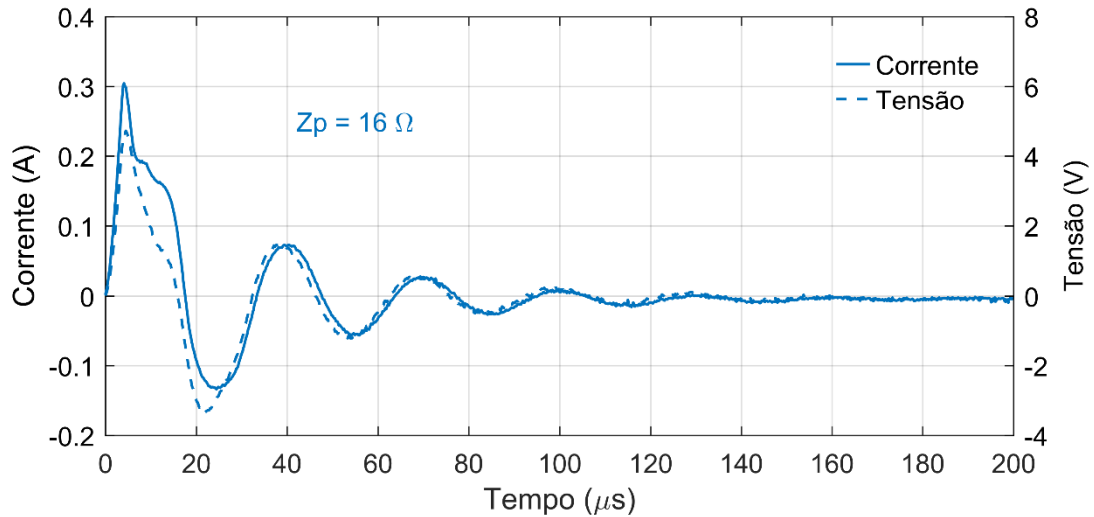


Figura 5.27 - Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento da Torre 123 (estaiada), utilizando no circuito de corrente o arranjo OATL em aberto. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_P = 16 \Omega$ .

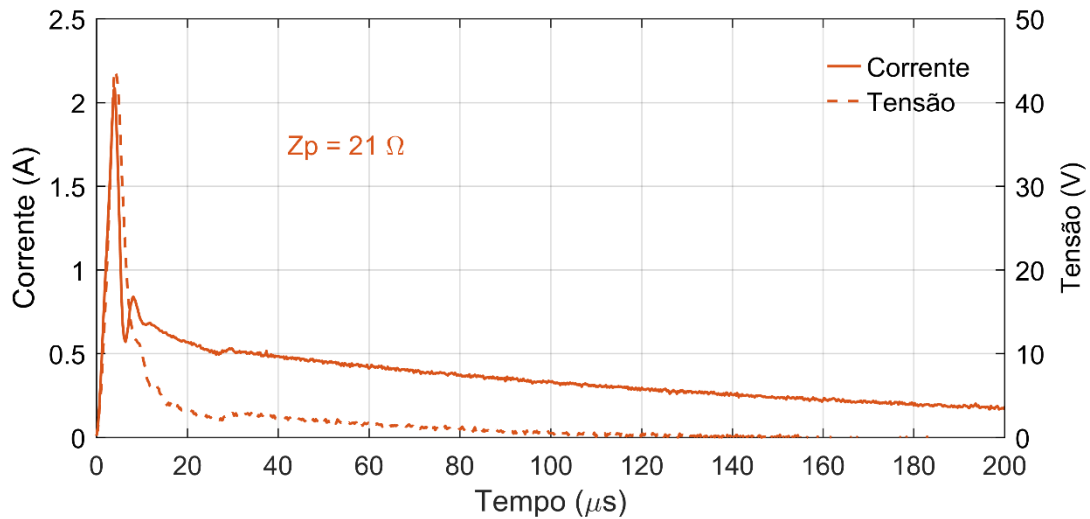


Figura 5.28 - Formas de onda da corrente e da elevação de potencial no solo para o aterramento da Torre 123 (estaiada), utilizando no circuito de corrente um cabo comum de 150 m. Corrente injetada com tempo de frente de  $T_{D30} = 3,5 \mu s$  e impedância impulsiva calculada de  $Z_P = 21 \Omega$ .

