

TESE DE DOUTORADO Nº 208

**MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO
UTILIZANDO ONDAS IMPULSIVAS E CONDUTORES DE PEQUENO
COMPRIMENTO NOS CIRCUITOS DE TENSÃO E DE CORRENTE**

Alexander Barros Lima

DATA DA DEFESA: 10/07/2015

Universidade Federal de Minas Gerais

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA E DA RESISTÊNCIA DE
ATERRAMENTO UTILIZANDO ONDAS IMPULSIVAS E
CONDUTORES DE PEQUENO COMPRIMENTO NOS CIRCUITOS
DE TENSÃO E DE CORRENTE**

Alexander Barros Lima

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Belo Horizonte - MG

Julho de 2015

L732m

Lima, Alexander Barros.

Medição da impedância e da resistência de aterramento utilizando ondas impulsivas e cabos de pequeno comprimento nos circuitos de tensão e de corrente [manuscrito] / Alexander Barros Lima. – 2015.

116 f., enc.: il.

Orientador: José Osvaldo Saldanha Paulino.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 110-116.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Raio - Teses. 3. Correntes elétricas - Aterramento - Teses. 4. Linhas elétricas - Teses. 5. Resistência elétrica - Teses. I. Paulino, José Osvaldo Saldanha. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.3(043)


**"Medição da Impedância e da Resistência de Aterramento
Usando Ondas Impulsivas e Condutores de Pequeno
Comprimento No Circuito de Corrente"**

Alexander Barros Lima

Tese de Doutorado 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 Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de julho de 2014.

Por:



Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino
DEE (UFMG) - Orientador



Prof. Dr. José Pissolato Filho
Elétrica (UNICAMP)



Prof. Dr. Célio Fonseca Barbosa
Redes (Fundação CPqD)



Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes
DEE (UFMG)



Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura
DEE (UFMG)

*A minha família por todo o
incentivo, paciência e amor.*

*Ao meu pai Waldir Martins de Lima,
pessoa de notória sabedoria.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, o Criador!

Ao meu orientador, Prof. José Osvaldo, pessoa humana e notável. Todas as letras do alfabeto combinadas formando palavras nas mais diversas línguas ainda é pouco para expressar o meu profundo agradecimento, admiração e respeito construídos ao longo destes anos. Muito obrigado pela formação do meu conhecimento, mas, sobretudo, pelo bom convívio cotidiano com direito a boas conversas, cafés, almoços, piadas e muito barro nas medições de pé-de-torre... Você tem o dom natural de transformar todos esses momentos simples em histórias que nos acompanham e irão me acompanhar por toda a vida... Haja história...

Ao Prof. Wallace, ser de notória perspicácia, sempre procurando dar luz onde eu me deparava com escuridão. Entre uma reunião e outra (quem o conhece sabe a que me refiro) sempre estava lá, pronto para discutir e ajudar. Muito obrigado pela sua atenção e pelo bom convívio cotidiano. Não poderia deixar de agradecer, claro, por me apresentar as mil facetas da fita crepe. O mundo agora não é mais mesmo...

A minha querida esposa Lilian, exemplo de pessoa e perseverança. Sua paciência, incentivo e entusiasmo foram determinantes nesta minha caminhada. Obrigado por me dizer sempre com tanto entusiasmo para continuar, que dias melhores iriam chegar. Isso fez a diferença!

À minha querida mãe, Catarina, sempre presente em todos os passos de minha vida, desde quando do seu colo descí para caminhar com minhas próprias pernas. Olhos zelosos e sempre atentos que nos guardam e observam. Estaremos sempre caminhando de mãos dadas nesses e em todos os próximos passos vindouros.

Ao meu pai, Waldir (*in memoriam*). Mais uma etapa se concretizando...

Aos meus filhos, Tairone, Édipo e Lucas, presentes de Deus. Obrigado pela paciência, amor e compreensão.

Ao meu irmão, amigo e compadre, Stuart, ser iluminado. Obrigado por sua amizade e incentivo. Nossos bate-papos sempre foram, são e serão revigorantes.

Aos professores Jaime, Ivan, Glássio e Antônio Emílio pelo bom convívio, conversas, discussões e choros futebolísticos.

Ao meu amigo Alexandre Kascher. Suas palavras de incentivo, sua torcida, seu entusiasmo e seu apoio sempre foram renovadores. Muitas vezes você surgiu em momentos em que o nível de energia já estava baixo... Obrigado!

Ao Eng. Maurissone Ferreira Guimarães, por acreditar neste trabalho e apoiá-lo de maneira incondicional.

Ao meu amigo Carlos, por estar sempre pronto e bem-disposto a me ajudar nas medições. Nem mesmo o sol e o frio conseguiram abalar a sua disposição. Espero poder retribuir, de alguma forma, nessa sua jornada que agora começa. Boa sorte! Seja feliz!

Aos meus amigos do Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética, Marco Túlio, Rodrigo, Glauton, Diogo, Pedro e Leonardo pelo bom convívio e pelos cafés sempre acompanhados de boas conversas.

Ao Prof. Oriane, que nos deixou tão cedo. Sinto-me um felizado por ter tido a oportunidade de lhe conhecer e termos um convívio de muita alegria, ainda que por um tempo muito breve. Os corredores da Escola nunca mais foram os mesmos sem suas risadas.

Ao meu tio e amigo, Luiz. Sem a sua amizade e compreensão seria impossível eu seguir as trilhas que me conduziram para o lugar onde estou chegando. Não poderia deixar de lhe agradecer também pela ajuda, pelo suporte e por ter disponibilizado os locais onde fiz muitas medições. Sem isso este trabalho não teria caminhado.

Ao meu primo e companheiro Johnny. Obrigado pela ajuda, pelo suporte e por disponibilizar prontamente o local onde muitas hastes foram cravadas e cabos foram enterrados. Haja braço, haja perna e haja costas... Com sol forte e sem água, então, haja... Valeu meu amigo!

Aos meus sempre bem-dispostos companheiros Alisson e Hudson. A ajuda e presteza de vocês sempre fez toda a diferença.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gérias - UFMG, pelo apoio e contribuição durante este percurso.

O presente trabalho foi financiado com recursos de um Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento celebrado entre a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) e a UFMG. Meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Esta tese apresenta uma técnica usada na medição da impedância e da resistência de aterramento, onde o circuito de corrente constituído por um cabo simples, normalmente bastante longo, é substituído por uma *Linha Infinita Artificial* (LIA). Devido às características construtivas, este elemento se assemelha a uma linha de transmissão de perdas desprezíveis e de baixa velocidade de propagação. A principal vantagem em se usar esse elemento, reside no fato do seu comprimento ser pequeno se comparado ao dos circuitos convencionais que usam o cabo simples. A sua efetividade foi verificada por meio de medições feitas em aterramentos em condições reais de campo. Além disso, a impedância de aterramento também é determinada com técnicas não convencionais, sendo uma em que o eletrodo do circuito de tensão não está posicionado em um local onde não há elevação de potencial no solo e outra onde o circuito de corrente não é aterrado na sua extremidade distante (linha aberta). No primeiro caso, a técnica torna possível determinar a impedância com um circuito de tensão de comprimento menor do que o convencional. Já no segundo caso, não aterrar a extremidade distante do circuito de corrente é particularmente interessante quando no local de medição não há a disponibilidade da terra, como em áreas urbanas. Neste trabalho são apresentados, também, os resultados de medições feitas em campo para determinar a resistência de aterramento a partir do mesmo arranjo usado na medição da impedância. Uma comparação de resultados foi feita com os valores obtidos com um terrômetro, ficando clara a boa concordância de resultados e a efetividade da técnica.

Palavras chave: Aterramentos, impedância de aterramento, resistência de aterramento, linha de transmissão, descarga atmosférica.

ABSTRACT

This PhD thesis presents a technique used in grounding impedance and resistance measurements where the current circuit consisting of a typically long single wire is replaced by an *Artificial Infinite Line*. Due to the constructive characteristics, this element is similar to transmission line with negligible losses and low speed propagation. The main attractiveness of this element is that its length is small compared with those circuits that use single wire. The effectiveness of this element was verified by measurements under real field conditions. Furthermore, grounding impedance is also determined with unconventional techniques, one in which the electrode of the voltage circuit is not positioned in a place where there is no potential rise on the ground and in the another one the current circuit is not grounded at far end (open line). In the first one, the technique makes it possible to determine de impedance with a voltage circuit shorter than conventional circuit. In the second one, do not ground the far end of the current circuit is particularly interesting when earth in measurement site is not available. The results of measurements performed in the field to determine the grounding resistances with the same arrangement used to determine the impedance are also shown. A comparison of results was made with values obtained with a resistance tester becoming clear a good agreement of results and the effectiveness of the technique.

Keywords: Grounding, grounding impedance, grounding resistance, transmission line, lightning.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Fig. 2.1 - Esquema para a medição da resistência de aterramento.....	20
Fig. 2.2 - Configuração usada na medição da resistência de aterramento. Adaptado de [42].....	21
Fig. 2.3 - Resistência de aterramento calculada. Retirado de [42]. (a) frequência de operação: 80-Hz e (b) frequência de operação: 500-Hz.....	22
Fig. 2.4 - Resistência de aterramento calculada considerando o efeito da variação frequência. Retirado de [42].....	23
Fig. 2.5 - Representação esquemática do arranjo usado no <i>Oblique-Probe Method</i>	23
Fig. 2.6 - (a) resistência de aterramento determinada a partir da equação de uma reta; (b) comparação de resultados obtidos a partir do Método da Queda de Potencial e do <i>Oblique-Probe Method</i> . Fonte: adaptado de [43].....	24
Fig. 2.7 - Arranjo usado nas medições. Adaptado de [46].....	25
Fig. 2.8 - Diagrama esquemático do arranjo usado na medição. Retirado de [47].....	26
Fig. 2.9 - Sistema de medição da impedância de aterramento. Retirado de [48].....	27
Fig. 2.10 - Arranjo de medição de impedância de aterramento. Retirado de [50].....	28
Fig. 2.11 - Vista lateral e superior dos arranjos para teste da resposta transitória de um eletrodo de aterramento horizontal. Retirado de [51].....	29
Fig. 2.12 - Tensão desenvolvida no ponto de entrada de corrente em relação ao cabo CT. Retirado de [51].....	30
Fig. 2.13 - Arranjo do tipo “dipolo” usado. Retirado de [49].....	31
Fig. 2.14 - Impedância de surto dos cabos usados no circuito de corrente obtidas por meio de (a) simulação e (b) medição. Adaptado de [49].....	32
Fig. 2.15 - Impedância do cabo usado no circuito de corrente para diferentes alturas. Adaptado de [49].....	33
Fig. 2.16 - Arranjo usado para determinar a impedância impulsiva, Z_p , a partir da impedância transitória, $z(t)$. Adaptado de [49].....	34
Fig. 2.17 - (a) corrente aplicada na base da torre; (b) tensão desenvolvida na base da torre. Adaptado de [49].....	35
Fig. 2.18 - Impedância transitória, $z(t)$ ($\rho = 50 \Omega$ m). Adaptado de [49].....	35
Fig. 2.19 - Medição da impedância de uma linha de 161 kV, $R_g = 40 \Omega$, $\rho = 175 \Omega$ m. Retirado de [52].	36
Fig. 2.20 - Medição da impedância de uma linha de 500-kV, com $R_g = 23 \Omega$. Retirado de [52].	37
Fig. 2.21 - Arranjo usado nas medições, tendo o cabo CC forma de “zig-zag”. Retirado de [55].....	38
Fig. 2.22 - Impedância de aterramento, uma volta de 80m. Retirado de [55].....	38
Fig. 2.23 - Impedância de aterramento, zig-zag com cinco voltas, condutores espaçados de 3m. Fonte: retirado de [55].....	39

Fig. 2.24 - Impedância de aterramento, zig-zag com seis voltas, condutores espaçados de 1m. Fonte: retirado de [55].	39
Fig. 2.25 - Arranjo usado para verificar a tensão induzida no condutor posicionado acima do solo devido a uma corrente que passa no cabo contrapeso. Fonte: adaptado de [60].	40
Fig. 3.1 - Arranjo usado em uma medição da impedância de aterramento.	43
Fig. 3.2 - Onda impulsiva propagando em direção ao aterramento sob teste e em direção ao aterramento auxiliar de corrente.	44
Fig. 3.3 - Arranjo construtivo da LIA, vista lateral e frontal.	46
Fig. 3.4 - Linha Infinita Artificial (LIA) implementada.	46
Fig. 3.5 - Arranjo usado para a medição da impedância e velocidade de propagação nas LIAs.	47
Fig. 3.6 - Impulso gerado, fonte aberta.	47
Fig. 3.7 - Curvas da tensão $v(t)$ e da corrente $i(t)$, para (a) 2 LIAs, (b) 3 LIAs e (c) 4 LIAs.	48
Fig. 3.8 - Curvas da tensão $v(t)$ e da corrente $i(t)$ com as LIAs: (a) sobre um piso cimentado e (b) sobre um gramado bem aparado.	49
Fig. 3.9 - Impedância de surto da LIA ($l = 12$ m), (a) no piso cimentado e (b) no piso gramado.	50
Fig. 3.10 - Variação na altura das LIAs em relação ao solo, suportadas por peças de madeira.	51
Fig. 3.11 - Dependência do tempo de trânsito e da velocidade de propagação com relação à altura.	51
Fig. 3.12 - Impedância característica variando com a altura.	52
Fig. 3.13 - Curvas (a) da tensão e da corrente e (b) da impedância transitória. (piso gramado, $L' = 307 \mu\text{H/m}$, $C' = 82 \text{ pF/m}$).	53
Fig. 3.14 - Curvas (a) da tensão e da corrente e (b) da impedância transitória. (piso cimentado, $L' = 263 \mu\text{H/m}$, $C' = 90 \text{ pF/m}$).	54
Fig. 3.15 - Arranjo usado na medição.	54
Fig. 3.16 - Onda de tensão na saída do gerador.	55
Fig. 3.17 - Resultados obtidos por meio de simulação e medição. (eletrodo horizontal, $l = 18$ m, $r = 6,35$ mm, $h = 20$ cm, $\rho_e = 1.190 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 15$).	57
Fig. 3.18 - Resultados obtidos por meio de simulação e medição. (eletrodo horizontal, $l = 12$ m, $r = 6,35$ mm, $h = 20$ cm, $\rho_e = 1.091 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 15$).	58
Fig. 3.19 - Resultados obtidos por meio de simulação e medição. (eletrodo vertical, $l = 2.4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 12''$), $\rho_e = 525 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 15$).	58
Fig. 3.20 - Curvas $v(t)$, $i(t)$ e $z(t)$. Aterramento: eletrodo horizontal, $l = 18$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 12''$), $\rho_e = 660 \Omega\text{m}$. Circuito de corrente: (a) cabo simples, 200 m; (b) LIA 12 m.	60
Fig. 3.21 - Resultados obtidos na medição usando LIAs nos circuitos de tensão e de corrente. (eletrodo vertical, $l = 2.4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 12''$), $\rho_e = 453 \Omega\text{m}$).	61
Fig. 3.22 - Descontinuidade devido às conexões das LIAs.	61
Fig. 3.23 - Representação esquemática para as LIAs sobre o solo em condição de campo (vista lateral).	62
Fig. 3.24 - Formação de "barrigas" devido aos contornos do solo.	63
Fig. 4.1 - Caracterização da reta que determina o valor da impedância de aterramento (Z_∞).	66

Fig. 4.2 – Arranjo usado para a medição das impedâncias Z_{d1} e Z_{d2} às distâncias d_1 e d_2	66
Fig. 4.3 – Impedâncias $z_{d1}(t)$ e $z_{d2}(t)$ medidas às distâncias d_1 e d_2 , respectivamente. (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$, $\rho = 2.219 \Omega m$).....	67
Fig. 4.4 – Curvas de impedâncias. Aterramento constituído por uma haste (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$, $\rho = 2.219 \Omega m$).	68
Fig. 4.5 – Método do Deslocamento Oblíquo: arranjo de medição. (haste, $l = 2,4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 12''$), $\rho_e = 954 \Omega m$)	69
Fig. 4.6 – Conjunto de curvas de impedâncias. (haste, $l = 2,4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 12''$), $\rho_e = 954 \Omega m$).....	70
Fig. 4.7 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3$ m e $d_2 = 0,6$ m) e (b) erro percentual.	71
Fig. 4.8 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3$ m e $d_2 = 0,9$ m) e (b) erro percentual.	71
Fig. 4.9 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3$ m e $d_2 = 1,2$ m) e (b) erro percentual.	71
Fig. 4.10 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3$ m e $d_2 = 1,5$ m) e (b) erro percentual.	72
Fig. 4.11 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3$ m e $d_2 = 2$ m) e (b) erro percentual....	72
Fig. 4.12 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6$ m e $d_2 = 0,9$ m) e (b) erro percentual.	72
Fig. 4.13 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6$ m e $d_2 = 1,2$ m) e (b) erro percentual.	73
Fig. 4.14 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6$ m e $d_2 = 1,5$ m) e (b) erro percentual.	73
Fig. 4.15 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6$ m e $d_2 = 2$ m) e (b) erro percentual....	73
Fig. 4.16 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9$ m e $d_2 = 1,2$ m) e (b) erro percentual.	74
Fig. 4.17 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9$ m e $d_2 = 1,5$ m) e (b) erro percentual.	74
Fig. 4.18 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9$ m e $d_2 = 2$ m) e (b) erro percentual....	74
Fig. 4.19 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,2$ m e $d_2 = 1,5$ m) e (b) erro percentual.	75
Fig. 4.20 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,2$ m e $d_2 = 2$ m) e (b) erro percentual....	75
Fig. 4.21 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_\infty = 4$ m) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,5$ m e $d_2 = 2$ m) e (b) erro percentual....	75
Fig. 4.22 – Arranjo usado nas medições em aterramentos constituídos por eletrodos horizontais.	77
Fig. 4.23 – Imagens dos arranjos de medição em campo. Fonte: feito pelo autor.	77

Fig. 4.24 – Conjunto de curvas de impedância. (eletrodo horizontal, $l = 6\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$)	78
Fig. 4.25 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 4\text{ m}$) e (b) erro percentual....	79
Fig. 4.26 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual....	79
Fig. 4.27 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	79
Fig. 4.28 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual....	80
Fig. 4.29 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	80
Fig. 4.30 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	80
Fig. 4.31 – Conjunto de curvas de impedância. (eletrodo horizontal, $l = 12\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$)	81
Fig. 4.32 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 4\text{ m}$) e (b) erro percentual....	82
Fig. 4.33 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual....	82
Fig. 4.34 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	82
Fig. 4.35 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 10\text{ m}$) e (b) erro percentual.	83
Fig. 4.36 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual....	83
Fig. 4.37 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	83
Fig. 4.38 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 10\text{ m}$) e (b) erro percentual.	84
Fig. 4.39 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual....	84
Fig. 4.40 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6\text{ m}$ e $d_2 = 10\text{ m}$) e (b) erro percentual.	84
Fig. 4.41 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 8\text{ m}$ e $d_2 = 10\text{ m}$) e (b) erro percentual.	85
Fig. 4.42 – Arranjo usados na medição.....	86
Fig. 4.43 – Resultados obtidos com o final do circuito de corrente (LIAs) aterrado (haste de 20 cm) e não aterrado (circuito aberto). Eletrodo horizontal, $l = 18\text{ m}$, $r = 6,35\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$, $p_e = 802\ \Omega$.	87
Fig. 4.44 – Resultados obtidos com o final do circuito de corrente (LIAs) aterrado (haste de 20 cm) e não aterrado (circuito aberto). Eletrodo horizontal, $l = 12\text{ m}$, $r = 6,35\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$, $p_e = 730\ \Omega$.	88
Fig. 5.1 – Instantes iniciais que precedem a estabilidade da corrente gerada pelo terrômetro.....	92

Fig. 5.2 – Curvas das ondas de tensão e de corrente gerados pelo terrômetro.....	94
Fig. 5.3 – Resistência definida pela relação entre curvas tensão-corrente apresentadas na Fig. 5.2....	94
Fig. 5.4 – Arranjo usado na medição da resistência de aterramento.	94
Fig. 5.5 – Curvas obtidas na medição da resistência de aterramento. Eletrodo vertical, $\ell = 2,1$ m, $r = 6,25$ mm, $\rho = 1.341 \Omega \cdot \text{m}$, $R_t = 629 \Omega$	95
Fig. 5.6 – Curvas obtidas na medição de resistência de aterramento. Eletrodo vertical, $\ell = 2,1$ m, $r = 6,25$ mm, $\rho = 2.150 \Omega \cdot \text{m}$, $R_t = 1.008 \Omega$	96
Fig. 5.7 – Curvas obtidas na medição de resistência de aterramento. Eletrodo horizontal, $\ell = 6$ m, $r = 5$ mm, $\rho = 1.188 \Omega \cdot \text{m}$, $R_t = 282 \Omega$	96
Fig. 5.8 – Arranjo para medição da resistência de aterramento.....	98
Fig. 5.9 – Formas de onda de tensão (a) base de tempo de $10 \mu\text{s}$ e (b) base de tempo de $50 \mu\text{s}$	98
Fig. 5.10 – Curvas da tensão, corrente e impedância transitória. Eletrodo horizontal, $\ell = 18$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 1.113 \Omega \text{m}$, $R_t = 112 \Omega$	101
Fig. 5.11 – Curvas da impedância transitória. Eletrodo horizontal, $\ell = 12$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 1.109 \Omega \text{m}$, $R_t = 152 \Omega$	102
Fig. 5.12 – Curvas da impedância transitória. Eletrodo horizontal, $\ell = 18$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 802 \Omega \text{m}$, $R_t = 79 \Omega$	103
Fig. 5.13 – Curvas da impedância transitória. Eletrodo horizontal, $\ell = 12$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 795 \Omega \text{m}$, $R_t = 109 \Omega$	103
Fig. 5.14 – Curvas da impedância transitória. Eletrodo vertical, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,25$ mm, $\rho = 954 \Omega \text{m}$, $R_t = 450 \Omega$	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos aterramentos.	55
Tabela 2 - Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (haste, $\ell = 2,4\text{ m}$, $r = 6,35\text{ mm}$, $\rho_e = 954\ \Omega\text{m}$).	76
Tabela 3 - Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (eletrodo horizontal, $\ell = 6\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$).	81
Tabela 4 - Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (eletrodo horizontal, $\ell = 12\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$).	85

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 MEDIÇÕES EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS.....	19
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
3 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO USANDO UM CIRCUITO DE CORRENTE DE PEQUENO COMPRIMENTO.....	42
3.1 INTRODUÇÃO.....	42
3.2 ASPECTOS TEÓRICOS DO MÉTODO PROPOSTO	42
3.3 LINHA INFINITA ARTIFICIAL (LIA).....	46
3.3.1 <i>Características construtivas</i>	46
3.3.2 <i>Velocidade de propagação e tempo de trânsito</i>	47
3.3.3 <i>Parâmetros elétricos e impedância característica (impedância de surto)</i>	49
3.3.4 <i>Validação da LIA na medição de impedância</i>	54
3.4 CONSIDERAÇÕES DE ORDEM PRÁTICA	61
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO USANDO TÉCNICAS “NÃO CONVENCIONAIS”	65
4.1 INTRODUÇÃO.....	65
4.2 MÉTODO DO DESLOCAMENTO OBLÍQUO (MDO).....	65
4.2.1 <i>Fundamentos teóricos</i>	65
4.2.2 <i>Impedância de aterramento utilizando o método do deslocamento oblíquo</i>	69
4.3 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO COM A EXTREMIDADE DISTANTE DAS LIAS ABERTAS (ALTA IMPEDÂNCIA).....	86
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO USANDO ONDA IMPULSIVA E A LIA NO CIRCUITO DE CORRENTE.....	91
5.1 INTRODUÇÃO.....	91
5.2 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO OBTIDA COM UM TERRÔMETRO.....	91
5.2.1 <i>Características elétricas básicas dos sinais usados pelo terrômetro e o cálculo da resistência</i>	93
5.2.2 <i>Análise dos resultados</i>	97
5.3 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO USANDO UMA ONDA IMPULSIVA	97
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	106
6.1 IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO	106
6.2 RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO.....	107
6.3 ASPECTOS DE ORDEM PRÁTICA NO USO DA LIA.....	108
6.4 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	108

1 INTRODUÇÃO

A resposta de um aterramento a correntes elétricas é um importante parâmetro para a proteção e o bom desempenho dos sistemas elétricos aterrados. Há várias décadas essa resposta tem sido quantificada pela *resistência* ou pela *impedância* de aterramento e determinadas por meio de simulações computacionais e medições em campo.

Apesar da importância de se determinar a resposta de um aterramento a correntes elétricas encontrar caminho em muitas aplicações, destacam-se aquelas associadas à melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Neste caso, o aterramento da torre exerce a importante função de contribuir para a continuidade da operação do sistema [1]. O trabalho de Whitehead confirma tal assertiva [2]. Em seu trabalho, o autor avalia, dentre outros aspectos, a associação entre o valor médio da resistência de aterramento do “pé-de-torre” com o número de desligamentos/100 km/ano devido à incidência de descargas em várias linhas de 161 kV e de 500 kV pertencentes a *Tennessee Valley Authority* (TVA). A análise dos dados disponibilizados pela empresa revelaram que qualquer que fosse a tensão de operação da linha, 161 kV ou 500 kV, havia uma forte relação entre esses parâmetros. A condição de 1 desligamento/100 km/ano foi associada aos valores de resistência de 10 Ω e de 30 Ω para as linhas de, respectivamente, 161 kV de 500 kV. No trabalho de Hayashi [3] são apresentados dados que apontam nessa mesma direção. Além da associação entre valor da resistência e o desligamento de linhas, o autor também apresenta uma tabela com valores específicos para a resistência que devem ser seguidos em projetos de linhas de certa companhia energética do Japão. Os valores variam entre 13 Ω e 20 Ω , dependendo da tensão de operação da linha (33 kV a 500 kV) e do nível cerâmico. Ainda segundo o autor, outras dez companhias de energia desse país utilizam valores bem próximos a esses em seus projetos. Chunhua [4] também mostra em seu trabalho que o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas apresenta uma estreita dependência em relação à resposta do aterramento a esse tipo de solicitação. Segundo o autor, a China vem usando uma mesma linha para transmitir energia em mais de um nível de tensão já existindo várias em atividade, sendo a descarga atmosférica um problema recorrente. De fato, as descargas atmosféricas são consideradas um dos mais importantes fatores associados a desligamentos não programados de linhas em vários locais do mundo [5,6,7,8]. Já no Brasil, são atribuídas às descargas cerca de 70 % dos desligamentos na transmissão e de 40 % na distribuição [9]. Esses índices indicam uma expressiva degradação na qualidade da energia e evidenciam a importância de se desenvolver ou aperfeiçoar técnicas que permitam quantificar a resposta do aterramento a correntes elétricas.

Uma técnica bastante efetiva usada por empresas de energia elétrica em todo o mundo visando a melhoria do desempenho das linhas é o uso de cabos para-raios no alto das torres. Esse cabo, que é posicionado adequadamente com certos critérios, evita, até certo ponto, que a descarga incida diretamente sobre os cabos fase. Entretanto, Chowdhuri [10] faz uma importante observação,

afirmando que linhas protegidas por cabos para-raios, mas que tenham torres com resistência de aterramento elevadas podem ter o seu bom desempenho comprometido, tal como se a linha não tivesse a blindagem. De fato, o desempenho geral de uma linha apresenta estreita relação com o desempenho individual das torres [11,12], ou seja, depende da resistência/impedância de aterramento de cada uma das torres. Muitas vezes, contudo, as condições do solo no local da instalação da torre são desfavoráveis devido à elevada resistividade. Neste caso, fazer o tratamento do solo no local onde os eletrodos são enterrados é uma medida possível. Essa foi a solução adotada em uma das torres considerada responsável pelo baixo desempenho da linha de 500 kV da cidade chinesa de Yunnan. Segundo Zhenghua [13] a cidade está situada em uma região de altitude elevada, clima seco e de elevada resistividade do solo. Após o tratamento, a resistência do “pé-de-torre” atingiu um valor que ficou dentro de uma faixa desejada ($19,9 \Omega$).

A existência de uma relação direta entre a resistência de aterramento e o desempenho de uma linha frente a descargas atmosféricas é um fato científico bem documentado. Nessa perspectiva, as companhias de energia em todo o mundo buscam projetar suas linhas com torres que tenham certos valores de resistência compatíveis com o desempenho desejado, respaldados pela efetividade e pela relativa simplicidade de se medir a resistência de aterramento. Entretanto, quando submetido a uma solicitação impulsiva, como uma descarga atmosférica, o aterramento possui características de uma *impedância* e não de uma *resistência* [14,15,16,17,18,19,20,21,22,23]. Towne, citado por Gonos [24], foi um dos primeiros a verificar que a resposta do aterramento a correntes impulsivas pode ser bem diferente daquela situação em que o aterramento é submetido a uma corrente na frequência industrial. Entretanto, Bewley [25] foi um dos primeiros a realizar um estudo teórico-experimental relacionado ao comportamento transitório dos aterramentos submetidos a descargas atmosféricas. Importantes institutos, como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [26] e o EPRI (*Electric Power Research Institute*) [27], já trazem em seus Guias procedimentos e instruções para a medição de *impedância*. O uso da *resistência* como parâmetro de desempenho das linhas frente à descargas possivelmente acontece devido às dificuldades de ordem técnica e prática ainda hoje existentes para se medir a *impedância*. É importante ressaltar, contudo, que a *resistência de aterramento* é um importante parâmetro que encontra respaldo em muitas aplicações de engenharia onde as correntes são de baixa frequência, como nos casos de curto-circuito em qualquer ponto do sistema de transmissão/distribuição ou em equipamentos e partes de sistemas industriais.

Em relação à determinação da *resistência* de aterramento, julga-se que as técnicas já existentes estão bem consolidadas. Entretanto, a busca pelo melhoramento sempre dá lugar a novos estudos. Neste contexto, e certo que tanto a *resistência* quanto a *impedância* são parâmetros fundamentais em projetos de engenharia aplicados à proteção contra os efeitos indesejados de correntes elétricas, este trabalho procura contribuir de maneira consistente na melhoria dos procedimentos de medição desses parâmetros. O texto está organizado em seis capítulos, sendo este primeiro introdutório. Os demais são apresentados a seguir.

O capítulo 2 apresenta uma síntese dos trabalhos relacionados a medições feitas em aterramentos elétricos. A escolha desses trabalhos teve como principal critério uma melhor visibilidade comparativa daquilo que já vem sendo feito em medições de aterramento com o que é apresentado nesta tese.

No capítulo 3 é apresentada a técnica proposta que se baseia no uso de um elemento (*Linha Infinita Artificial*) que torna possível as medições em aterramentos serem feitas com um arranjo que tenha um circuito de corrente relativamente pequeno. As suas características construtivas e seu comportamento como uma linha de transmissão de baixa velocidade de propagação são avaliadas. A sua efetividade de uso é verificada por meio de medições em campo e simulação computacional.

No capítulo 4 a *Linha Infinita Artificial* é usada em medições de campo para se determinar a impedância de aterramentos constituídos por eletrodos verticais (2,4 m) e eletrodos horizontais (6 m, 12 m e 18 m). Além do uso da LIA no circuito de corrente, os procedimentos de medição são baseados em técnicas “não convencionais”. Em uma das técnicas, o circuito de tensão também é relativamente pequeno e, em outra, o circuito de corrente não é aterrado na sua extremidade distante (linha aberta).

No capítulo 5 é feito um estudo onde a resistência de aterramento, também em condições de campo, é determinada com um sinal impulsivo e com o mesmo arranjo usado para se determinar a impedância. A efetividade da técnica é verificada por meio de comparação com os resultados obtidos com um terrômetro. Uma análise dos sinais elétricos básicos gerados por esse equipamento durante as medições também é feita neste capítulo.

No capítulo 6 são apontadas as principais realizações e contribuições deste trabalho bem como as propostas de continuidade.

2 MEDIÇÕES EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS

2.1 Introdução

A resposta de um aterramento a uma corrente na frequência industrial já é bem conhecida [28], sendo usualmente avaliada a partir da sua *resistência*. A determinação deste parâmetro por meio de medições já acontece há várias décadas, sendo ainda hoje um procedimento muito comum nas empresas de energia elétrica em todo o mundo [26]. Entretanto, de modo geral, as práticas de proteção contra descargas atmosféricas requerem o conhecimento da resposta do aterramento a um evento de natureza impulsiva. Neste caso, a *impedância* de aterramento é o parâmetro que quantifica de maneira mais adequada essa resposta. Assim, neste capítulo, são apresentados trabalhos relacionados especificamente com medições em aterramentos, tanto de resistência como de impedância. A escolha desses trabalhos foi feita visando possibilitar uma melhor visibilidade comparativa daquilo que já vem sendo feito em termos de medição com o que é apresentado nesta tese.

2.2 Técnicas e procedimentos de medição em aterramentos elétricos

Como exposto na seção anterior, a resposta do aterramento é importante parâmetro para o bom desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Certas disso, as companhias de energia adotam certos valores de resistência que devem ser alcançados tanto durante a instalação das torres como após a sua instalação, durante a operação das linhas. Dessa condição surge a relevância e a importância das medições em aterramentos serem corretas e precisas. De fato, a medição da resistência de aterramento é uma prática que vem sendo adotada há várias décadas, estando bem consolidadas [26,29]. Na etapa que precede a montagem das torres são feitas medições da resistência de aterramento dos “pés” das torres. Havendo necessidade, adicionalmente, são instalados cabos contrapeso com o objetivo de se alcançar certos valores que são preconizados em manuais técnicos de instruções para instalação dos aterramentos das torres [30]. Para verificar se tais valores foram atingidos são feitas sucessivas medições no local. Uma técnica amplamente utilizada, neste caso, é o chamado Método da Queda de Potencial [26,31]. Neste método, um equipamento é usado para injetar uma corrente alternada em um circuito compreendido pelos eletrodos de aterramento (EA), por certa porção da terra e por um eletrodo auxiliar de corrente (EC), como mostra de modo esquemático a Fig. 2.1. A corrente que circula entre esses eletrodos através do solo faz com que haja uma elevação de potencial nesta região que é detectada pelo eletrodo de potencial (EP). Deve-se ficar atento em relação ao posicionamento do EC. Recomenda-se que esse eletrodo fique a uma distância de ao menos 5 vezes o maior comprimento linear da malha de

aterramento [26]. Essa condição visa de forma direta dois objetivos principais [32]: a) evita-se o acoplamento mútuo entre EA e EC; b) a partir desse distanciamento os eletrodos de aterramento e o eletrodo de corrente podem ser considerados aproximadamente hemisféricos. Esses são aspectos importantes no cálculo da diferença de potencial entre EA e EP.

O eletrodo de potencial deve ser posicionado entre EA e EC em uma linha imaginária que os une (segmento de reta XY). Segundo Curdts [32] e Tag [33,34], a distância x para o posicionamento de EP corresponde a, aproximadamente, 60 % da distância existente entre EA e EC ("XY"). Entretanto, o uso desse critério pressupõe que o solo seja uniforme e as dimensões do aterramento não sejam muito "amplas". De fato, essa concepção é bastante difundida [35,36,37,38]. É importante mencionar ainda que, na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, a dimensão "ampla" é tratada apenas de forma subjetiva. Dos trabalhos consultados, apenas em [31] é feita uma menção direta para uma dimensão máxima de 10 m para os eletrodos.

Uma vez definida a posição do eletrodo de corrente, o posicionamento do eletrodo de potencial é fundamental para a correta medição do valor da resistência de aterramento. A medição sucessiva de alguns valores de resistência é um modo de se determinar essa condição. Neste caso, posicionado inicialmente próximo à malha de aterramento, o eletrodo EP é deslocado ao longo do segmento de reta XY na direção do eletrodo EC com espaçamentos que variam de maneira aproximadamente constante. Os equipamentos mais modernos, já apresentam diretamente o valor da relação entre a tensão desenvolvida e a corrente injetada. Os valores obtidos através deste procedimento dão origem a uma curva onde se identifica a região designada "patamar", localizada entre os pontos A e B (ver Fig. 2.1). Diz-se, então, que o eletrodo de potencial posicionado entre A e B está na "região distante" ou no "infinito", também chamado *terra remoto*. Com o eletrodo EP posicionado nesta região, portanto, determina-se o valor da *resistência de aterramento* [26,31]. Na literatura também são encontrados trabalhos com pequenas modificações desta técnica [35,36,39,40,41]. Entretanto, nota-se que os princípios físicos fundamentais e os procedimentos básicos são mantidos.

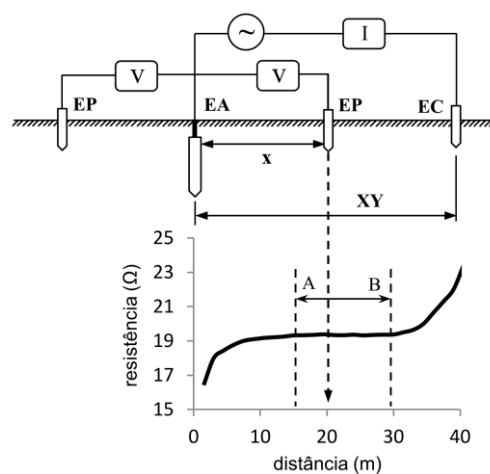


Fig. 2.1 - Esquema para a medição da resistência de aterramento.

Um aspecto que chama a atenção no Método da Queda de Potencial é que o acoplamento eletromagnético entre os cabos usados no circuito de tensão (CT) e no circuito de corrente (CC) normalmente é desprezado. Tal condição, geralmente, é atribuída às baixas frequências de operação dos equipamentos. Assim, normalmente não é tomado nenhum tipo de cuidado específico em relação à disposição física desses cabos. Este efeito é particularmente importante se houver indução de tensão no cabo CT. Neste caso, o sistema em medição teria a sua referência comprometida. Ma e Dawalibi [42] verificaram o efeito deste acoplamento na determinação da resistência de aterramento. Segundo os autores, para sistemas de aterramentos concentrados ou de pequenas dimensões, o acoplamento indutivo entre os cabos é pequeno, levando a alterações de valores que podem ser desprezados. Contudo, quando as dimensões envolvidas são maiores, este acoplamento pode ser significativo. Isto porque, ainda segundo os autores, esses sistemas demandam cabos de medição muito longos devido à região de influência do aterramento ser bastante ampla. Considerando esse fato, foram avaliados parâmetros como a distância de separação dos cabos CT e CC, a frequência de operação do equipamento e a dimensão do aterramento. A Fig. 2.2 mostra a arranjo considerado, sendo o aterramento composto por uma malha reticulada.

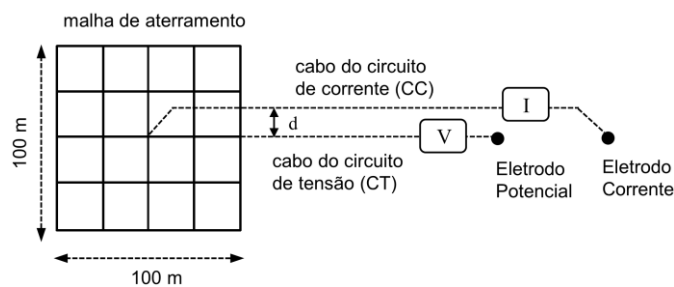


Fig. 2.2 - Configuração usada na medição da resistência de aterramento. Adaptado de [42].

A Fig. 2.3 mostra as curvas plotadas a partir dos valores das resistências de aterramento para um solo de $100 \Omega\text{m}$, frequências de 80 Hz e 500 Hz e distâncias de 1 m e 10 m para os cabos CT e CC. Deve-se observar que há um equívoco no gráfico, que faz menção a uma impedância onde, de fato, as curvas indicam a resistência de aterramento. A figura indica, também, que a “região distante” encontra-se a 618 m da malha de aterramento em teste.

Nos gráficos dois aspectos ficam prontamente evidentes: *i)* para uma mesma frequência, o afastamento dos cabos diminui o acoplamento entre eles. *ii)* o aumento da frequência leva a um aumento do acoplamento entre os cabos e, conseqüentemente, a um aumento no valor da resistência. De certa forma, esses são resultados não esperados, já que os procedimentos práticos amplamente adotados e consolidados no meio técnico não ressaltam tais efeitos. Portanto, assume-se que os acoplamentos são pouco significativos. Entretanto, o gráfico da Fig. 2.3a mostra que os erros relativos para as situações de afastamento de 10 m e 1 m são de, respectivamente, 15 % e 28 %. Já na Fig. 2.3b, os erros relativos são de, respectivamente, 179 % e 330 % para 10 m e 1 m, indicando que o

acoplamento entre os condutores é um importante parâmetro que precisa ser observado durante os procedimentos de medição.

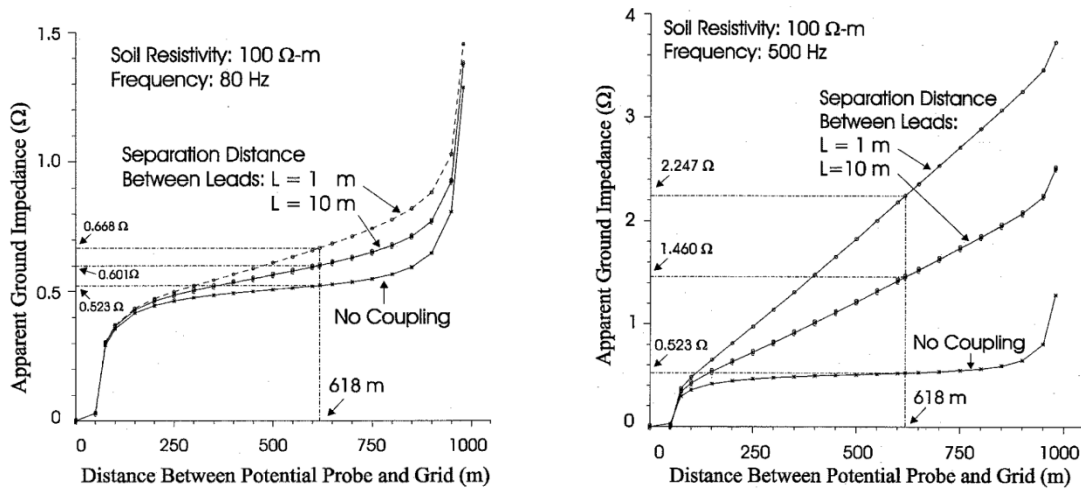


Fig. 2.3 - Resistência de aterramento calculada. Retirado de [42].
(a) frequência de operação: 80-Hz e (b) frequência de operação: 500-Hz.