As ondas de corrente e tensão obtidas apresentaram forma semelhante às aquelas apresentadas para a Torre 56 (autoportante). Novamente, percebe-se na Figura 5.27 que o tempo de chegada da onda refletida e a amplitude da onda são menores que o esperado, devido à posição relativa da unidade ATL e do solo. Na Figura 5.28, mais uma vez tem-se uma queda abrupta após o pico das ondas, causada pela reflexão de onda no aterramento auxiliar.

As impedâncias impulsivas calculadas foram de  $16\Omega$  e  $21\Omega$ , respectivamente para as medições realizadas com o arranjo OATL e cabos convencionais, ou seja, uma diferença próxima de 24%. Como a impedância de aterramento é maior que a medida na torre 56, as elevações de potenciais obtidas também foram maiores, porém os sinais ainda são susceptíveis a ruídos.

A Figura 5.29 exibe os detalhes das frentes das ondas de corrente e tensão das medições realizadas, bem como as correspondentes curvas de impedância transitória.

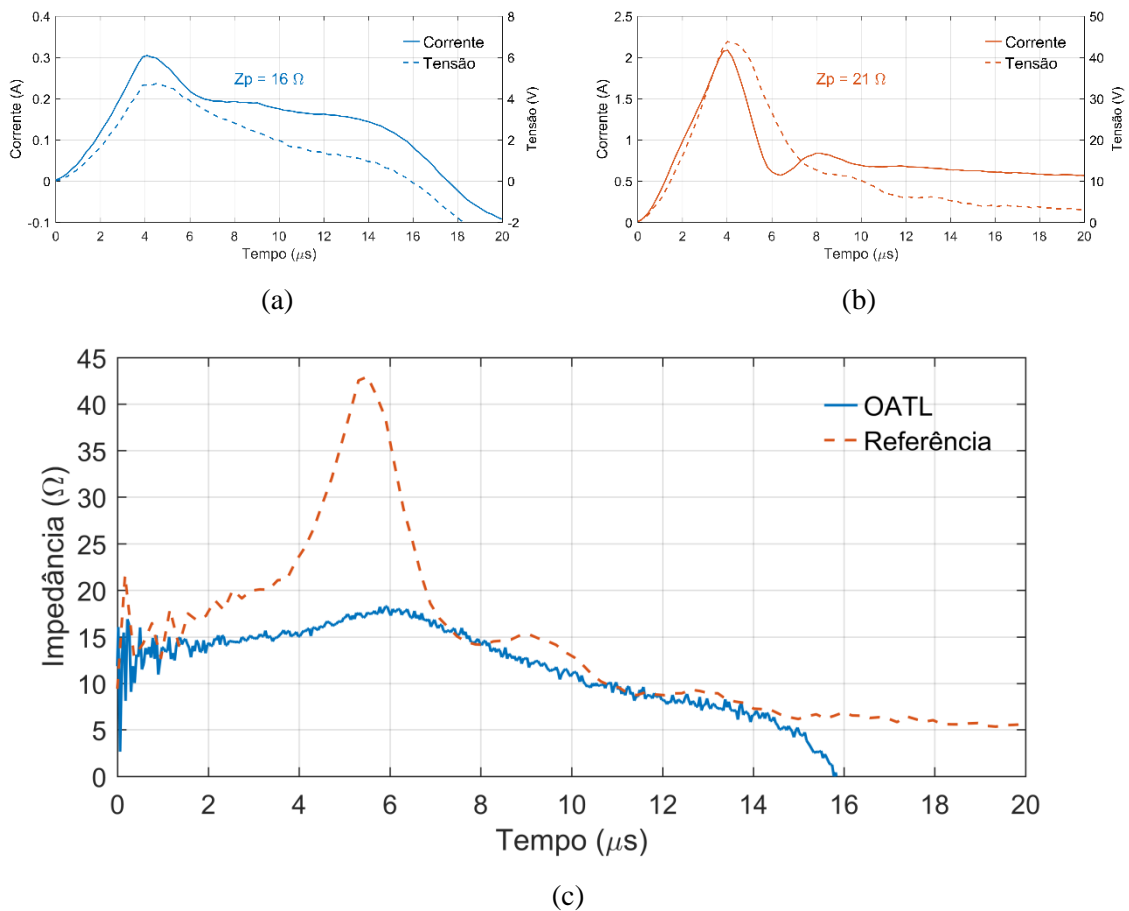


Figura 5.29 - Detalhe do início das curvas de tensão e corrente para os casos da medição do da Torre 123 (estaiada), utilizando no circuito de corrente: (a) arranjo OATL e (b) cabos comuns (referência). (c) Impedância transitória calculada nesse intervalo para ambos os casos.