No trabalho citado anteriormente foi avaliado, também, a influência das dimensões do aterramento. Neste caso, a malha de aterramento que era de $100\text{ m} \times 100\text{ m}$, diminuiu para $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ sendo mantidos os 16 retículos. A Fig. 2.4 mostra que, nesta condição, a região de referência de potencial está a 309 m da malha de aterramento, distância essa menor que a anterior, como esperado. Ainda, o acoplamento entre os cabos CT e CC é significativo apenas para a frequência de 500 Hz. Isto indica que, como inicialmente mencionado, quanto menor as dimensões do aterramento, menos significativo será o acoplamento indutivo devido ao menor comprimento dos cabos CT e CC. Como em muitos casos os aterramentos são concentrados, isso justificaria a cultura existente no meio técnico de que esse efeito pode ser desprezado em qualquer situação. Contudo, generalidade deve ser considerada com ressalvas, como por exemplo, no caso de aterramentos de linhas transmissão, já que neste caso, os aterramentos podem ter cabos contrapesos que chegam a 90-m de comprimento cada um [30]. Considerando, ainda, a disposição de instalação dos contrapesos, o comprimento linear do aterramento pode chegar a 180-m, dimensão essa que obviamente já o descaracteriza como aterramento concentrado.

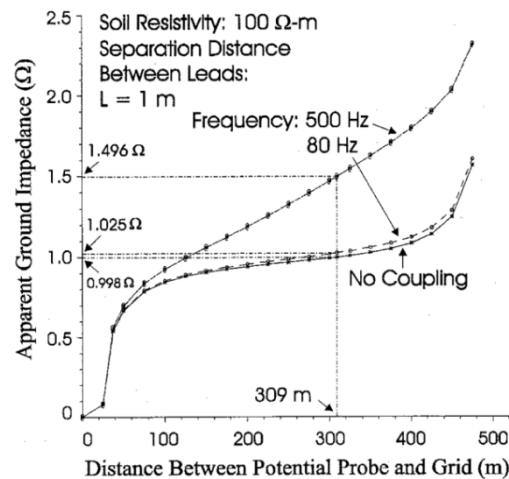


Fig. 2.4 - Resistência de aterramento calculada considerando o efeito da variação frequência. Retirado de [42].

O relatório técnico intitulado *Guide for Transmission Line Grounding* [43], desenvolvido com o apoio do *Electric Power Research Institute* (EPRI), apresenta a técnica chamada *Oblique-Probe Method*. Essa técnica é uma variação do Método da Queda de Potencial e, de acordo com o Guia, os circuitos de tensão e de corrente devem, idealmente, ficar a um ângulo de 60 a 90 graus entre si. Na Fig. 2.5 o arranjo é apresentado para o caso em que o ângulo é de 90°.

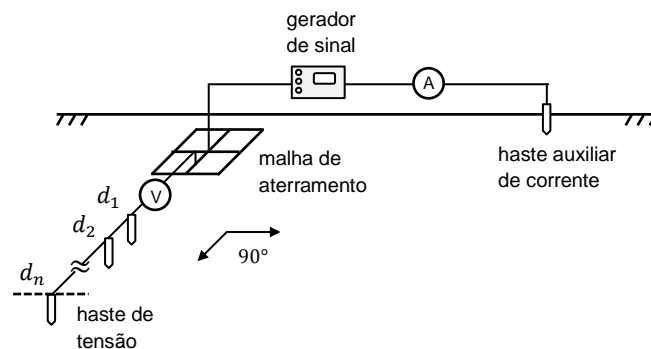


Fig. 2.5 – Representação esquemática do arranjo usado no *Oblique-Probe Method*.

Partindo de uma posição mais próxima do aterramento em teste, são feitos os registros dos valores das resistências R_1, R_2, \dots, R_n para algumas posições do eletrodo de tensão (d_1, d_2, \dots, d_n). Esses valores são, então, plotados em um gráfico R_n versus $1/d_n$, onde o eixo das abscissas corresponde ao valor do inverso das distâncias registradas (ver Fig. 2.6). Usando regressão linear simples, a equação de uma reta é determinada. No gráfico da Fig. 2.6a, a equação da reta $y = ax + b$ tem os coeficientes $a = -93,3$ (coeficiente angular) e $b = 39,1$ (coeficiente linear). A resistência de aterramento, R_g , corresponde ao valor da resistência R no ponto onde a reta intercepta o eixo das ordenadas. Portanto, a resistência de aterramento corresponde ao valor de y quando x é igual a zero. Neste exemplo, esse valor é de 39,1 Ω . Na Fig. 2.6b, são apresentadas, simultaneamente, as curvas obtidas com o Método da Queda de Potencial ($\theta = 0^\circ$) e com o *Oblique-Probe Method* ($\theta = 90^\circ$). Nessa figura,

a linha vertical pontilhada corresponde a distância na qual o eletrodo de potencial alcança a região distante, ou terra remoto. A seta indicativa mostra justamente a coincidência de resultados qualquer que seja o método usado.

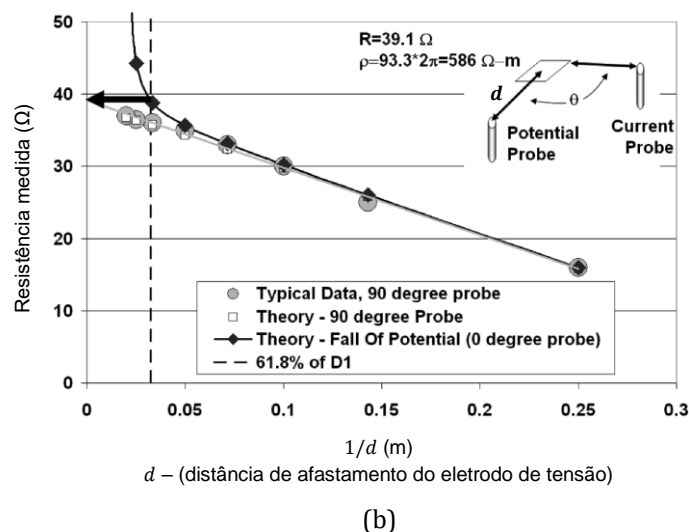
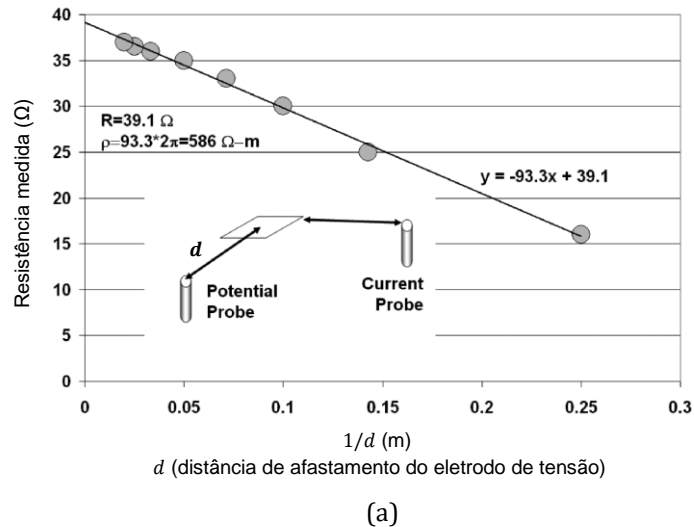


Fig. 2.6 – (a) resistência de aterramento determinada a partir da equação de uma reta; (b) comparação de resultados obtidos a partir do Método da Queda de Potencial e do *Oblique-Probe Method*. Fonte: adaptado de [43].

Ainda segundo o Guia, o que torna esta técnica ainda mais interessante é o fato de ser possível extrair da equação, também, o valor da resistividade do solo. Para isso, basta multiplicar o coeficiente a por 2π (ver informação na Fig. 2.6). Assim, no exemplo abaixo, a resistividade do solo é de $93,3 \times 2\pi = 586 \Omega\text{m}$. Entretanto, nenhum tipo de informação sobre os desenvolvimentos que levam a essa dedução é apresentado. Finalmente, ainda sobre essa técnica, é importante ressaltar que apesar da faixa de ângulos idealmente estar entre 60° - 90° , o Guia apresenta resultados que indicam ser possível o ângulo variar entre 45° e 90° com erros menores que 1 %.

A medição da resistência de aterramento possivelmente é o método mais utilizado para verificar as características de certo solo associadas a sua capacidade de dissipar cargas elétricas. Contudo, a resposta de um aterramento a correntes impulsivas, como aquelas associadas às descargas atmosféricas, pode apresentar características bem distintas de uma resistência [44,45]. Isto porque o espectro de frequências desse sinal é bastante amplo [22]. Portanto, é preciso que a resposta seja definida para cada uma das componentes de frequência que compõe o sinal. Assim, o conceito de impedância de aterramento, em essência, é definido no domínio da frequência para excitações com variações senoidais. Choi *et. al.* [46] fizeram a medição da impedância de malhas de aterramento de subestações, linhas de transmissão e redes de distribuição. O arranjo usado é apresentado de forma esquemática na Fig. 2.7. Nesta configuração, um gerador de sinais é usado para aplicar no aterramento ondas senoidais de tensão com frequências que variaram entre 10 Hz e 1 MHz. O gerador além de estar conectado ao aterramento também é conectado à haste auxiliar do circuito de corrente. Para a medição da tensão no aterramento, o cabo CT, terminado também em uma haste, é posicionado ortogonalmente ao circuito de corrente (cabo CC). Essa disposição geométrica é adotada para se minimizar o acoplamento entre os cabos CC e CT, já que as frequências envolvidas nesta medição são bastante elevadas. Isto indica que no caso de medições com sinais que chegam a 1-2 MHz o acoplamento entre os fios prejudica a correta obtenção das grandezas desejadas. Portanto, o acoplamento compromete a referência de potencial do circuito de medição.

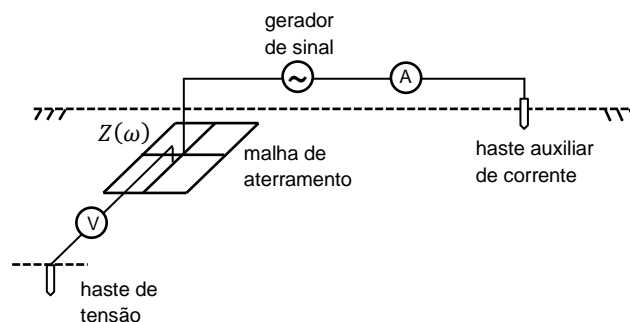


Fig. 2.7 - Arranjo usado nas medições. Adaptado de [46].

Choi e Lee [47] também utilizaram uma técnica semelhante à anterior para determinar a resposta em frequência de um aterramento constituído por um único eletrodo horizontal. O arranjo usado é mostrado na Fig. 2.8. Nela se verifica que, neste caso, o eletrodo está enterrado naquilo que os autores definem como pseudo-solo de duas camadas. Isto porque parte do eletrodo (os primeiros 20 m) está em contato direto com o solo e outra parte (20 m restantes) está em contato com uma mistura de solo com carbono em pó de alta condutividade. Além disso, o eletrodo é segmentado em quatro partes, de 10 em 10 metros, onde sondas de corrente foram instaladas para se verificar as características dessa grandeza ao longo do eletrodo. Uma importante conclusão obtida neste trabalho refere-se à importância daquela porção inicial do solo próxima ao ponto de entrada de corrente. Para verificar este aspecto, o sinal é inicialmente aplicado no Ponto 1 e, posteriormente, é aplicado no

Ponto 2. Os resultados mostraram que na região de frequências mais baixas (até aproximadamente 50 kHz) as respostas são praticamente idênticas. Contudo, para a faixa de frequências entre 50-kHz e 1-MHz os valores medidos são significativamente menores quando o sinal é aplicado no Ponto 2, que tem uma maior condutividade.

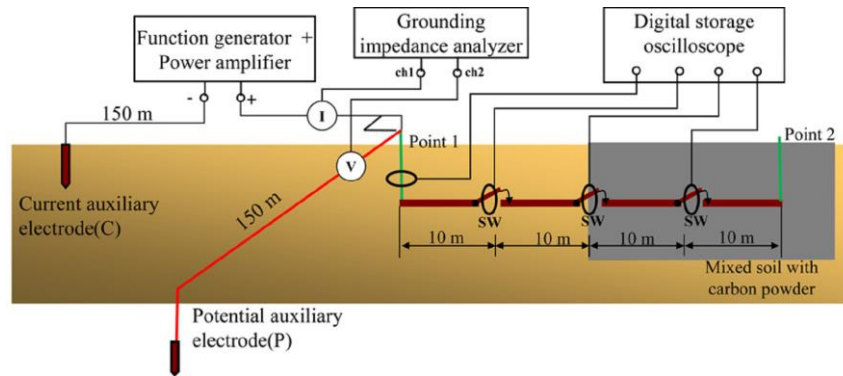


Fig. 2.8 - Diagrama esquemático do arranjo usado na medição. Retirado de [47].

A técnica avaliada anteriormente trata de maneira direta o conceito de impedância, sendo medido um valor para cada componente de frequência. Contudo, os procedimentos adotados são bastante trabalhosos, o que dificulta o seu uso de modo prático. Um procedimento que também tem sido adotado para a medição da impedância de aterramento, é aquele em que se utiliza um sinal impulsivo produzido por um gerador de impulsos. Neste caso, o impulso gerado tem a forma de uma onda do tipo dupla-exponencial. Apesar dessa forma de onda não ser absolutamente idêntica a da corrente de descarga atmosférica, ela apresenta um conteúdo espectral bastante amplo que é representativo para uma onda real. Assim, na falta de melhores condições construtivas, essa tem sido considerada uma boa opção para os procedimentos de medição.

Devido ao conteúdo espectral das ondas impulsivas, alguns cuidados específicos devem ser tomados durante as práticas de medição. No trabalho apresentado por Visacro e Rosado [48] o arranjo adotado é semelhante ao mostrado na Fig. 2.8, com a diferença apenas da troca do gerador de funções pelo gerador de impulsos, como mostra a Fig. 2.9. Nessa figura, observa-se que o gerador de impulsos está posicionado próximo ao ponto de entrada da corrente no eletrodo em teste. O outro terminal do gerador é conectado a uma haste de aterramento auxiliar através de um cabo longo (cabo CC). Uma vez aplicada a onda impulsiva, o osciloscópio faz a leitura tanto da corrente como da tensão no ponto onde o pulso é aplicado.

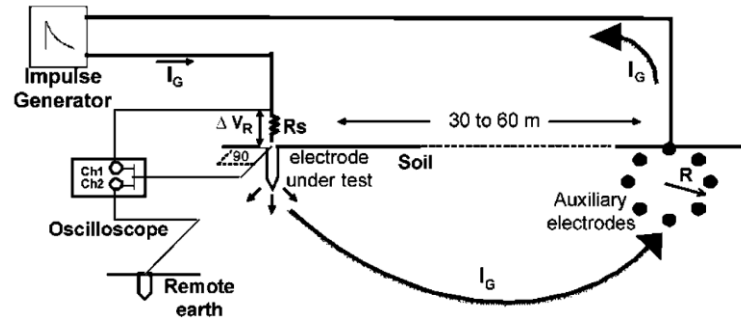


Fig. 2.9 - Sistema de medição da impedância de aterramento. Retirado de [48].

Outro aspecto que parece ser positivo em relação à configuração apresentada na Fig. 2.9 é o fato do gerador e do osciloscópio estarem próximos ao eletrodo em teste. Segundo Petrache [49], quando se aplica uma tensão em um condutor posicionado horizontalmente acima de um “solo com perdas”, a forma de onda da corrente apresenta alterações, sobretudo no tempo de frente, à medida que propaga neste meio. Com a proximidade, portanto, a forma onda aplicada no aterramento manteria as suas características originais.

A configuração apresentada anteriormente (Fig. 2.9) talvez seja a mais utilizada em trabalhos relacionados à resposta de aterramentos a uma solicitação impulsiva. O desempenho dos sistemas aterrados frente a descargas atmosféricas é o principal elemento motivador. Como já mencionado, a onda produzida pelo gerador, apesar de não apresentar exatamente a forma de onda de uma descarga, traz características que a qualificam como representativa, sobretudo considerando o seu conteúdo espectral. Então, devido justamente a isso, alguns cuidados são tomados durante os procedimentos de medição para que os acoplamentos eletromagnéticos entre os condutores não prejudiquem a qualidade dos resultados. Um segmento diretamente interessado neste tipo estudo é aquele dedicado à melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Na expectativa de aumentar a confiabilidade e continuidade da operação dessas linhas, um importante parâmetro é o valor da impedância de aterramento das torres. Assim, a princípio, a técnica apresentada na Fig. 2.9 pode ser uma boa opção para determinar esse parâmetro. Contudo, para esta aplicação, talvez esse arranjo não expresse de forma completa o evento eletromagnético que se deseja avaliar. Isto porque a corrente da descarga desce pela torre em direção ao solo, de forma que o acoplamento entre a torre, os cabos para-raios e o aterramento deveriam, também, ser computados. Nayel *et. al.* [50] utilizam um arranjo de medição que mais se assemelha a uma descarga descendo pela torre. A Fig. 2.10 mostra o arranjo adotado por esses autores. O gerador de impulsos fica a certa distância do aterramento de forma que a onda aplicada no aterramento desce por um cabo vertical de 4 m de altura sustentado por um poste de madeira. Estes são aspectos positivos por dois motivos principais: primeiro, o fato da onda descer por um condutor vertical confere ao arranjo maior semelhança do ponto de vista de acoplamentos eletromagnéticos ao evento real de uma descarga descendo por uma torre; segundo, o poste sendo de madeira significa que não há nenhum tipo de interação eletromagnética com a onda que desce, sendo preservada as suas características

elétricas. Portanto, considerando tais aspectos, esta é uma condição mais realista para uma corrente de descarga descendo pela torre e entrando no solo.

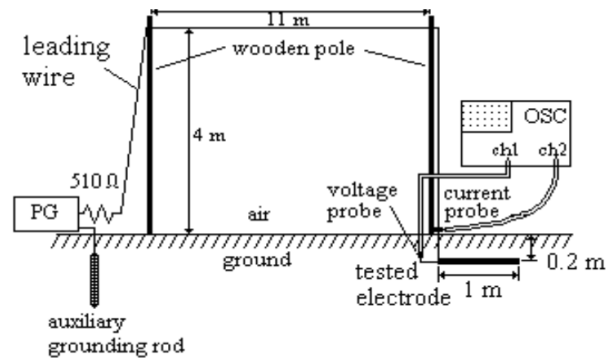


Fig. 2.10 - Arranjo de medição de impedância de aterramento. Retirado de [50].

Como já mencionado, o estudo da resposta de aterramentos submetidos a correntes impulsivas é de interesse aplicado, isto porque, de modo geral, todas as práticas de proteção relacionadas a esse tipo de solicitação requerem esta informação. Particularmente, no caso do aterramento ser constituído por um eletrodo horizontal, tal como um cabo contrapeso, é importante avaliar o impacto dos acoplamentos eletromagnéticos existentes entre os diversos condutores presentes durante a medição, sobretudo o acoplamento entre os cabos de tensão, de corrente e o contrapeso. Tsumura *et. al.* [51] avaliaram a resposta transitória de um aterramento constituído por um eletrodo horizontal para três arranjos distintos. Os resultados foram obtidos por meio de simulação com o uso do Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo. Diferente do caso anterior, o gerador é posicionado próximo ao aterramento, como mostra a Fig. 2.11. O circuito de corrente é constituído por um cabo simples de 8 m que fica esticado sobre o solo e a uma altura de 4 m. As características de todos os elementos envolvidos na simulação (comprimento dos cabos de medição, comprimento do eletrodo, resistividade do solo, permissividade elétrica relativa, profundidade na qual o eletrodo está enterrado ou se está acima do solo, homogeneidade do solo, etc.) são apresentadas na Fig. 2.11. Neste trabalho, a onda aplicada é um degrau de corrente de 1 A com tempo de subida de 7 ns.

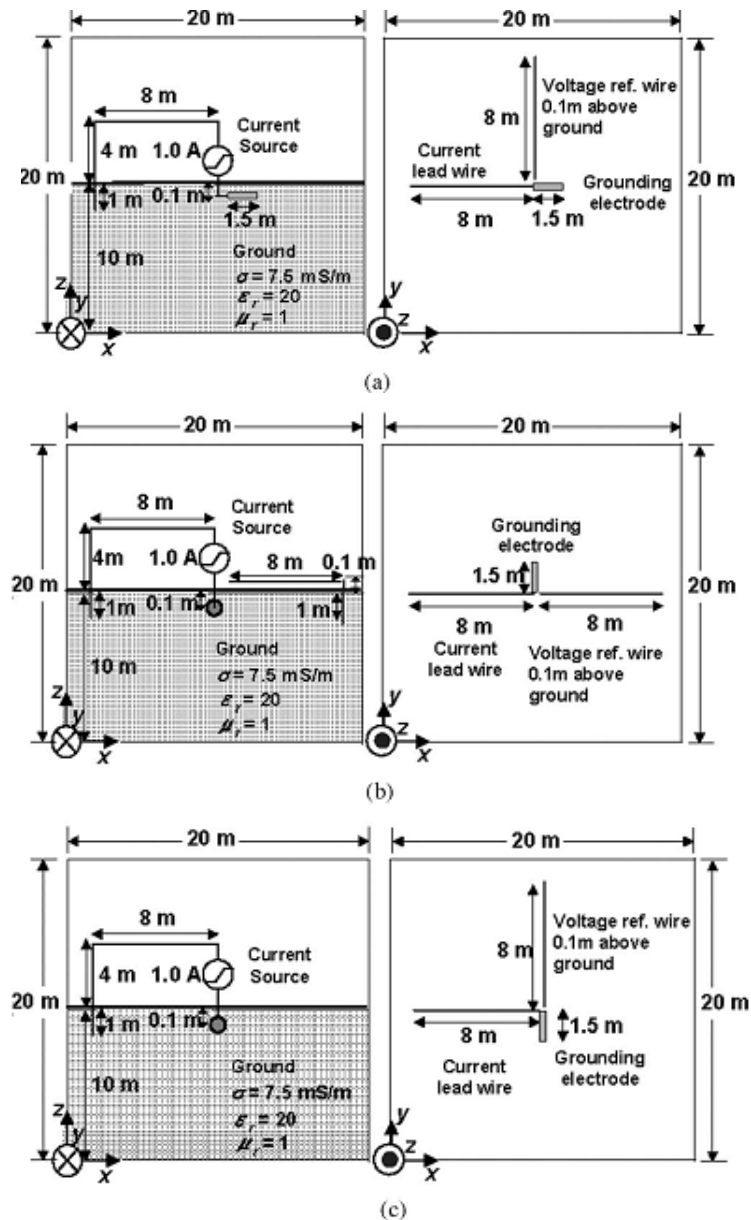


Fig. 2.11 - Vista lateral e superior dos arranjos para teste da resposta transitória de um eletrodo de aterramento horizontal. Retirado de [51].