A curva de impedância transitória obtida pela medição com cabos comuns (referência) apresenta um grande aumento em torno dos 5  $\mu$ s. Após 7  $\mu$ s, as curvas voltam a se aproximar até o instante de 15  $\mu$ s, momento da chegada da onda refletida na extremidade em aberto dos tubos.

Nota-se que ambas as curvas de impedância transitória não apresentam uma região plana, como vista nos resultados apresentados anteriormente. Tal comportamento é explicado pela conexão dos cabos-guardas com as torres da LT e pela alta impedância do aterramento da torre medida, que resultam em uma considerável parcela de corrente injetada desviando para torres adjacentes. No intervalo de tempo de 7  $\mu$ s a 15  $\mu$ s, a impedância transitória calculada decai de 15  $\Omega$  para 5  $\Omega$ .

A seguir, na Figura 5.30, estão retratadas as curvas de impedância harmônicas para as medições com o arranjo OATL e com cabos comuns.

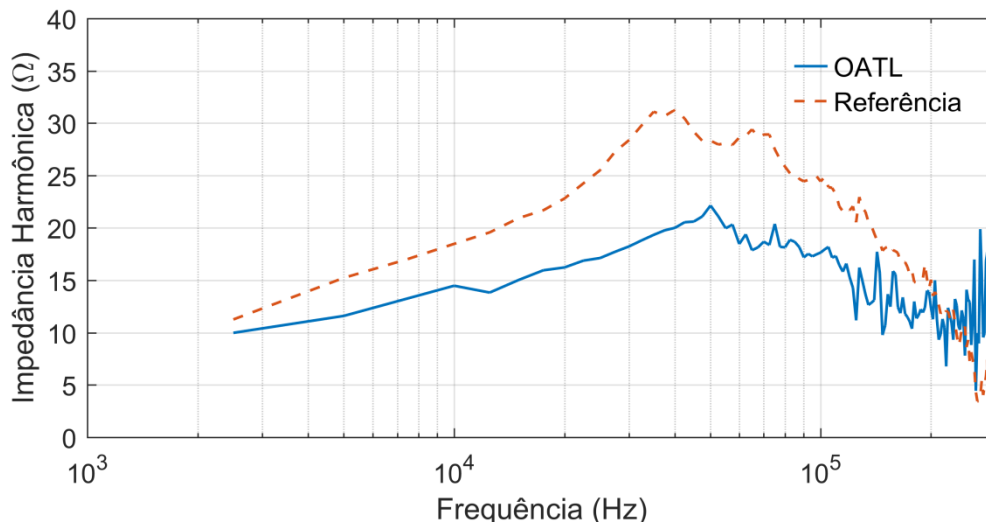


Figura 5.30 - Impedância harmônica calculada para os casos que utilizam no circuito de corrente o arranjo OATL e cabo comum (referência).

Observa-se que as curvas de impedância harmônica da Figura 5.30 apresentam em 2,5 kHz uma impedância menor do que em frequências mais altas, comportamento diferente do constatado em resultados apresentados anteriormente. Esse fato ocorre porque as componentes de baixa frequência da corrente injetada são desviadas para as torres adjacentes, devido ao efeito pelicular ser menos intenso nessa faixa de frequência.



Pelo gráfico, na frequência de 2,5 kHz a impedância harmônica calculada é de 10  $\Omega$  e 11,3  $\Omega$  para as curvas obtidas com os tubos e com a referência, respectivamente. Já em 25 kHz, tais valores são de 17,1  $\Omega$  e 25,5  $\Omega$ . Assim, percebe-se que a diferença percentual passou de 11,5% em 2,5 kHz para 32,9% em 25 kHz.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de impedância impulsiva e impedância harmônica calculadas para as medições realizadas com o OATL e com os cabos comuns (referência). Não foi possível determinar um valor médio para a impedância transitória, uma vez que as curvas obtidas apresentam um decaimento constante.

Tabela 5.4 - Resumo dos resultados obtidos para a Torre 123, para os casos das medições realizadas com o arranjo OATL e com cabo convencional (referência).

	$Z_p$	$Z(t)^*$	$Z(\omega)^{**}$
<b>OATL</b>	16 $\Omega$	- $\Omega$	10 $\Omega$
<b>Referência</b>	21 $\Omega$	- $\Omega$	11,3 $\Omega$

Nota: \* A impedância transitória não apresenta uma região plana, na qual seu valor é constante;

\*\* Valor da impedância harmônica em 2,5 kHz.

---

# 6 Conclusões e Propostas de Continuidade

## 6.1 Introdução

A proposta desta dissertação é a investigação do uso de um arranjo de condutores especiais no circuito de corrente de configurações de medição impulsiva de aterramentos elétricos. Os condutores substituem os longos cabos convencionais utilizados nas práticas de medição, diminuindo drasticamente as distâncias normalmente percorridas, facilitando, agilizando e barateando o processo de medição de aterramentos extensos.

O arranjo dos condutores especiais utilizados nesse trabalho, chamados de OATL (*Open-ended Artificial Transmission Line*), são solenóides constituídos por um fio de cobre esmaltado enrolado ao longo de um tubo PVC. Devido às características construtivas, tais solenóides apresentam uma elevada indutância por unidade de comprimento e, conseqüentemente, baixa velocidade de propagação e elevada impedância de surto.

O arranjo OATL foi utilizado para realizar medições em diferentes configurações de aterramentos instalados em solos com resistividade variada. Testes foram realizados em aterramentos concentrados enterrados em solos de baixa e alta resistividade, bem como em aterramentos de diversas torres de uma linha de transmissão, tipicamente compostos de longos cabos contrapeso. Os resultados obtidos com o uso do OATL foram comparados com aqueles obtidos de medições convencionais e com simulações computacionais.

As conclusões derivadas das análises realizadas em laboratório e dos resultados de medição em campo são apresentadas a seguir, assim como as sugestões de continuidade desse trabalho.

## 6.2 Conclusões

Em relação aos aspectos construtivos e às características das unidades de ATL, podem ser enumeradas as seguintes conclusões:

- As características construtivas determinam principalmente a indutância por unidade de comprimento de uma unidade ATL. Uma elevada indutância implica baixa velocidade de propagação e alta impedância de surto. É necessária uma relação de compromisso para determinar os atributos desejados de uma unidade.
- A associação de unidades em paralelo é capaz de reduzir a impedância de surto dos tubos. A associação em série possibilita aumentar o tempo de propagação da onda injetada. Dessa forma, é possível utilizar arranjos variados de unidades ATL associados em série e/ou paralelo para criar a forma de onda desejada.
- Na associação de unidades em paralelo, deve-se assegurar um espaçamento de no mínimo 10 cm entre os tubos para minimizar efeitos mútuos entre as unidades.
- Os tubos devem ser posicionados o mais próximo possível ao solo para garantir menor impedância de surto e menor velocidade de propagação.

No que concerne ao uso do arranjo OATL na medição impulsiva de aterramentos, pode-se destacar:

- O uso de duas unidades em paralelo na entrada do arranjo de tubos seguido por um único tubo facilita a detecção dos picos das ondas de corrente e tensão, simplificando o cálculo da impedância impulsiva.
- O uso de um total de sete unidades em série foi suficiente para permitir que a onda injetada tenha uma cauda longa o suficiente para calcular a impedância transitória  $Z(t)$  e ter uma boa aproximação da impedância harmônica  $Z(\omega)$  em baixa frequência.

- Devido à alta impedância de surto, o arranjo OATL se torna o elemento limitador de corrente durante a medição de aterramentos. Nesse trabalho, as correntes injetadas variaram de 800 a 300 mA na configuração que utilizava o OATL, enquanto na configuração com cabos convencionais a corrente variou de 5 a 2 A. Assim, nos casos de medições realizadas com o OATL e em aterramentos que apresentam baixo valor de impedância, as tensões medidas podem ser muito baixas (ex. Torre 56), tornando a medição muito susceptível a ruídos espúrios e com resultados menos precisos.
- Os resultados comprovam que com uma única medição utilizando o arranjo OATL é possível calcular a impedância impulsiva, impedância transitória e impedância harmônica.
- As medições da impedância impulsiva  $Z_P$  apresentaram resultados promissores, indicando que a metodologia de medição desenvolvida nesse trabalho é válida. Comparando os valores de impedância impulsiva obtidos com o OATL e com cabos convencionais têm-se, de forma geral, diferenças percentuais menores que 10 % em aterramentos concentrados e entre 15 % a 25 % em aterramentos extensos.
- Os resultados de impedância transitória e da impedância harmônica também foram satisfatórios.
- As simulações computacionais com o programa HEM indicam que a forma de onda de corrente obtida com o arranjo OATL é representativa de primeira corrente de descargas atmosféricas, uma vez que os resultados da simulação são condizentes com os resultados obtidos em campo.
- O cálculo da resistência de baixa frequência (seja por aproximação da impedância transitória ou pela impedância harmônica) não é eficaz nos casos de torres providas de cabos-guardas e com aterramentos com valores elevados (ex. Torre 123), devido à fuga das componentes de baixa frequência da corrente injetada para torres adjacentes.
- Em geral, as medições em torres estaiadas apresentaram resultados menos satisfatórios, sendo necessário um estudo mais aprofundado nos efeitos dos estaios na medição de aterramentos de torres.