A Fig. 2.12 mostra as formas de onda da tensão desenvolvidas no ponto onde é aplicado o degrau de corrente. Elas mostram que os valores, em todos os casos, são bem próximos (diferença máxima de 6%), indicando que variar os arranjos não significa, necessariamente, que ocorrerão variações significativas nos resultados. Na situação "b", chama a atenção o fato dos cabos CC e CT não estarem posicionados a noventa graus como mais comumente isto é feito. Como os resultados apontam diferenças que são pequenas, qualquer que seja o arranjo, fica evidente ser perfeitamente possível adotar, também, o uso dos cabos CC e CT posicionados a cento e oitenta graus, sem que haja prejuízos na qualidade dos resultados.

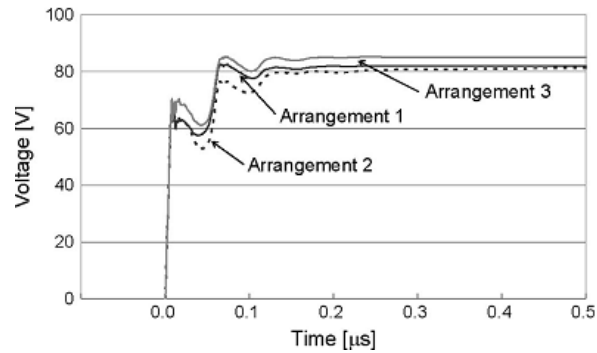


Fig. 2.12 - Tensão desenvolvida no ponto de entrada de corrente em relação ao cabo CT. Retirado de [51].

Visando a medição da impedância de aterramento em torres de linhas de transmissão, Petrache e outros [49] desenvolveram uma técnica para tais fins. Desenvolveram, também, um dispositivo de medição que já traz integrado o gerador de sinal e o osciloscópio (“Zed-Meter”). A técnica é inicialmente avaliada por meio de simulações computacionais com um programa que usa o Método dos Momentos para determinar a resposta em frequência do sistema. A resposta no domínio do tempo é obtida aplicando-se a transformada inversa de Fourier. Resultados de medições também são apresentados, confirmando os pressupostos teóricos. Esse trabalho destaca-se, dentre outros aspectos, pelo uso da Teoria de Linhas de Transmissão no circuito de corrente e pelo modo como a impedância impulsiva de um aterramento é definida. Tais aspectos são discutidos a seguir.

a) o uso da Teoria de Linhas de Transmissão no circuito de corrente

i) o cabo CC é uma linha de transmissão com parâmetros distribuídos e não um circuito com parâmetros concentrados

É comum encontrar nos trabalhos relacionados à medição de impedância de aterramento a recomendação de que o aterramento auxiliar de corrente apresente um baixo valor de impedância, sob a justificativa de que esse aterramento limita a corrente que sai da fonte e entra no solo. Nestas condições, fica subentendido que a impedância do cabo CC pode ser desprezada e que não entra no cômputo da definição da corrente que sai da fonte. Esse cabo, portanto, é tratado como um circuito de parâmetros concentrados de impedância desprezível. O uso da teoria de linhas no cabo CC mostra algo bem diferente. Neste caso, no momento em que o pulso é aplicado, para a fonte, existem apenas duas “cargas” conectadas aos seus terminais de saída: a impedância do aterramento em teste e a impedância característica, ou de surto, do cabo usado no circuito de corrente. Portanto, juntamente com o aterramento em teste, não é o aterramento auxiliar de corrente que limita inicialmente a corrente que deixa a fonte, mas, sim, a impedância de surto do cabo CC.

ii) perdas e modo de propagação

As perdas nessa linha (cabo CC) são desprezíveis, sendo consideradas, na prática, linhas “sem perdas”. Além disso, os resultados mostram, também, que o uso das equações clássicas da teoria de linhas para o modo de propagação TEM é absolutamente válido.

iii) impedância e velocidade de propagação

A impedância de surto e a velocidade de propagação no cabo usado no circuito de corrente dependem das suas características construtivas e das condições de posicionamento, sobretudo da altura em relação ao solo. A avaliação da influência da altura na determinação da impedância e da velocidade de propagação foi feita experimentalmente e por meio de simulação computacional, sendo usado, para isso, um arranjo similar a um dipolo, como mostra a Fig. 2.13.

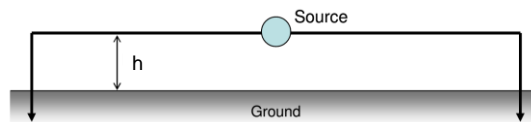


Fig. 2.13 – Arranjo do tipo “dipolo” usado. Retirado de [49].

Inicialmente, foi determinada a impedância de surto do cabo (arranjo da Fig. 2.13). Para isso, foi usado um pulso de tensão com amplitude de 200 V, duração de 1,4 μ s e tempo de subida e de descida de 50 ns. Para a simulação, foi considerado um dipolo de 200 m constituído por um cabo simples posicionado a uma altura uniforme de 5,4 mm sobre um solo de 50 Ω m. Além disso, ambas as extremidades foram aterradas com hastes (10 cm). Experimentalmente, foi usado um cabo coaxial no lugar do cabo simples, sendo o pulso aplicado na malha condutora externa do cabo. A resistividade do solo (49 Ω m) foi determinada a partir de medições feitas usando o método de Wenner. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 2.14. Nela, verifica-se que após um breve intervalo de tempo a impedância transitória do cabo, $z(t)$, tende a estabilizar no valor de, aproximadamente, 370 Ω .

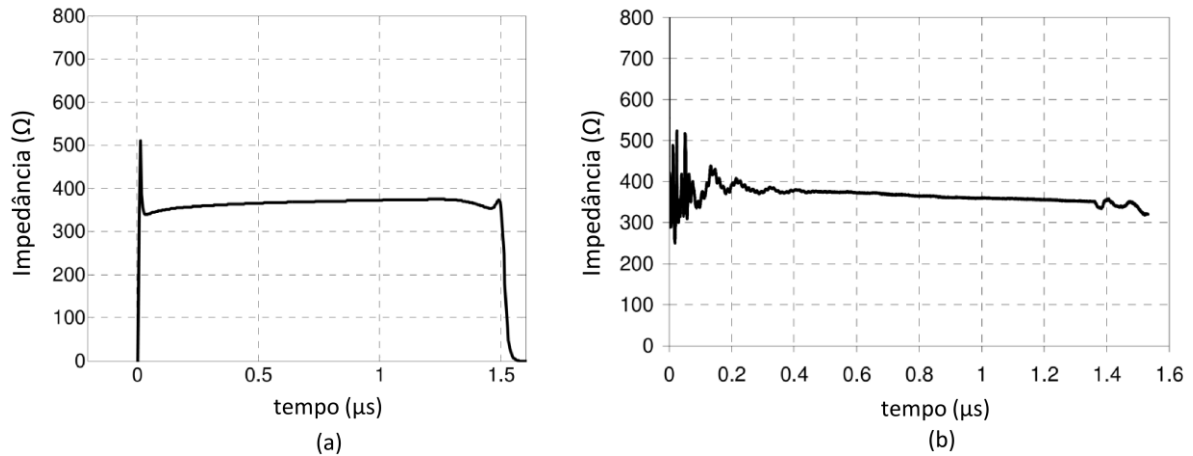


Fig. 2.14 - Impedância de surto dos cabos usados no circuito de corrente obtidas por meio de (a) simulação e (b) medição. Adaptado de [49].

Os resultados apresentados na Fig. 2.14 evidenciam que, para a fonte, o cabo representa uma *impedância* no momento em que o pulso é aplicado. Conseqüentemente, quando se está medindo a impedância de um aterramento, a corrente que deixa o gerador é limitada não só pela impedância do aterramento em teste, mas também, como já mencionado, pela impedância do cabo usado no circuito de corrente. Portanto, conhecer as condições que levam a variação desse valor torna-se importante. Uma avaliação também feita neste trabalho aponta que a altura do cabo em relação ao solo exerce influência não apenas no valor da impedância, mas, também, na velocidade de propagação do sinal pelo cabo, como mostra a Fig. 2.15. A figura apresenta os resultados obtidos por meio de simulação para os casos em que o cabo do circuito de corrente está a uma altura de 1 cm e a 1 m do solo. As curvas apresentadas mostram que quando o cabo está a 1 m do solo, a impedância mantém-se aproximadamente constante ($\sim 1000 \Omega$) até o instante t_1 (~ 700 ns). Nesse instante, a impedância decai para um novo patamar, também aproximadamente constante ($\sim 750 \Omega$). Essa variação acontece devido à chegada das ondas refletidas, ao terminal de medição, vindas da extremidade distante do cabo de corrente. Para o caso em que o cabo está a uma altura de 1 cm as ondas refletidas chegam no instante t_2 ($\sim 1,3 \mu\text{s}$), quando a impedância apresenta uma ligeira diminuição de valor, passando de $\sim 550 \Omega$ para $\sim 500 \Omega$. É importante ressaltar que as ondas refletidas levam um tempo menor para chegar ao terminal de medição no caso em que o cabo está a uma altura de 1 m ($t_1 < t_2$). Como o comprimento dos cabos não é alterado (arranjo da Fig. 2.13), conclusivamente, a Fig. 2.15 mostra que o aumento da altura leva a um aumento tanto da impedância como da velocidade de propagação no cabo.

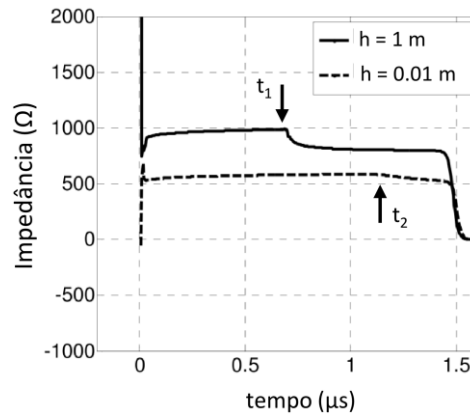


Fig. 2.15 - Impedância do cabo usado no circuito de corrente para diferentes alturas. Adaptado de [49].

b) impedância impulsiva do aterramento

No domínio do tempo, a resposta do aterramento frente a correntes impulsivas normalmente é quantificada pela impedância impulsiva, Z_p . Este parâmetro comumente é definido pela relação entre os picos de tensão e de corrente medidos no ponto de entrada do aterramento. É importante ressaltar, contudo, que na literatura é comum essa definição apresentar diferenças sutis [26], tais como: $Z_p = V_m/I_{V_m}$, onde V_m é o valor da tensão máxima desenvolvida e I_{V_m} é o valor da corrente no instante em que a tensão é máxima; $Z_p = V_{I_m}/I_m$, onde V_{I_m} é o valor da tensão no instante em que a corrente é máxima e I_m é o valor máximo da corrente injetada no solo.

As variações na definição da impedância impulsiva surgem do fato de que os picos de tensão e de corrente normalmente não ocorrerem no mesmo instante do tempo. Esta não simultaneidade acontece devido às altas frequências associadas ao sinal impulsivo ressaltarem as reatâncias, tanto de natureza indutiva como capacitiva, presentes no sistema medido. No trabalho de Petrache, a discussão sobre qual das definições para a impedância impulsiva seria a mais adequada, de certa forma, é contornada. Isto porque, para esse autor, a impedância impulsiva é determinada a partir da curva de impedância transitória, $z(t)$, como detalhado a seguir.

Para determinar a impedância transitória, uma corrente impulsiva é aplicada na base da torre. O arranjo usado na simulação e na medição é apresentado de forma esquemática na Fig. 2.16.

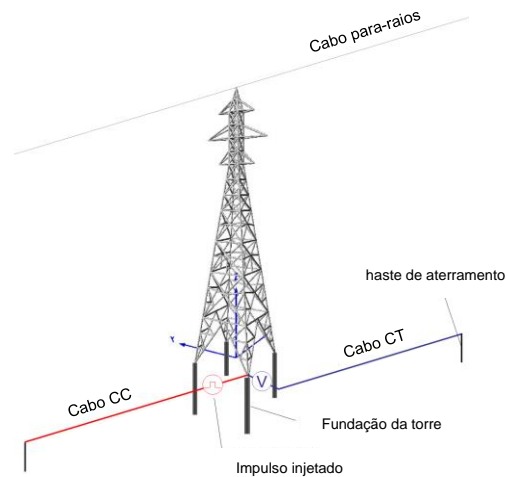


Fig. 2.16 – Arranjo usado para determinar a impedância impulsiva, Z_p , a partir da impedância transitória, $z(t)$. Adaptado de [49].

No arranjo apresentado na figura anterior, os cabos CC e CT são estendidos no solo ao longo da faixa de servidão. A extremidade distante desses cabos, a partir da base da torre, é conectada a uma haste cravada no solo. Os vãos entre as torres têm 200 m de comprimento e as torres têm apenas um único cabo para-raios. É importante observar que o aterramento das torres é constituído apenas pela sua fundação, não existindo cabos contrapesos.

A relação entre a tensão e a corrente define a impedância transitória do aterramento, ou seja:

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (1)$$

sendo, $v(t)$ a tensão e $i(t)$ a corrente medidas na base da torre. A impedância impulsiva é determinada no intervalo de tempo que precede a chegada das ondas refletidas vindas das partes do sistema por onde propagam as ondas de tensão e de corrente, que não do próprio aterramento. Neste caso, as ondas também vêm das torres vizinhas, mas a principal contribuição vem do cabo usado no circuito de corrente. Na Fig. 2.17 são apresentadas as curvas $i(t)$ e $v(t)$, onde se verifica que as ondas refletidas chegam no instante de tempo t_1 , aproximadamente, de 0,8 μs .

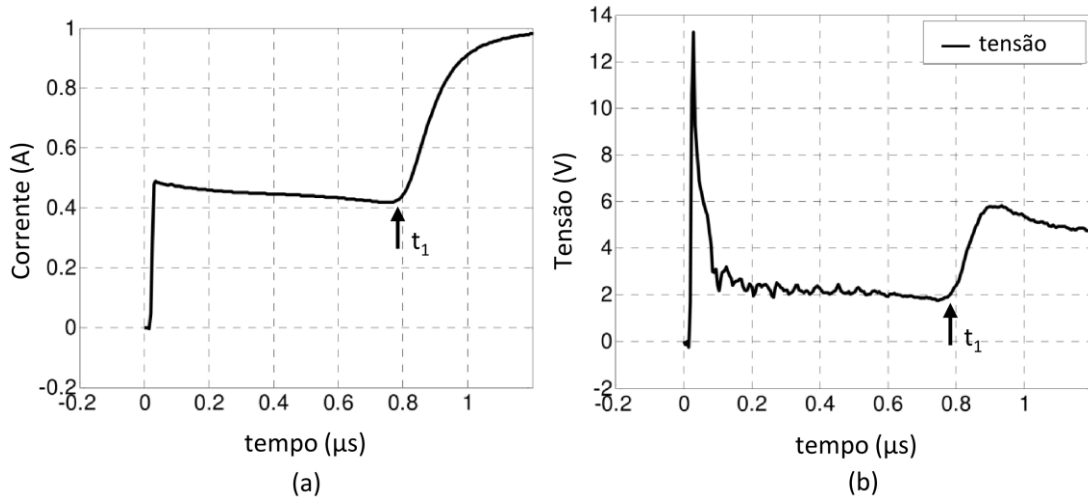


Fig. 2.17 - (a) corrente aplicada na base da torre; (b) tensão desenvolvida na base da torre. Adaptado de [49].

A Fig. 2.18 mostra a curva da impedância transitória, $z(t)$, obtida pela relação entre a tensão e a corrente apresentadas na Fig. 2.17. Nela, verifica-se que após um pequeno intervalo de tempo ($t_1 \cong 0,2 \mu\text{s}$), a curva $z(t)$ apresenta certa estabilidade em um patamar de, aproximadamente, 5Ω , condição essa que se mantém até o instante em que as ondas refletidas chegam ao terminal de medição ($t_2 \cong 0,8 \mu\text{s}$). Assim, a impedância impulsiva, Z_p , é determinada neste intervalo de tempo (entre t_0 e t_1), sendo, neste caso, de, aproximadamente, 5Ω .

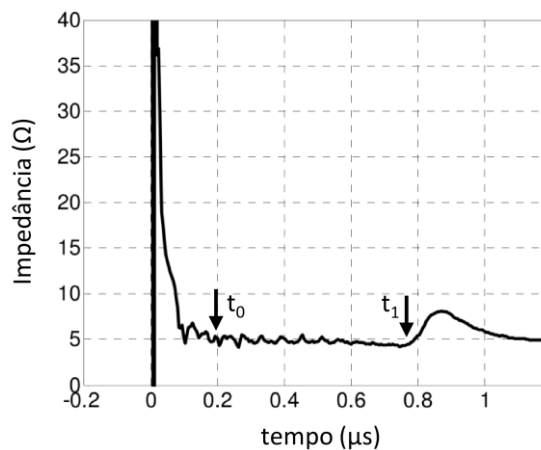


Fig. 2.18 - Impedância transitória, $z(t)$ ($\rho = 50 \Omega\text{m}$). Adaptado de [49].

Em [52], Chisholm, que é um dos idealizadores da técnica discutida (ref. [49]), apresenta resultados de medições realizadas em torres de linhas de 161 kV (Fig. 2.19) e de 230 kV (Fig. 2.20). Nelas, são apresentadas as impedâncias Z_1 e Z_2 , calculadas a partir de duas condições distintas: uma baseada na corrente que entra na torre e outra na corrente que segue pelo cabo CC. A curva do desvio padrão indica as diferenças existentes entre esses valores, sendo sempre muito pequenas. Isto porque, para a fonte, tudo se passa como se esse fosse um circuito série constituído por duas

impedâncias: a impedância do aterramento em teste e a impedância do cabo CC. Desta forma, a corrente que deixa ambos os terminais da fonte tem que ser a mesma. É importante ressaltar, contudo, que, conceitualmente, a corrente que deixa um dos terminais da fonte e entra na torre não é igual a corrente que entra no aterramento, já que parte dessa corrente sobe pela torre indo em direção as torres vizinhas. Para esse terminal da fonte, portanto, o aterramento e a torre estão em “paralelo” do ponto de vista da análise de circuitos. Entretanto, desconsiderar tal condição, neste caso, não significa introduzir erros significativos. Isto porque, se comparado aos valores medidos da impedância de aterramento, a impedância da torre é muito maior (100-300 Ω , [53,54]). Consequentemente, a maior parte da corrente desce para o aterramento.

Sendo, então, a corrente que sai da fonte aproximadamente igual à corrente que entra no aterramento, a relação entre a tensão que surge no ponto de medição e essa corrente define a impedância transitória. Assim, tal como na Fig. 2.18, a Fig. 2.19 e a Fig. 2.20 mostra que a impedância impulsiva é determinada em certo intervalo de tempo onde a impedância transitória torna-se aproximadamente constante (entre ~ 400 ns e ~ 1.100 ns).

Neste trabalho, foi medida, também, com um terrômetro, a resistência de aterramento dos pés-de-torres, R_g , com o objetivo de evidenciar a diferença existente na resposta do aterramento a uma solicitação de baixa e de alta frequência. Para a linha de 161 kV, a impedância impulsiva, considerando a média dos valores indicados, é de 15,1 Ω e o valor da resistência medida com o terrômetro é de 40 Ω . Para a linha de 500 kV, a impedância impulsiva, considerando também a média dos valores indicados, é de 12,2 Ω e a resistência é de 23 Ω . As diferenças existentes entre R_g e Z_p mostram que, de fato, a resposta do aterramento guarda estreita relação com o tipo de solicitação a que fica submetido (baixa ou alta frequência).

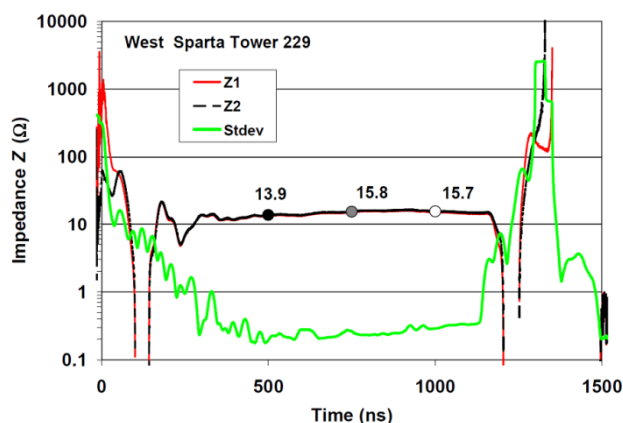


Fig. 2.19 - Medição da impedância de uma linha de 161 kV, $R_g = 40 \Omega$, $\rho = 175 \Omega m$. Retirado de [52].

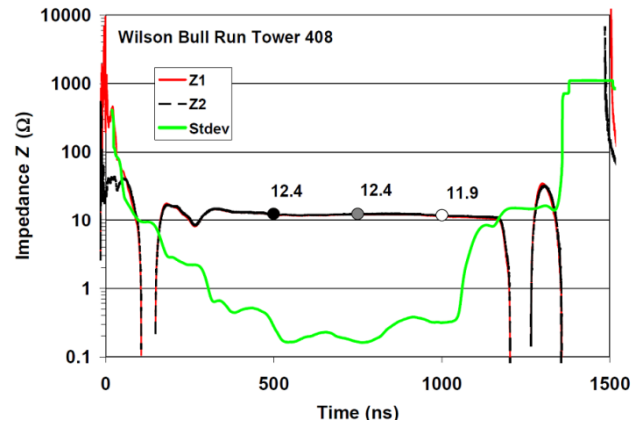


Fig. 2.20 - Medição da impedância de uma linha de 500-kV, com $R_g = 23 \Omega$. Retirado de [52].

Em outro trabalho [55], Chisholm utiliza a técnica em uma linha de 115 kV. Neste trabalho o autor estuda a viabilidade de se usar os cabos CC e CT dispostos sobre o solo assumindo a forma de meandros, como mostra a Fig. 2.21. Foram consideradas três variações para o circuito de corrente onde a quantidade “voltas” foi diferente em cada caso: uma única volta de 80 m; cinco voltas com espaçamento de 3 m entre os condutores e seis voltas com espaçamento de 1 m entre os condutores. Resultados obtidos por meio de simulação computacional mostraram que as impedâncias transitórias nos quatro casos são muito próximas, indicando ser perfeitamente possível usar qualquer um dos arranjos nas medições sem que haja prejuízo de qualidade nos resultados. Além disso, apesar de não ser ressaltado, fica muito clara a intenção do autor de avaliar a possibilidade de se usar cabos mais longos, sobretudo no circuito de corrente, em situações em que o espaço disponível para medição apresenta restrições. Isso certamente é desejável, devido às limitações naturalmente existentes em medições realizadas nas linhas de transmissão em condições de campo. Além disso, o aumento no comprimento do cabo CC leva, também, a um aumento do tempo necessário para que as ondas refletidas cheguem ao ponto de medição. Consequentemente, há um aumento na janela de tempo onde se determina a impedância impulsiva.

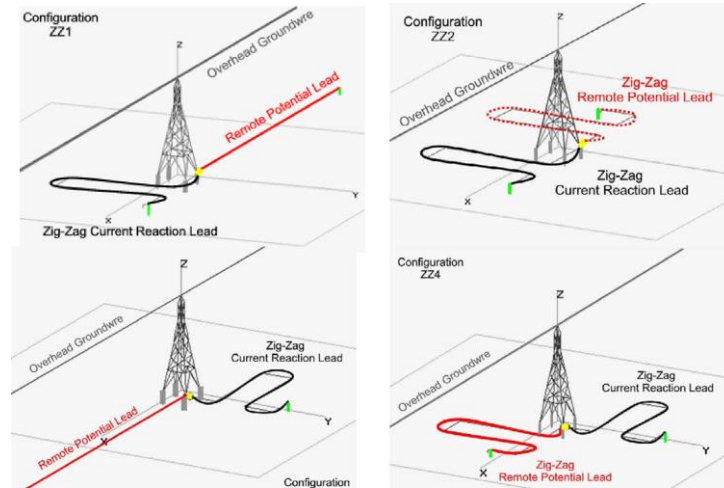


Fig. 2.21 - Arranjo usado nas medições, tendo o cabo CC forma de "zig-zag". Retirado de [55].

Na Fig. 2.22, Fig. 2.23 e Fig. 2.24 são apresentados os resultados experimentais obtidos para as condições em que o cabo CC apresenta, respectivamente, as seguintes características: uma única volta de 80 m; cinco voltas com espaçamento de 3 m entre os condutores e seis voltas com espaçamento de 1 m entre os condutores. Nos três casos os a impedância transitória é relativamente constante no intervalo de tempo entre 750 ns e 1500 ns. Além disso, tendo o primeiro caso como referência, verifica-se há uma redução de 5 % no valor medido na condição em que o zig-zag tem espaçamento de 3 m. Para a condição em que o espaçamento é de 1 m a redução é mais significativa, sendo de 19 %. Apesar de esse último índice ser significativo, a diferença não é comentada. Fica a impressão, portanto, de que diferenças na ordem de 20 % são aceitáveis para esse tipo de medição. Esta possibilidade, de certa forma, é fundamentada em dois aspectos: *i*) sobretudo em relação ao primeiro autor, pela vasta experiência em medições de aterramentos de linhas de transmissão e a pela importante contribuição já dada nesta área de conhecimento [56,57,58,59]; *ii*) por uma das conclusões apresentada neste trabalho, onde afirma-se que "[...] *resulting ground impedance profiles are not sensitive to lead orientation and configuration.*", o que sugere que as diferenças apresentadas estão dentro do que os autores consideraram aceitável.

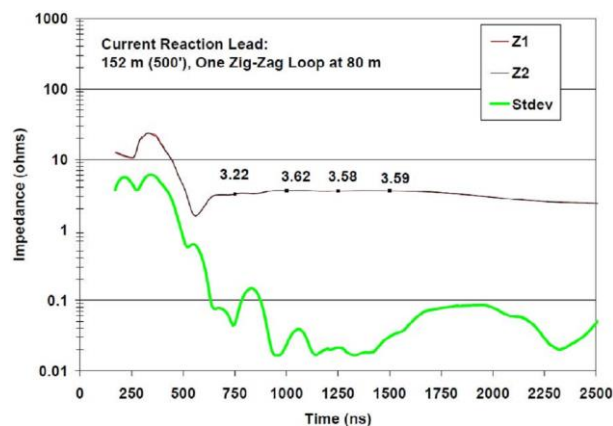


Fig. 2.22 - Impedância de aterramento, uma volta de 80m. Retirado de [55].

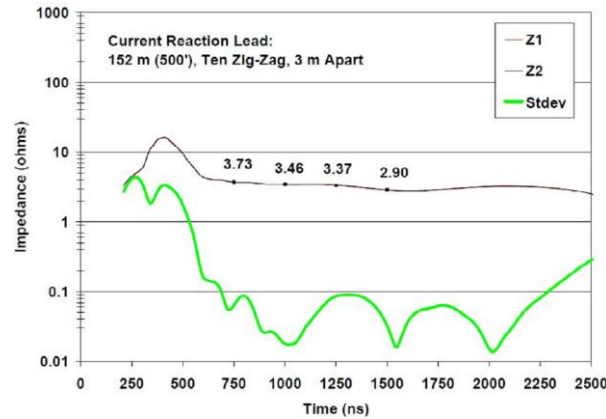


Fig. 2.23 - Impedância de aterramento, zig-zag com cinco voltas, condutores espaçados de 3m. Fonte: retirado de [55].

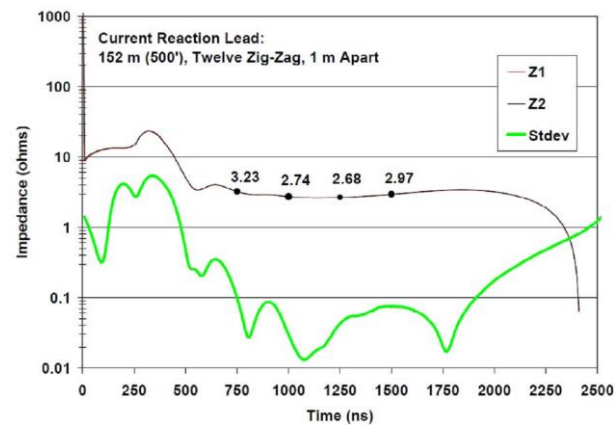


Fig. 2.24 - Impedância de aterramento, zig-zag com seis voltas, condutores espaçados de 1m. Fonte: retirado de [55].

Nos dois últimos trabalhos apresentados anteriormente os autores utilizam uma técnica onde os cabos CC e CT são estendidos sobre o solo ou o cabo CC é posicionado na forma de zig-zag. Chama a atenção na técnica usada, o fato das extremidades distantes desses cabos, em alguns casos, não estarem conectados a uma haste cravada no solo. Neste caso, a terminação é de alta impedância, o que faz com que uma onda refletida volte completamente ao nó de medição. Como a impedância impulsiva é determinada antes disso ocorra, o fato do cabo CC estar aberto não implica em prejuízos para a qualidade dos resultados. Contudo, é importante observar que as medições são feitas em torres cujo aterramento é constituído apenas pela sua fundação (ver Fig. 2.16 e Fig. 2.21). Esta não é uma situação comum em locais onde a resistividade do solo é alta, de forma que, apenas a estrutura da fundação não é suficiente para se alcançar valores baixos o bastante para garantir o bom desempenho da linha. Adicionalmente, nestes casos, os cabos contrapesos também são usados. Deve-se ficar atento, contudo, para o fato de que os contrapesos são enterrados no solo partindo da base torre e estendendo-se ao longo da faixa de servidão. Isto os deixa numa posição paralela aos cabos CC e CT, condição essa que pode levar ao acoplamento eletromagnético entre esses condutores. Ametani *et. al.* [60], usando um arranjo que em muito se assemelha a essa situação, investigaram a indução de tensão em um condutor posicionado acima do solo devido a corrente que passa em um eletrodo

horizontal sob o solo. O arranjo é mostrado na Fig. 2.25. Nele, um condutor de cobre nú de 4 m é enterrado no solo a uma profundidade de 30 cm e um cabo coaxial de núcleo simples (3D2V) com 2 m de comprimento é posicionado a 10 cm de altura em relação ao solo. A tensão na malha metálica externa do cabo coaxial tem como referência um cabo CT de 60 m esticado com um ângulo de 90° em relação ao eletrodo de aterramento e com a extremidade distante terminada em uma haste cravada no solo (aterramento independente). A amplitude do pulso de tensão aplicado no aterramento é de 60 V e a amplitude da corrente é de 1,5 A.

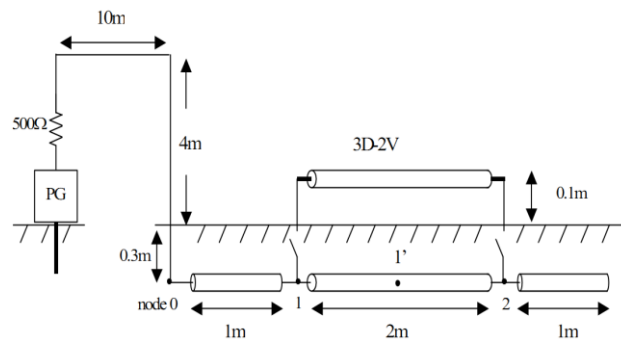


Fig. 2.25 - Arranjo usado para verificar a tensão induzida no condutor posicionado acima do solo devido a uma corrente que passa no cabo contrapeso. Fonte: adaptado de [60].

São feitas diversas medições com este arranjo, sendo variadas as condições de conexão das extremidades do cabo coaxial, onde, basicamente, as terminações podem estar aterradas ou não. Os resultados de maior interesse no contexto desta tese são apresentados a seguir, sendo considerados apenas aquele em que a malha condutora do cabo coaxial não está aterrada e aquele em que a malha está conectada a um condutor de referência de potencial independente (outro que não o cabo CT). Além disso, a situação em que a terminação do cabo coaxial (núcleo e malha) é “casada” com o aterramento auxiliar por meio de um resistor de 60 Ω também foi avaliada. Os dados obtidos mostraram que uma corrente passando pelo eletrodo horizontal induz uma tensão no condutor posicionado acima do solo e que essa tensão pode ser bastante significativa. É importante ressaltar que o eletrodo horizontal e o cabo coaxial estão posicionados paralelamente, o que favorece o acoplamento entre eles. Assim, o uso da técnica de medição apresentada por Chisholm (Fig. 2.16 e Fig. 2.21) em regiões de solo com elevada resistividade levaria a problemas de acoplamento e, conseqüentemente, a erros nos valores medidos, já que sob tal circunstância é inevitável o uso de cabos contrapesos. Uma alternativa possível seria posicionar os cabos CC e CT com um ângulo de 90° em relação aos cabos contrapesos. Neste caso, um aspecto merece destaque: a largura da faixa de servidão é bastante limitada (~25 m para uma linha de 138 kV), de modo que para fazer zig-zags com um cabo de 150 m a proximidade dos condutores, entre as voltas, seria maior e, conseqüentemente, haveria um aumento do acoplamento entre eles. Tal condição levaria inevitavelmente a erros nos valores medidos.

2.3 Considerações finais

Neste capítulo foi feita uma breve descrição de trabalhos relacionados a medições em aterramentos elétricos. Os trabalhos foram escolhidos com o propósito de ampliar o entendimento em relação àquilo que tem sido usado em medições de aterramento, sobretudo no que se refere a metodologias. De modo geral, os métodos podem ser classificados em dois tipos: medições em baixa frequência, para determinar a *resistência* de aterramento e medições em alta frequência para determinar a *impedância* do aterramento. No primeiro caso, usualmente, o Método da Queda de Potencial é usado. Apesar de existirem algumas propostas de variação desta técnica, seus fundamentos, em essência, são preservados. No segundo caso, a situação é diferente. A variabilidade das técnicas indica que a proposição de um método mais geral de medição em alta frequência ainda está em fase de amadurecimento e distante da maturidade, isto porque, a literatura mostra que as respostas não fazem frente às perguntas ainda existentes. Apesar desse cenário, ainda são poucos os trabalhos práticos direcionados ao tema.

3 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO USANDO UM CIRCUITO DE CORRENTE DE PEQUENO COMPRIMENTO

3.1 Introdução

As vantagens de se determinar o valor da *impedância* de aterramento de modo prático, em condições de campo, certamente despertam o interesse das empresas do setor de energia elétrica em todo o mundo. Uma forte motivação para isso está relacionada ao fato desse parâmetro apresentar estreita relação com o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. A prática comum, entretanto, é a medição da *resistência* de aterramento usando o Método da Queda de Potencial [30]. Na literatura especializada, apesar de ainda serem relativamente poucas, são encontradas propostas metodológicas para a medição da *impedância*, como aquela disponível no Guia do IEEE [26] e a apresentada por Chisholm [52].

Apesar de a impedância ser prontamente determinada com o uso dessas técnicas, os cabos usados nos circuitos de corrente e de tensão, qualquer que seja a técnica, são sempre muito longos (50-200 m, em [52]). Ressalta-se, nestes casos, que o uso de cabos tão longos pode dificultar bastante o trabalho de medição, sobretudo quando as torres estão instaladas em locais desfavoráveis. Além disso, dependendo das dimensões da malha de aterramento, é possível que o comprimento dos cabos, sobretudo o de corrente, seja ainda maior que os 200 m usados em [52], o que potencializa as dificuldades naturalmente existentes. Neste capítulo é apresentado um componente que substitui o cabo simples normalmente usado no circuito de corrente. Como será mostrado, devido às suas características construtivas, a velocidade de propagação nesse elemento é relativamente baixa. Com isso, a janela de tempo necessária para determinar a impedância impulsiva, determinada conceitualmente de modo semelhante ao que foi feito em [49] (ver Fig. 2.18), é conseguida com um circuito de corrente de comprimento significativamente menor.

3.2 Aspectos teóricos do método proposto

A representação esquemática da técnica de medição proposta é apresentada na Fig. 3.1. Nela, observa-se que o circuito de tensão é constituído por um cabo de comprimento x que está aterrado na sua extremidade distante. Já o circuito de corrente é constituído por um “solenóide” de 12 m de comprimento que também tem a sua extremidade distante aterrada. Esse solenóide é constituído por um tubo de PVC que tem ao longo do seu comprimento, na sua superfície, um fio isolado enrolado. Essa é uma importante característica construtiva que proporciona a esse elemento uma elevada indutância por metro.

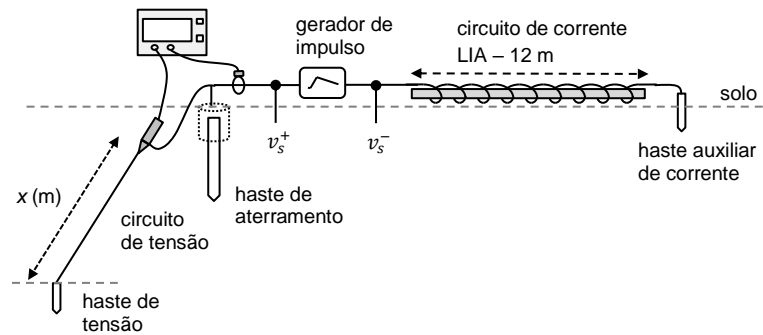


Fig. 3.1 – Arranjo usado em uma medição da impedância de aterramento.

O elemento usado no circuito de corrente é, então, uma linha de transmissão com perdas desprezíveis, sendo, na prática, considerada uma linha “sem perdas” com uma elevada indutância por metro. A velocidade de propagação nesse tipo de linha é definida por [61]:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L'C'}} \quad (2)$$

onde, L' é a indutância por metro e C' é a capacitância por metro da linha. Consequentemente, a velocidade de propagação neste elemento deve ser pequena se comparada à velocidade de propagação naquele cabo simples usado no circuito de corrente e que, normalmente, fica esticado sobre o solo. Portanto, o tempo necessário para que a onda refletida na extremidade distante do circuito de corrente chegue novamente ao gerador deve ser relativamente alto. Devido a essa característica, este solenoide é chamado “Linha Infinita Artificial” (LIA). Também é importante ressaltar que sendo a impedância característica, ou de surto, de uma da linha sem perdas definida por [61]:

$$Z_{LIA} = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3)$$

onde, L' é a indutância por metro e C' é a capacitância por metro da linha, a impedância da LIA é relativamente alta devido, também, à sua elevada indutância por metro. Esses parâmetros são tratados de forma detalhada mais a frente, contudo, ressaltam-se aqui as implicações desta condição durante a medição da impedância.

Quando o impulso de tensão deixa o gerador, a onda que sai do terminal positivo, v_s^+ , chega quase que imediatamente na haste de aterramento em teste, como mostra a Fig. 3.2. A onda que deixa o gerador pelo terminal negativo, v_s^- , propaga com uma velocidade v_p em direção a haste auxiliar corrente através da LIA.

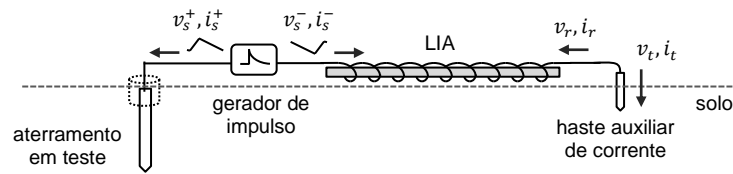


Fig. 3.2 – Onda impulsiva propagando em direção ao aterramento sob teste e em direção ao aterramento auxiliar de corrente.

Devido à sua alta indutância por metro, a velocidade de propagação na LIA é relativamente baixa (aproximadamente 2% da velocidade da luz, como será mostrado mais a frente) e a sua impedância de surto é relativamente alta (aproximadamente 1.800Ω , também mostrado mais adiante). Disso decorrem dois aspectos que devem ser destacados.

i) Nos circuitos “tradicionais” de corrente constituídos por um cabo esticado sobre o solo a velocidade de propagação é alta. Nas medições feitas por Petrache [49], o autor usa um cabo de 100 m de comprimento nesse circuito. Os resultados mostraram que a velocidade de propagação, v_p , foi de $2,5 \times 10^8 \text{ m/s}$ ($0,8333c$, sendo c a velocidade da luz). Portanto, 400 ns após o impulso deixar o gerador, parte da corrente que chega à haste auxiliar de corrente começa a fluir pelo solo (i_t). A quantificação da corrente que entra nessa haste dependerá das condições de casamento, ou descasamento, de impedâncias existentes entre o cabo usado no circuito de corrente e o aterramento auxiliar desse circuito. Para o circuito da Fig. 3.2, a corrente depende do casamento/descasamento da LIA com a haste auxiliar de corrente.

A partir do momento que a corrente i_t passa a fluir pelo solo, torna-se fundamental que a haste auxiliar esteja suficientemente afastada do eletrodo em teste. Isto porque, quando esse cuidado não é devidamente observado, ocorre uma interferência entre as regiões dos aterramentos dos dois eletrodos, resultante do acoplamento mútuo resistivo entre ambos [62,63]. É importante observar que apenas após esse instante é possível existir esse acoplamento. Portanto, a interferência do aterramento auxiliar no aterramento em teste é função não apenas da distância entre os eletrodos, mas também do tempo que a onda de corrente i_s^- leva para chegar à haste auxiliar. Colocado de outra forma, enquanto a onda de corrente que deixa o gerador, i_s^- , não chegar à haste auxiliar de corrente, não há como existir a chamada interferência ou acoplamento mútuo entre os aterramentos. Essa é uma importante condição que se tira vantagem com o uso da LIA, já que a velocidade de propagação nela é relativamente pequena.

ii) A corrente que inicialmente entra no aterramento em teste, i_s^+ , é dependente das impedâncias do aterramento em teste e do condutor usado no circuito de corrente, Z_{cc} . Isto porque no momento em que o pulso é aplicado [64],

$$i_s^+ = -i_s^- = \frac{v_s(t)}{Z_g + Z_{cc}} \quad (4)$$

sendo, $v_s(t)$ a tensão do pulso aplicado [V], Z_g a impedância do aterramento em teste [Ω] e Z_{cc} a impedância característica, ou de surto, do condutor usado no circuito de corrente. Neste caso a impedância interna do gerador não entrou no cômputo, por se considerar que ela é bem menor que as outras duas. Nas medições feitas por Chisholm [52] em aterramentos de linhas de transmissão, foi registrado o valor de 444 Ω para Z_{cc} . Já impedância da LIA é de, aproximadamente, 1.800 Ω . Portanto, é importante que a amplitude da onda gerada seja suficientemente elevada quando se usa a LIA, visando garantir as condições adequadas de corrente no solo.