### 6.3 Propostas de Continuidade

O trabalho desenvolvido oferece contribuições significativas ao tema de medição impulsiva de aterramentos. Porém, por ser um tema relativamente recente no âmbito acadêmico, ainda há bastante espaço para melhorias e aprimoramentos, tais como:

- Investigar a influência do formato das unidades ATL nos valores de impedância de surto e velocidade de propagação. Para a aplicação, é desejável aumentar a capacitância por unidade de comprimento para diminuir a impedância de surto e a velocidade de propagação.
- Investigar diferentes tipos de arranjos de unidades ATL e a sua influência nos resultados de medições de aterramentos. Associações em paralelo são promissoras em reduzir a impedância de surto do arranjo e diminuir a influência de sinais espúrios, enquanto associações em série permitem alongar a janela de tempo de variação lenta das ondas.
- Aprimorar a forma de interligação das unidades associadas em série/paralelo, de forma a facilitar tal atividade em campo, agilizando o processo.
- Utilizar o arranjo OATL sistematicamente em medições de aterramentos para obter uma massa de dados suficiente para validar a utilização da metodologia proposta nesse trabalho.

# 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.

ALIPIO, R., VISACRO, S., “**Impulse Efficiency of Grounding Electrodes: Effect of Frequency-Dependent Soil Parameters**”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no 2 , pp. 716-723, abril, 2014.

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.

BERGER, K., ANDERSON, B., KRONINGER, H., “**Parameters of Lightning Flashes**”, Electra, no, 80, pp. 223-237, 1975.

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., 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.

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.

CONTI, A. D., VISACRO,S., “**Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms**”, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, maio 2007.

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.

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.

HAYT, W. H.,BUCK, J. A., “**Engineering Electromagnetics**”, livro, pp. 1-596, Mcgraw-HillEditora, Nova Iorque, 2012.

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.

GUIMARÃES, M. B., “**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, fevereiro, 2013.

GUPTA, B. R., THAPAR, B., “**Impulsive Impedance of Grounding Grids**” IEEE Trans. Power App. Sysy., Nov./Dez. 1980, vol. PAS-99, no. 6, pp. 2357-2362.

LIEW A. C., DARVENIZA, M., “**Dynamic Modelo f Impulse Characteristic of Concentrated Earths**”, Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 121, no.2, pp. 123-135, fevereiro 1974.

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.

MAGALHÃES, T. V., “**Investigação de Metodologias para Avaliação da Resposta de Aterramentos de Linhas de Transmissão**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, fevereiro, 2017.

MOUSA, A. M., “**The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes**”, IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 3, pp. 1669-1677, julho, 1994.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO – ONS, “**Submódulo 2.4: Requisitos mínimos para linhas de transmissão**”, Resolução Normativa nº 756/16, 2016.

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.

SMITH-ROSE, R. L., “**The Electrical Properties of Soils for Alternating Current at Radiofrequencies**”, Proc. Royal Soc. London A, vol. 140, no. 841<sup>a</sup>, pp. 359-377, 1933.

SCOTT, J. H., “**Electrical and Magnetic Properties of Rock and Soil**”, Washington, D.C.: Dept. of the Interior, U.S. Geol. Surv., 1966

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., PORTELA, C. M., “**Soil Permittivity and Conductivity Behavior on Frequency Range of Transient Phenomena in Electric Power Systems**”, Int. Symp High Voltage Eng., Braunschweig, Germany, 1987.

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. “**A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke**”, Geophysical Research Letters, vol. 31, no. 7, abril 2004.

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., 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, August, 2016.

VISACRO, S., “**The Use of the Impulse Impedance as a Concise Representation of Grounding Electrodes in Lightning Protection Applications**”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 60, no. 5, pp. 1602-1605, October, 2018.

VISACRO, S., SILVEIRA, F. H., OLIVEIRA, C. H. D. “**Measurements for Qualifying the Lightning Response of Tower-Footing Electrodes of Transmission Lines**”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 61, no. 3, pp. 719-726, June, 2019.

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

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, January, 1984.