É importante destacar, também, que impedância do aterramento pode ser determinada a partir da equação (4) onde,

$$Z_g = \frac{v_s(t)}{i(t)} - Z_{cc} \quad (5)$$

sendo, $v_s(t)$ a tensão da fonte [V], $i(t)$ a corrente que entra na LIA ou no aterramento e Z_{cc} a impedância característica, ou de surto, da LIA. Esse, certamente, é um modo bastante simples de se determinar a impedância de aterramento, por não ser preciso medir a tensão desenvolvida no solo. Contudo, para isso, é necessário que a impedância do circuito de corrente, neste caso a impedância da LIA, seja conhecida. Contudo, determinar precisamente esse valor durante as medições realizadas em campo é uma tarefa bem difícil de ser conseguida. Nesta tese, essa opção não foi utilizada.

De modo geral, então, o método apresentado neste trabalho propõe o uso de uma linha de transmissão “sem perdas” de alta indutância no circuito de corrente. Devido a essa característica, a velocidade de propagação nesse meio é relativamente baixa, aumentando o tempo, t_d , necessário para que a onda que deixa o gerador chegue à haste auxiliar de corrente. Consequentemente, o tempo necessário para que a onda refletida na região de fronteira, na extremidade distante do circuito de corrente, chegue ao gerador, será de $2t_d$. Como esse é um tempo relativamente alto se comparado ao tempo de um circuito de corrente constituído por um cabo simples esticado sobre o solo, neste trabalho essa linha é chamada “Linha Infinita Artificial” (LIA). Outra característica da LIA é a sua alta impedância. Devido a essa condição, torna-se necessário ter o cuidado de se garantir que a amplitude da onda impulsiva gerada seja suficientemente elevada, de forma que a corrente que entra no aterramento em teste apresente condições adequadas, sobretudo quando a medição é feita em locais que tenham algum tipo de corrente espúria no solo.

3.3 Linha Infinita Artificial (LIA)

3.3.1 Características construtivas

A Linha Infinita Artificial é constituída por um tubo de PVC com 20 mm de diâmetro e 3 m de comprimento que tem na sua superfície um fio condutor isolado que é enrolado ao longo do seu comprimento, como mostra de forma esquemática a Fig. 3.3.

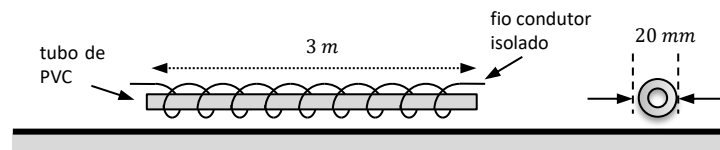


Fig. 3.3 - Arranjo construtivo da LIA, vista lateral e frontal.

Na construção das LIAs foram usados dois tipos de fios com características semelhantes (22 AWG com isolamento em poliestireno e 24 AWG com isolamento a base de verniz), devido à disponibilidade de material. Foi feita uma contagem do número de espiras em 1 cm e em 10 cm nas LIAs, sendo estimada a quantidade de 800 a 850 espiras por metro. A Fig. 3.4 mostra a LIA já implementada.



(a)



(b)

Fig. 3.4 - Linha Infinita Artificial (LIA) implementada.

3.3.2 Velocidade de propagação e tempo de trânsito

O arranjo mostrado na Fig. 3.5 foi usado para determinar a velocidade de propagação na LIA. Inicialmente foram conectadas duas LIAs. Na sequência, as demais foram conectadas uma a uma até que as quatro estivessem conectadas formando uma linha de transmissão de 12 m de comprimento. A Fig. 3.6 mostra a forma de onda do impulso aplicado (0,8/50 μ s).

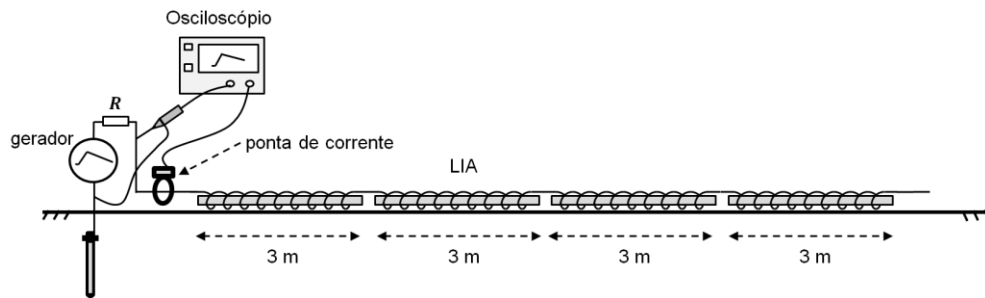


Fig. 3.5 - Arranjo usado para a medição da impedância e velocidade de propagação nas LIAs.

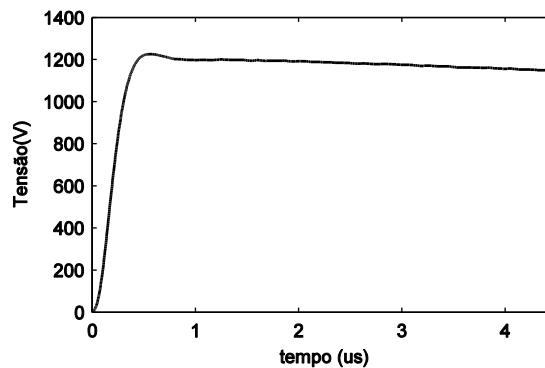
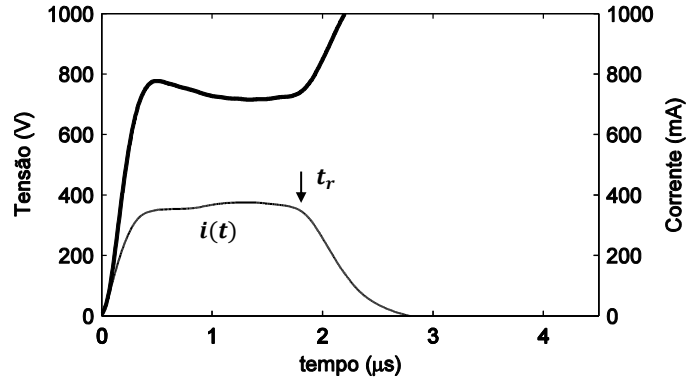


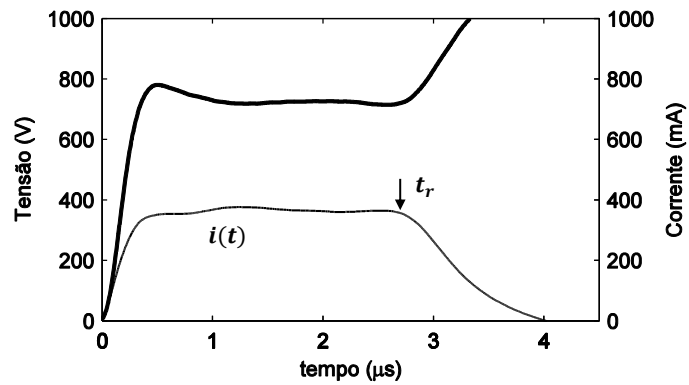
Fig. 3.6 - Impulso gerado, fonte aberta.

Na Fig. 3.7 são apresentadas as curvas de tensão e de corrente quando a onda impulsiva é aplicada ao arranjo. As figuras mostram que, tanto para a tensão como para a corrente, após uma variação de crescimento rápida as curvas tendem a estabilidade, permanecendo assim por algum tempo. No instante de tempo t_r há uma variação abrupta nessa condição de estabilidade, momento esse em que as ondas de tensão e de corrente refletidas vindas da extremidade distante LIA, que não está aterrada (linha aberta), chegam ao terminal de medição. A Fig. 3.7a mostra que as ondas refletidas chegam ao terminal de medição no instante $t = 1,8 \mu$ s, aproximadamente. Neste caso, o tempo de trânsito, t_d , e a velocidade de propagação, v_p , nas 2 LIAs é de, respectivamente, $0,9 \mu$ s e $6,66 \text{ m}/\mu$ s (2,22 % a velocidade da luz). Na Fig. 3.7b, onde foram usadas 3 LIAs, $t_d = 1,4 \mu$ s e $v_p = 6,43 \text{ m}/\mu$ s (2,14 % a velocidade da luz). Já na Fig. 3.7c, onde foram usadas 4 LIAs, $t_d = 1,9 \mu$ s e $v_p = 6,32 \text{ m}/\mu$ s (2,12% a velocidade da luz). Como esperado, a velocidade de propagação não é absolutamente a mesma em todas as LIAs, mas são bem próximas devido à semelhança das

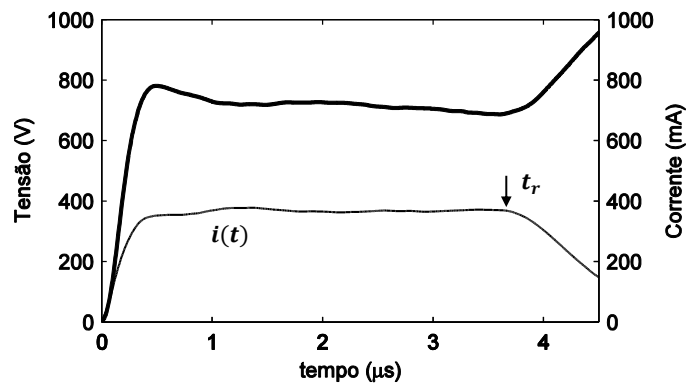
características construtivas. Fica evidente, também, a baixa velocidade, relativamente, com que a onda propaga na LIA.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.7 – Curvas da tensão $v(t)$ e da corrente $i(t)$, para (a) 2 LIAs, (b) 3 LIAs e (c) 4 LIAs.

Foi feita, também, uma verificação da influência do tipo do solo na velocidade de propagação para duas condições distintas. Uma em que as LIAs ficaram sobre um piso cimentado e outra em que as LIAs ficaram sobre um gramado bem aparado. Os resultados são apresentados na Fig. 3.8 onde se verifica que a velocidade, nestas condições, é praticamente a mesma. É importante ressaltar, contudo, que a velocidade de propagação pode apresentar variações dependendo das condições de uso da LIA. Isto é particularmente verdade quando se está fazendo medições em campo, devido à irregularidade do solo sobre o qual as LIAs são apoiadas, como será mostrado mais adiante.

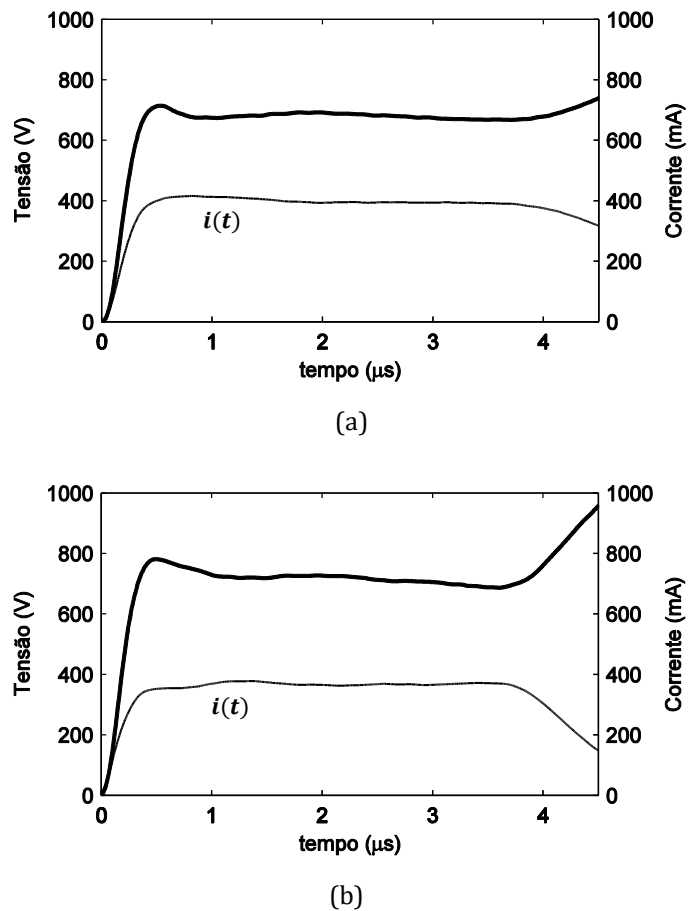


Fig. 3.8 - Curvas da tensão $v(t)$ e da corrente $i(t)$ com as LIAs: (a) sobre um piso cimentado e (b) sobre um gramado bem aparado.

3.3.3 Parâmetros elétricos e impedância característica (impedância de surto)

Como a LIA apresenta características que a assemelha a um solenoide, a sua indutância por metro pode ser calculada de forma aproximada por [65]:

$$L' = \mu_0 N^2 A \quad (6)$$

onde, μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, N é o número de espiras por metro e A é a área da seção reta das espiras (área da seção transversal do tubo de PVC, considerando o seu raio externo).

Assim, a indutância por metro da LIA varia entre $\sim 252 \mu\text{H/m}$ (800 espiras/m) e $\sim 285 \mu\text{H/m}$ (850 espiras/m). Uma verificação da validade desses valores foi feita por meio de medições, sendo norteadas pela teoria de linhas transmissão. Assim, usando as equações (2) e (3), a expressão para o cálculo da indutância por metro foi definida:

$$L' = \frac{Z_{LIA}}{v_p} \quad (7)$$

onde, Z_{LIA} é a impedância de surto da LIA [Ω] e v_p é a velocidade de propagação na LIA [m/s].

Nos gráficos apresentados na Fig. 3.9 as curvas de impedância correspondem à relação tensão/corrente medidas com 4 LIAs conectadas (Fig. 3.8). Como as curvas apresentam certa oscilação na região de “estabilidade”, foi atribuído o valor médio do intervalo indicado à impedância Z_{LIA} (1.935 Ω e 1.711 Ω nas condições de, respectivamente, piso gramado e piso cimentado). Medições feitas em dias distintos (todos secos) não mostraram variações significativas nesses resultados.

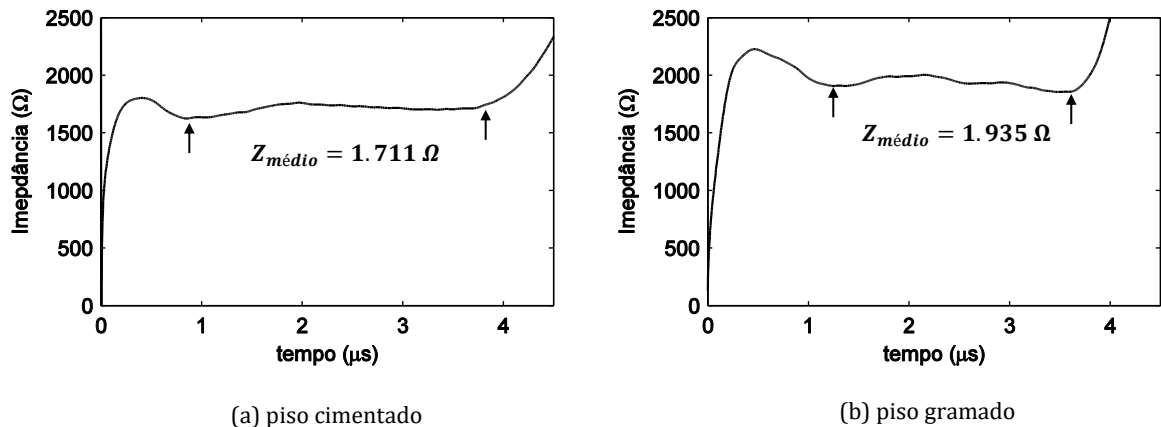


Fig. 3.9 - Impedância de surto da LIA ($\ell = 12$ m), (a) no piso cimentado e (b) no piso gramado.

Uma vez conhecidos os valores de Z_{LIA} e de v_p , é possível calcular, baseado nas medições, o valor de L' usando a equação (7). Assim, para o piso cimentado, $L' = 307 \mu\text{H/m}$ e para o piso gramado, $L' = 263 \mu\text{H/m}$. Os resultados mostram que a indutância por metro calculada a partir da equação (6) apresenta boa concordância com os valores obtidos por meio de medição.

Já a capacitância por metro é um parâmetro mais difícil de ser calculado analiticamente devido à sua expressiva dependência da altura em relação ao solo. Tal dependência foi verificada experimentalmente com um arranjo semelhante ao apresentado na Fig. 3.5, porém, neste caso, foram usadas apenas duas LIAs. Para variar a altura foram usadas algumas peças de madeira, como mostra esquematicamente a Fig. 3.10. Foram feitos dois tipos de medição, sendo um para verificar a

velocidade de propagação e outro para verificar a impedância Z_{LIA} . No primeiro caso a extremidade distante da LIA ficou aberta (alta impedância) e no segundo foi usado um resistor para “casar” a LIA, também na sua extremidade distante, com uma haste (20 cm). Com isso, a onda refletida de volta ao ponto de medição foi amenizada.

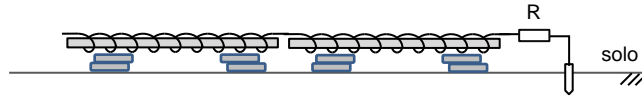


Fig. 3.10 – Variação na altura das LIAs em relação ao solo, suportadas por peças de madeira.

A Fig. 3.11 mostra que a tensão, após um transitório de subida, entra em uma região de “estabilidade”. Após certo tempo, nessa região, subitamente ocorre uma variação de aumento em seu valor. Esse instante corresponde a chega da onda refletida vinda da extremidade distante da LIA. As curvas mostram que à medida que a altura aumenta, o instante de tempo de chegada da onda refletida torna-se cada vez menor. Fica evidente, portanto, que a velocidade de propagação é cada vez maior à medida que a altura aumenta.

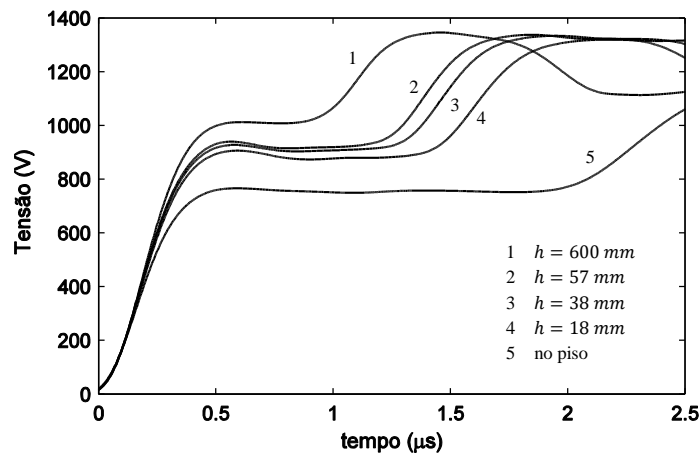


Fig. 3.11 – Dependência do tempo de trânsito e da velocidade de propagação com relação à altura.

Na Fig. 3.12 são apresentadas as curvas de impedância. Nela verifica-se, que, de fato, pequenas alterações da altura provocam variações significativas no valor da impedância de surto da LIA. Estes resultados são muito importantes, sobretudo do ponto vista prático. Isto porque as medições feitas em campo revelaram que, de modo geral, não há como evitar as imperfeições ou irregularidades na superfície do solo no qual as LIAs são colocadas. Assim, a altura da LIA em relação ao solo varia bastante ao longo de sua extensão.

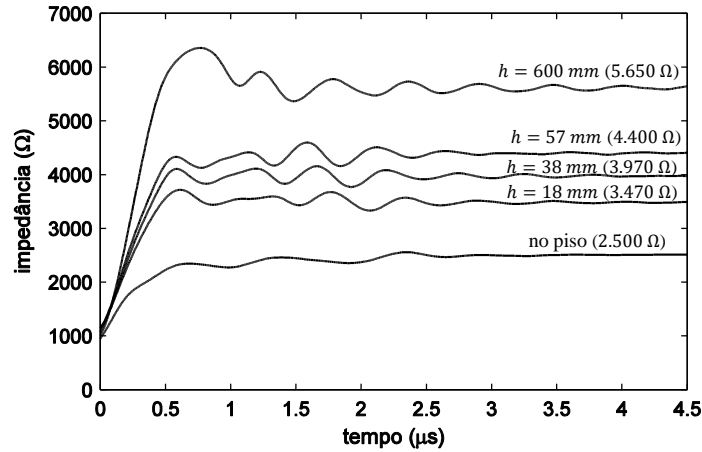


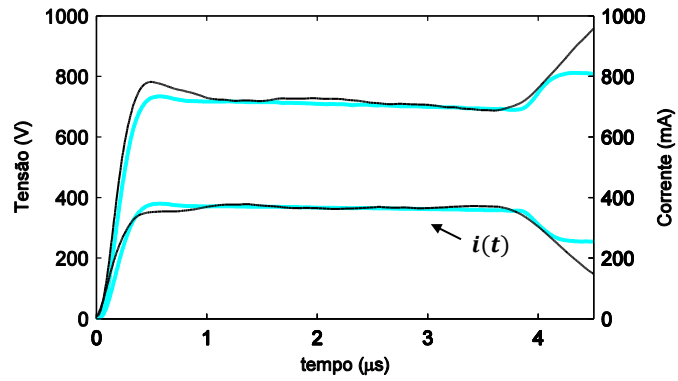
Fig. 3.12 - Impedância característica variando com a altura.

Em condições de campo, portanto, a não uniformidade da superfície impossibilita a definição de uma altura única em relação ao solo. Portanto, é possível apenas determinar uma altura equivalente para o arranjo e uma capacitância por metro que esteja associada a essa altura. Nestas condições a capacitância por metro pode ser definida, também, a partir das equações (2) e (3), sendo:

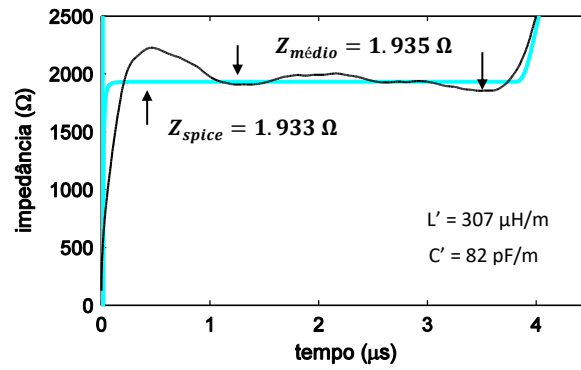
$$C' = \frac{1}{Z_{LIA} \cdot v_p} \quad (8)$$

onde, Z_{LIA} é a impedância de surto da LIA [Ω] e v_p é a velocidade de propagação na LIA [m/s]. Assim, voltando às impedâncias apresentadas na Fig. 3.9, para o piso cimentado, $C' = 82$ pF/m e para o piso gramado, $C' = 90$ pF/m.

Apesar de não se ter uma solução de forma fechada para o cálculo da capacitância por metro, a validade dos valores obtidos e, também, a efetividade do uso da Teoria de Linhas de Transmissão aplicada ao arranjo de medição foram verificadas por meio de simulação computacional usando o PSPICE. Nas simulações foram usadas linhas de transmissão sem perdas com 12 m de comprimento terminadas com uma alta impedância. A Fig. 3.13 e a Fig. 3.14 mostram os resultados obtidos. Em ambas são observadas características semelhantes, onde as curvas de tensão e de corrente simuladas apresentam boa concordância com as curvas obtidas por meio de medição. Em relação à impedância transitória, verifica-se que as curvas obtidas por meio de medição apresentam algumas oscilações que não são observadas nas curvas obtidas no PSPICE. Essas oscilações acontecem, obviamente, devido às pequenas oscilações existentes nas curvas de tensão e de corrente, já que $z(t) = v(t)/i(t)$. Apesar disso, os valores médios calculados com os dados da medição apresentam boa concordância com os valores simulados.

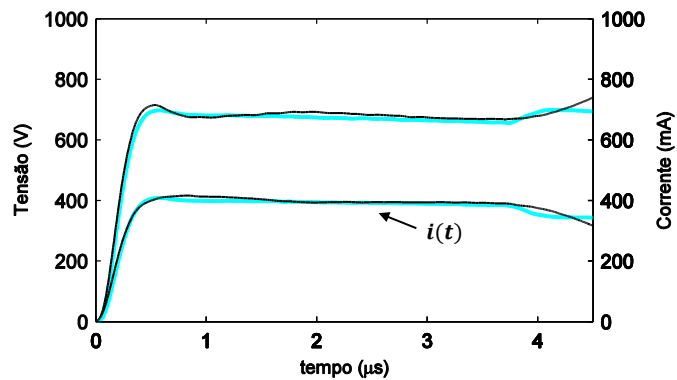


(a) — medido — simulado



(b) — medido — simulado

Fig. 3.13 – Curvas (a) da tensão e da corrente e (b) da impedância transitória.
(piso gramado, $L' = 307 \mu\text{H/m}$, $C' = 82 \text{ pF/m}$)



(a) — medido — simulado

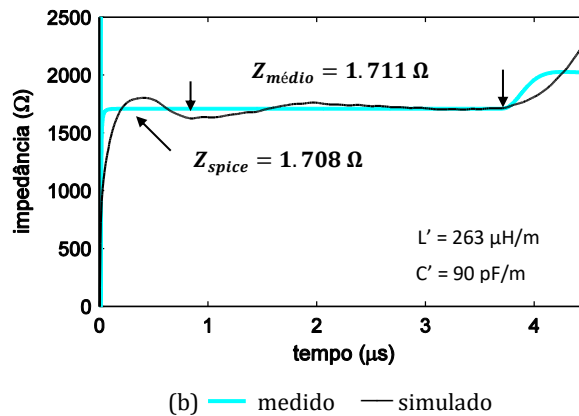


Fig. 3.14 – Curvas (a) da tensão e da corrente e (b) da impedância transitória. (piso cimentado, $L' = 263 \mu\text{H/m}$, $C' = 90 \text{ pF/m}$)

3.3.4 Validação da LIA na medição de impedância

Nas seções anteriores foram apresentados os fundamentos teóricos relacionados ao uso da Linha Infinita Artificial. Naturalmente, uma etapa necessária é a verificação da consistência do uso desse elemento. Sendo assim, a seguir é feito um estudo teórico-experimental que norteia a validade e a efetividade da técnica proposta. Nas medições, o registro das ondas de tensão e de corrente foi feito com um osciloscópio Tektronix TDS 2012C, pontas de tensão Tektronix TPP0201-10X (10 M Ω , 12 pF) e Tektronix P6015A-1000X (100 M Ω , 3 pF) e uma sonda de corrente Pearson CT 4100 (140 Hz-30 MHz). O arranjo usado é apresentado na Fig. 3.15.

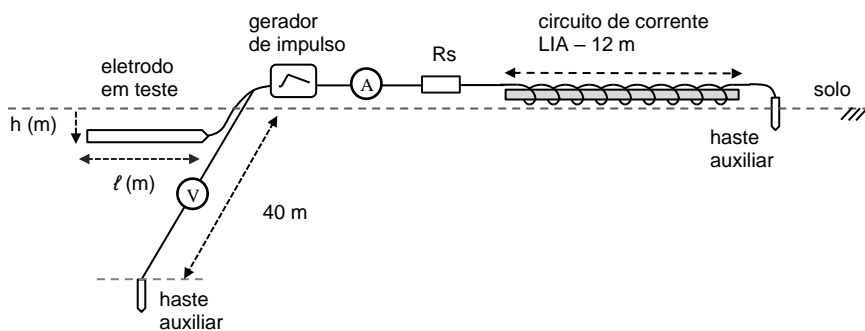


Fig. 3.15 – Arranjo usado na medição.

O gerador de impulso usado neste trabalho, além de pequeno (19x11x5 cm) e leve (540 g), apresenta as seguintes características: tempo de frente e de cauda da onda facilmente ajustáveis; tensão de pico de 1 kV ($\pm 0,2$ kV); alimentação com bateria de 12 V. No geral, as medições foram feitas com uma onda que tinha o tempo de frente de, aproximadamente, 1 μs e o tempo de cauda de 500 μs . Análises preliminares evidenciaram a inexistência de uma associação entre o tempo de cauda

e a definição da impedância impulsiva. A escolha do tempo de cauda, contudo, não foi ao acaso. Mais a frente, neste trabalho, será apresentado um estudo onde é feita a medição da resistência de aterramento usando a LIA no circuito de corrente e esse sinal se mostrou adequado. A Fig. 3.16 mostra a forma de onda do sinal gerado na condição de fonte aberta.

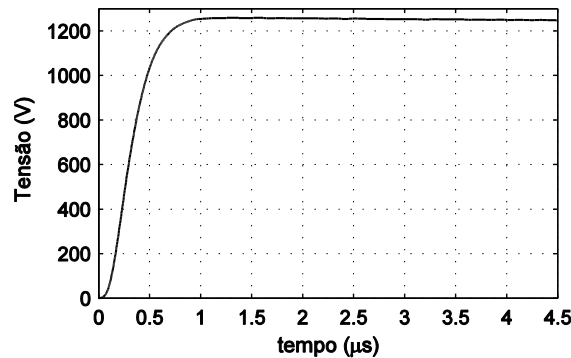


Fig. 3.16 – Onda de tensão na saída do gerador.

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados comparativos das curvas de tensão, $v(t)$, corrente, $i(t)$, e impedância transitória, $z(t)$, obtidas por meio de medições e simulações. As simulações foram feitas no PSPICE. Neste ambiente as LIAs foram modeladas por linhas de transmissão sem perdas, sendo usado os parâmetros indutância e capacitância por metro apresentados na seção anterior. O eletrodo de aterramento também foi modelado por uma linha de transmissão, porém com perdas [66,67]. O gerador foi modelado por um circuito RC com características semelhantes às do circuito real usado no gerador. Os resultados apresentados abaixo foram obtidos a partir de três configurações de aterramento, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos aterramentos.

Tipo do eletrodo	ℓ (m)	raio (mm)	h (cm)	ρ_e (Ωm)	ϵ_r
horizontal	18	5,00	20	1.190	15
horizontal	12	5,00	20	1.091	15
haste	2,4	6,35	—	525	15

Fonte: feito pelo autor.

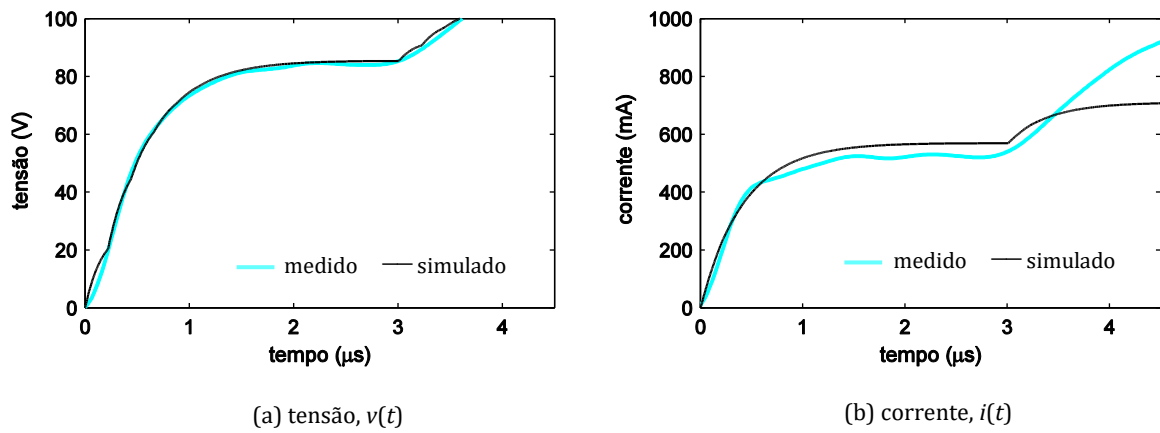
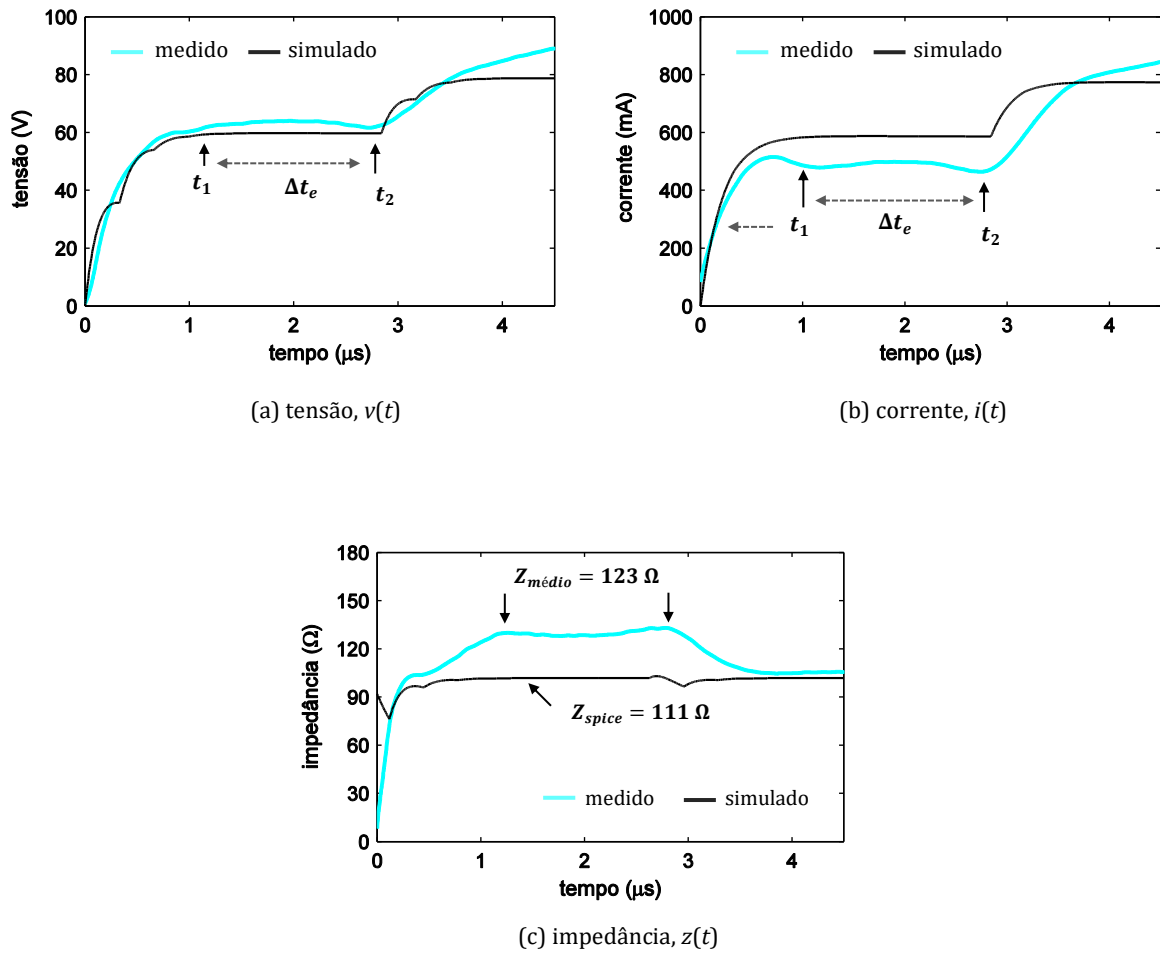
A resistividade do solo, como em todos os casos apresentados neste trabalho, é quantificada por meio do seu valor equivalente, ρ_e , sendo os cálculos feitos usando-se os valores medidos e equações já consolidadas na literatura. A impedância de aterramento é definida em um intervalo de tempo tomado na impedância transitória, $z(t)$. Este é o conceito que vem sendo adotado por Chisholm, um importante pesquisador da área e de incontestável competência técnica [56,57,58,59].

Recentemente, o autor desta tese, Chisholm e outros escreveram dois artigos em conjunto onde este conceito também foi utilizado [68,69].

Nas figuras apresentadas abaixo (Fig. 3.17, Fig. 3.18 e Fig. 3.19), verifica-se que, de modo geral, existe uma boa concordância das curvas $v(t)$, $i(t)$ e $z(t)$, medidas e simuladas. Em todas elas, verifica-se que, inicialmente, as curvas passam por um “transitório de crescimento rápido” (t_1) e, então, tendem a “estabilidade”, permanecendo assim por certo tempo (Δt_e). Em certo momento (t_2), já no final da região de “estabilidade”, há uma modificação abrupta desta condição. Isto acontece devido à chegada ao terminal de medição da onda refletida vinda da extremidade distante do circuito de corrente (LIA). Portanto, esse instante do tempo (t_2) depende da velocidade de propagação na LIA. De fato, foram registradas variações neste valor, considerando as diversas medições realizadas em locais distintos ($\sim 3 \mu s \leq t_2 \leq \sim 4 \mu s$, para 4 LIAs conectadas em série). As variações aconteceram, sobretudo, devido à variação da capacitância por metro da LIA, por dois motivos principais: a) a irregularidade do solo sobre o qual as LIAs foram apoiadas (variação da altura, h); b) variação no valor de ϵ devido as medições serem feitas em locais distintos (solos distintos). Já a indutância por metro, mostrou-se menos sensível às imperfeições do solo, já que a permeabilidade magnética do solo e do ar são, aproximadamente, iguais.

Considerando tais aspectos, a impedância impulsiva (Z_p) obtida por meio de medição, em todos os casos, foi definida pelo valor médio no intervalo de tempo Δt_e . Assim, foram atribuídos à Z_p os valores de 123 Ω , 157 Ω e 221 Ω para, respectivamente, os arranjos de aterramentos 1, 2 e 3 (respectivamente, Fig. 3.17, Fig. 3.18 e Fig. 3.19). Os valores obtidos por meio de simulação tornam-se constantes no intervalo de tempo Δt_e , sendo de 111 Ω , 149 Ω , e 219 Ω para os aterramentos 1, 2 e 3, respectivamente. A comparação entre os valores medidos e os simulados evidencia a boa concordância de resultados. Dos resultados apresentados, a maior diferença foi verificada no arranjo 1, sendo essa diferença de 9,7 %. Nos demais casos as diferenças foram menores (arranjo 2) ou praticamente não existiu (arranjo 3).

É importante mencionar ainda que as análises comparativas não se limitaram apenas aos casos apresentados aqui neste trabalho. A escolha dos casos apresentados teve por base o fato dos arranjos serem bem distintos (eletrodo horizontal longo e eletrodo vertical “curto”). Contudo, a tendência de concordância foi verificada em todos os casos estudados. Houve casos, entretanto, em que as formas de onda eram semelhantes, porém com uma diferença percentual na região de “estabilidade” (impedância impulsiva) que chegou a $\sim 30\%$. Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato do modelo usado no PSPICE, associado ao eletrodo de aterramento, não contemplar a variação dos parâmetros elétricos do solo (ρ e ϵ) com a frequência. Essa variação, como mostra Alípio [70], pode ter efeitos significativos nos resultados.



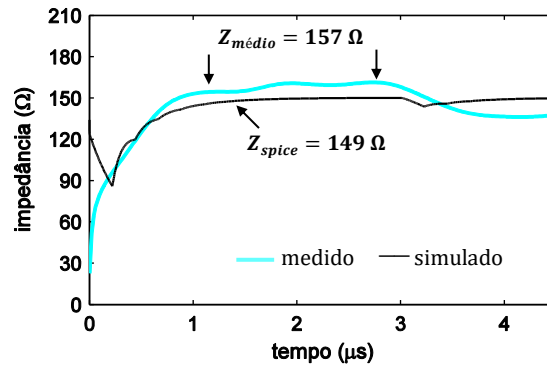
(a) impedância, $z(t)$

Fig. 3.18 – Resultados obtidos por meio de simulação e medição.
(eletrodo horizontal, $\ell = 12$ m, $r = 6,35$ mm, $h = 20$ cm, $\rho_e = 1.091 \Omega$, $\epsilon_r = 15$).

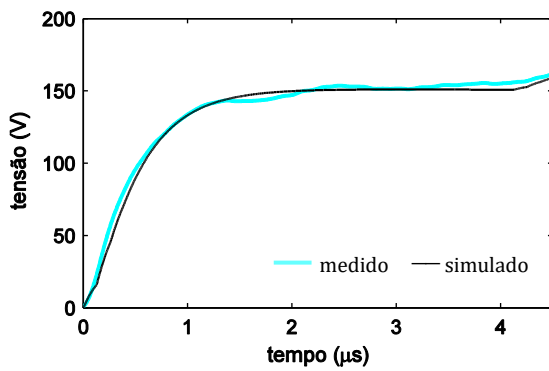
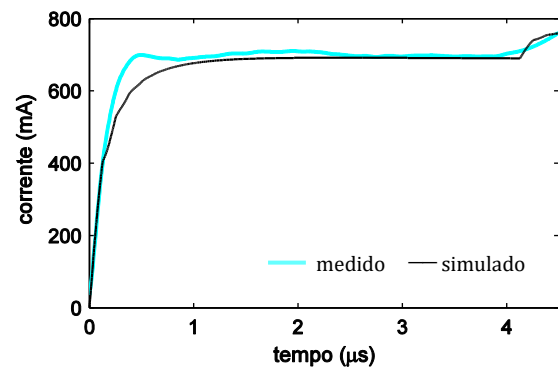
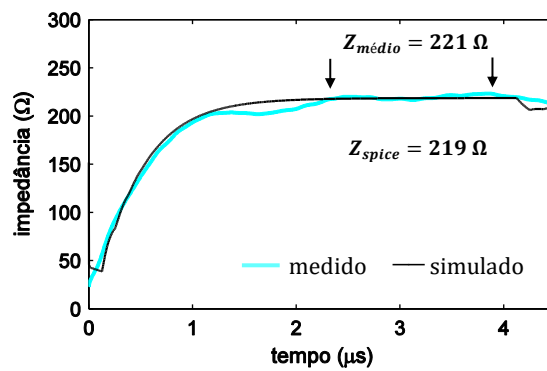
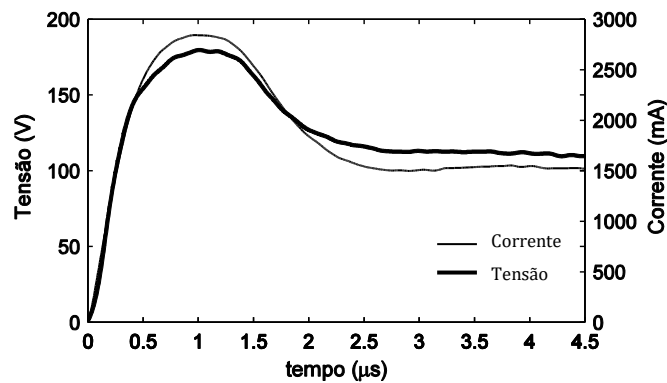
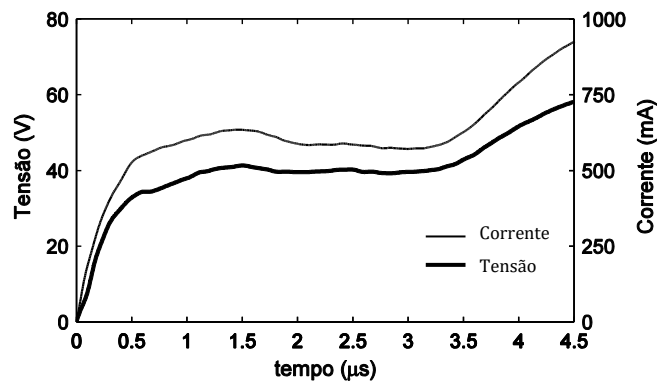
(a) tensão, $v(t)$ (b) corrente, $i(t)$ (a) impedância, $z(t)$

Fig. 3.19 – Resultados obtidos por meio de simulação e medição.
(eletrodo vertical, $\ell = 2.4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 1/2''$), $\rho_e = 525 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 15$).

Naturalmente, é importante que seja feita, também, uma comparação dos resultados obtidos em um arranjo convencional (circuito de corrente constituído por um cabo simples de 200 m) com os obtidos em um arranjo em que o circuito de corrente é constituído pelas LIAs (12 m). A Fig. 3.20a e a Fig. 3.20b mostram as curvas de tensão e de corrente obtidas em ambas as situações. O aterramento é constituído por um eletrodo horizontal ($\ell = 18\text{ m}$, $r = 6,35\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$) enterrado em um solo que tem a resistividade equivalente de $660\ \Omega\text{m}$. Nelas, verifica-se que a corrente é maior para a situação em que o cabo simples é usado. Isto porque a sua impedância de surto é menor que a da LIA. Consequentemente, a tensão no aterramento é maior. Na Fig. 3.20c, são apresentadas as curvas da impedância transitória. Nela, verifica-se que, após um transitório rápido de crescimento, a impedância entra na região de “estabilidade” a partir do instante de tempo t_1 ($0,6\ \mu\text{s}$), em ambos os casos. No instante de tempo t_2 ($1,7\ \mu\text{s}$) as ondas refletidas vindas da extremidade distante do circuito de corrente chegam ao terminal de medição na situação em que foi usado um fio simples no circuito de corrente. Isto porque a velocidade de propagação no fio simples é relativamente alta. Para o caso em que se utilizou as LIAs, as ondas refletidas somente chegam no instante de tempo t_3 ($3,3\ \mu\text{s}$). Portanto, a comparação dos resultados deve ser feita no intervalo entre t_1 e t_2 . Nesse intervalo fica evidente a proximidade existente entre os resultados ($\sim 65\ \Omega$), independentemente de se ter usado um fio simples ou as LIAs no circuito de corrente.

(a) curvas $v(t)$ e $i(t)$.

Circuito de corrente: cabo simples (100 m)

(b) curvas $v(t)$ e $i(t)$.

Circuito de corrente: LIA (12 m)

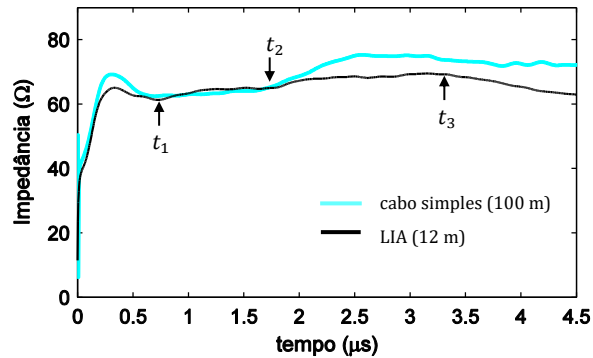
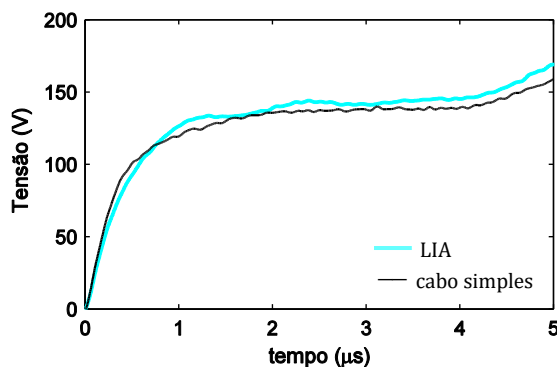
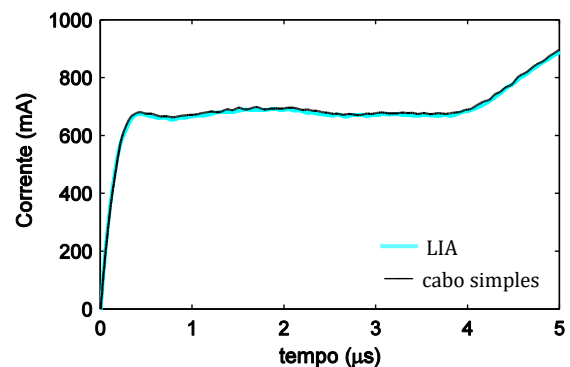
(c) impedâncias, $z(t)$

Fig. 3.20 – Curvas $v(t)$, $i(t)$ e $z(t)$. Aterramento: eletrodo horizontal, $\ell = 18$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 1/2''$), $\rho_e = 660$ Ω m. Circuito de corrente: (a) cabo simples, 200 m; (b) LIA 12 m.

Ainda visando um melhor entendimento sobre as características de uso das LIAs, uma outra medição também foi feita com o objetivo de avaliar o seu uso no circuito de tensão. A medição foi feita em um aterramento constituído por um eletrodo vertical (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$ mm, $\rho_e = 453$ Ω m). Inicialmente, foi usado um cabo simples de 20 m, aterrado na extremidade distante, no circuito tensão. Na sequência, o cabo foi substituído por duas LIAs de 3 m conectadas em série e aterradas na extremidade distante. No circuito de corrente, em ambos os casos, foram usadas 4 LIAs de 3 m (circuito de 12 m). Os resultados obtidos são apresentados na Fig. 3.21, onde se verifica que as curvas de corrente são absolutamente coincidentes, como esperado. Já o circuito de tensão apresentou uma pequena variação. Os valores obtidos com a LIA no circuito de tensão são ligeiramente superiores, porém, bem próximos daqueles obtidos com o cabo simples. Isso acontece porque no circuito de potencial a corrente é bem pequena devido à alta impedância da ponta de prova (100 M Ω e 3 pF). Fica, assim, evidenciado que o uso da LIA no circuito de potencial não traz ganho nem prejuízo às medições.

(a) tensão, $v(t)$ (b) corrente, $i(t)$

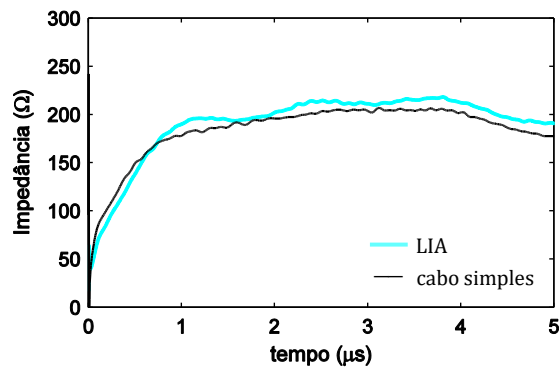
(a) impedância, $z(t)$

Fig. 3.21 – Resultados obtidos na medição usando LIAs nos circuitos de tensão e de corrente. (eletrodo vertical, $\ell = 2.4$ m, $r = 6,35$ mm ($d = 1/2''$), $\rho_e = 453$ Ωm).

3.4 Considerações de ordem prática

Nos resultados apresentados a cima, as curvas de tensão e de corrente apresentaram certa oscilação na região de “estabilidade”. Conseqüentemente, essas oscilações também estão presentes na impedância transitória, diferente do que aconteceu na simulação. Em outras situações, não apresentados neste trabalho, a curva de corrente chegou a estabilizar, mas a de tensão, de modo contrário, não. Independentemente da condição, oscilação ou falta de estabilidade na curva de tensão, os resultados das medições, nessas circunstâncias, chegaram a ser comprometidos em alguns casos. A princípio não foi detectada nenhuma condição específica para tal fato. Contudo, após uma longa e laboriosa etapa de medições em campo, verificou-se que, ao menos em parte, tais ocorrências eram devido à falta da perfeita uniformidade da linha de transmissão (LIAs em série). Foram detectados, fundamentalmente, alguns fatores associados a tal ocorrência:

a) emendas ou conexões

Como mencionado, as LIAs foram construídas com tubos de PVC de 3 m de comprimento. Para aumentar o comprimento do circuito de corrente é necessário que a quantidade de LIAs também aumente. Assim, elas precisam ser conectadas umas às outras como mostra a Fig. 3.22.

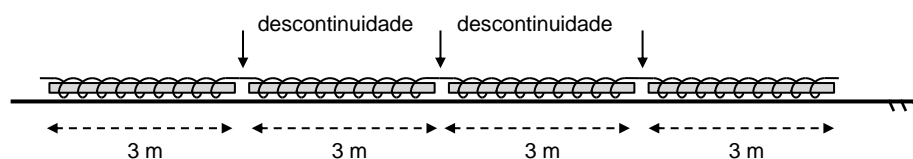
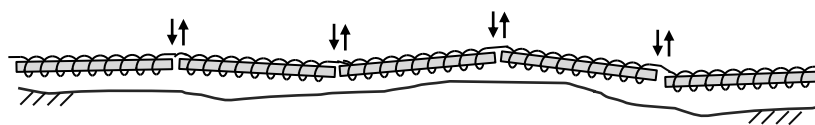


Fig. 3.22 – Descontinuidade devido às conexões das LIAs.

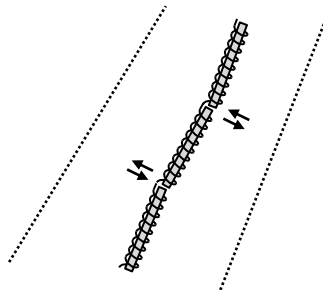
As LIAs foram construídas de forma que o sentido do enrolamento sobre o tubo de PVC é o mesmo (sentido horário, por exemplo) em todas elas. Isto garante que a onda de tensão ou corrente que deixa uma LIA continue propagando no mesmo sentido na LIA seguinte. Numa condição ideal, o enrolamento seguinte deveria começar exatamente onde o enrolamento anterior termina. Apesar do cuidado que se teve na construção das LIAs, o espaçamento existente de aproximadamente 8 cm entre os enrolamentos de duas LIAs consecutivas apresentou certa influência na qualidade dos resultados. Isto porque para a onda que propaga nesta linha de transmissão (4 LIAs conectas) cada uma das emendas representa descontinuidade onde correm pequenas reflexões.

b) alinhamento

Os testes iniciais com as LIAs foram feitos em locais com piso cimentado ou gramado. Por serem relativamente planos não foi percebida, de imediato, a significância deste parâmetro. Após uma fase preliminar de medições com bons resultados, a etapa seguinte foi, naturalmente, verificar a efetividade do seu uso em condições de campo. Foi nesse ambiente que as imperfeições da superfície do solo surgiram como um parâmetro também relevante. Na Fig. 3.23 são apresentadas duas situações comuns a que as LIAs ficam sujeitas. Na Fig. 3.23a, a irregularidade do solo leva a um desalinhamento vertical das LIAs e na Fig. 3.23b o desalinhamento é horizontal. Obviamente existe ainda uma situação ainda mais comum que é aquela em que ambos os desalinhamentos ocorrem. O fato é que, qualquer que seja o caso, para a onda que propaga na linha o desalinhamento representa descontinuidade onde, como no caso anterior, correm reflexões. Uma verificação um pouco mais detalhada destes parâmetros revelou que, dependendo do nível de severidade do desalinhamento, os resultados perdem completamente sua validade.



(a) Desalinhamento das LIAs, vista lateral.



(b) Desalinhamento das LIAs, vista superior.

Fig. 3.23 – Representação esquemática para as LIAs sobre o solo em condição de campo (vista lateral).

c) variação da altura

A variação da altura é um parâmetro que contribui no sentido de tornar a linha de transmissão não homogênea. Devido à flexibilidade do tubo de PVC, seria natural imaginar que a LIA tomaria a forma dos contornos do solo. Apesar de realmente essa ser a tendência, dependendo das condições da superfície do solo local, foi muito comum a formação de catenárias, ou simplesmente “barrigas”, como mostra esquematicamente a Fig. 3.24. Nestes casos, há variações tanto na impedância característica como na velocidade de propagação ao longo de toda a linha de transmissão (12 m) e não só nas junções das LIAs. Em alguns casos, a qualidade dos resultados chegou a ser afetada de tal forma que foi necessário eliminar ou amenizar as irregularidades existentes ao longo da linha de transmissão.



Fig. 3.24 – Formação de “barrigas” devido aos contornos do solo.

3.5 Considerações finais

Neste capítulo foi apresentada a Linha Infinita Artificial (LIA), uma linha de transmissão “sem perdas” de elevada indutância por metro. Os ensaios realizados mostraram que a velocidade de propagação nesse elemento é relativamente pequena (2 % a 3 % a velocidade da luz), sendo o tempo de trânsito de, aproximadamente, 500 ns em cada LIA (3 m). Com isso, cada LIA proporciona uma janela de tempo de medição de, aproximadamente, 1 μ s, antes que as ondas refletidas vindas da extremidade distante cheguem ao ponto de medição. A janela de tempo, contudo, pode ser facilmente ajustada com a simples conexão em série de LIAs adicionais.

A baixa velocidade de propagação é, sem dúvida, uma importante característica da LIA. Para se ter uma ideia comparativa, nas medições feitas por Chisholm [55], foi usado um cabo simples de 100 m no circuito de corrente para se conseguir uma janela de tempo de 0,8 μ s. Um tempo próximo a esse é conseguido com uma LIA de apenas 3 m de comprimento. Esta é uma característica bastante atrativa em condições de campo. É importante ressaltar, contudo, que a velocidade de propagação e a impedância de surto da LIA apresentam uma estreita dependência em relação à altura. Disso decorrem dois aspectos importantes de ordem prática devido às imperfeições ou irregularidades do solo no qual as LIAs são apoiadas em condições de campo: *i*) a impedância característica da LIA não é a mesma ao longo de toda sua extensão (12 m). Portanto, o que se tem, neste caso, é uma linha de transmissão de 12 m não uniforme. Na prática, contudo, os ensaios realizados mostraram que basta manter essa não uniformidade em níveis aceitáveis para que as medições sejam válidas. *ii*) a velocidade de propagação foi um pouco maior que as verificadas para o piso cimentado e o gramado. Isto acontece devido à variação da altura da LIA em relação ao solo em decorrência das

irregularidades naturalmente existentes. Ressalte-se, contudo, que em nenhuma situação a janela de tempo de medição foi menor que $3,5 \mu s$ para uma linha de $12 m$, como será apresentado mais a frente neste trabalho.

Finalmente, é importante mencionar que como o material que dá sustentação à LIA é de PVC, sendo leve, portanto, isso facilita o seu transporte e o seu manuseio em campo. É importante ressaltar também que a LIA e o aterramento em teste formam o circuito série que define a corrente inicial que deixa o gerador. Devido a sua alta impedância, deve-se ficar atento para que a corrente de medição não seja menor que os níveis mínimos adequados. Isto é particularmente importante quando as medições são feitas em locais que possam ter correntes espúrias no solo.

4 MEDIÇÃO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO USANDO TÉCNICAS “NÃO CONVENCIONAIS”

4.1 Introdução

Como visto no capítulo 2, tanto o circuito de tensão como o de corrente pode ser bastante longo, dependendo das dimensões do aterramento. Em muitas situações, isso pode representar uma limitação nas condições de execução dos trabalhos de medições. O uso da Linha Infinita Artificial (LIA) no circuito de corrente tem como vantagem o fato do seu comprimento ser muito menor que o do cabo simples normalmente utilizado. É desejável, portanto, que o circuito de tensão também não seja muito longo. Isso pode ser conseguido com a medição da impedância sendo feita a partir de uma técnica “não convencional”, como será mostrado neste capítulo. Neste capítulo, são apresentados, também, os resultados obtidos com outra técnica “não convencional”, onde as medições são feitas usando-se um arranjo no qual o circuito de corrente (LIAs) não está aterrado em sua extremidade distante (linha aberta).

4.2 Método do Deslocamento Oblíquo (MDO)

O *Método do Deslocamento Oblíquo* é baseado no uso de duas curvas de impedância transitória medidas a certa distância do aterramento em teste para se determinar a impedância impulsiva do aterramento. Esse método é uma adaptação do chamado *Oblique Zed Test Method* [71,72], que faz parte de um “pacote” desenvolvido pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI) [27,73] como solução para a medição da impedância de aterramento em linhas de transmissão. Por sua vez, os fundamentos dessa técnica (*Oblique Zed Test Method*) têm por base o *Oblique-Probe Method* apresentado no capítulo 2.

4.2.1 Fundamentos teóricos

Como visto no capítulo 2, com a técnica *Oblique-Probe Method* é possível determinar a *resistência* de um aterramento a partir de um conjunto de valores obtidos em medições com o eletrodo de tensão posicionado a certas distâncias do eletrodo em teste (ver Fig. 2.5 e Fig. 2.6). Usando regressão linear simples, a equação de uma reta é determinada e o valor da *resistência* corresponde ao valor da reta no ponto onde essa reta intercepta o eixo das ordenadas. O Método do Deslocamento Oblíquo tem os mesmos princípios, sendo usado, contudo, apenas dois “pontos” para determinar a equação da reta, como mostra a Fig. 4.1.

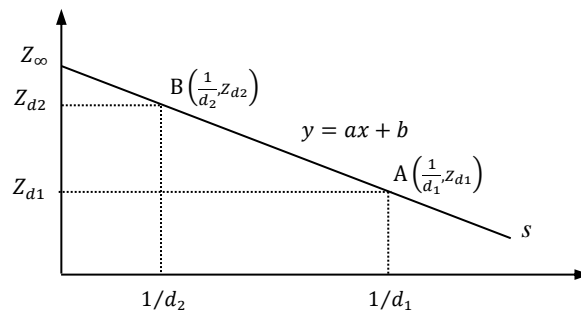


Fig. 4.1 - Caracterização da reta que determina o valor da impedância de aterramento (Z_∞).

Na Fig. 4.1, os pontos A e B determinam a reta s que tem a seguinte equação:

$$y = ax + b \quad (9)$$

sendo, a o coeficiente angular e b o coeficiente linear da reta. O coeficiente angular é definido por:

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (10)$$

Considerando os pontos $A\left(\frac{1}{d_1}, Z_{d1}\right)$ e $B\left(\frac{1}{d_2}, Z_{d2}\right)$, o coeficiente angular é, então, determinado por:

$$a = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} = \frac{Z_{d1} - Z_{d2}}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} \quad (11)$$

sendo, Z_{d1} e Z_{d2} os valores das impedâncias medidas às distâncias d_1 e d_2 , respectivamente, como mostra a Fig. 4.2.

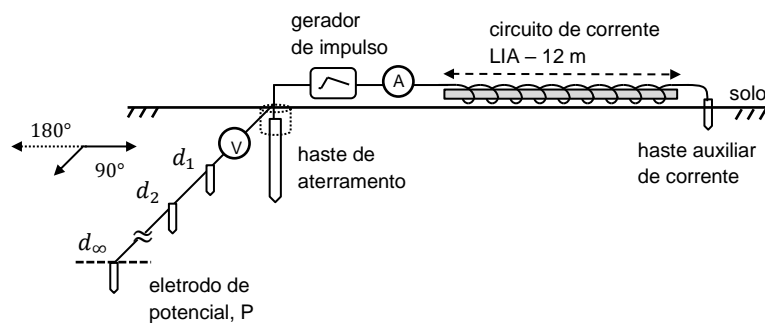


Fig. 4.2 - Arranjo usado para a medição das impedâncias Z_{d1} e Z_{d2} às distâncias d_1 e d_2 .

O coeficiente linear, b , é definido a partir equação (9), da equação (11) e usando um dos pontos, A ou B. Considerando o ponto A $\left(\frac{1}{d_1}, Z_{d1}\right)$,

$$b = y - ax \quad (12)$$

$$b = Z_{d1} - \frac{Z_{d1} - Z_{d2}}{\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}} \cdot \frac{1}{d_1}$$

Assim,

$$b = \frac{Z_{d1} \cdot d_1 - Z_{d2} \cdot d_2}{d_1 - d_2} \quad (13)$$

O valor da impedância de aterramento medido com o eletrodo de potencial posicionado no “infinito” (Z_∞) corresponde ao valor da reta s no ponto de interseção do eixo das ordenadas (ver Fig. 4.1). Esta condição corresponde aquela em que x é igual a zero, ou seja, $y = b$. Assim,

$$Z_\infty = \frac{Z_{d1} \cdot d_1 - Z_{d2} \cdot d_2}{d_1 - d_2} \quad (14)$$

As impedâncias $z_{d1}(t)$ e $z_{d2}(t)$ são determinadas pela relação entre a tensão, $v(t)$, e a corrente, $i(t)$, medidas, respectivamente, nas distâncias d_1 e d_2 . A Fig. 4.3 mostra as curvas de impedâncias medidas às distâncias de 0,9 m (d_1) e 2 m (d_2), obtidas em um aterramento constituído por um eletrodo vertical (haste). A impedância impulsiva é determinada na região onde a curva apresenta certa estabilidade [52,55,69,71], sendo considerado, neste caso, o instante de tempo correspondente a 2 μ s.

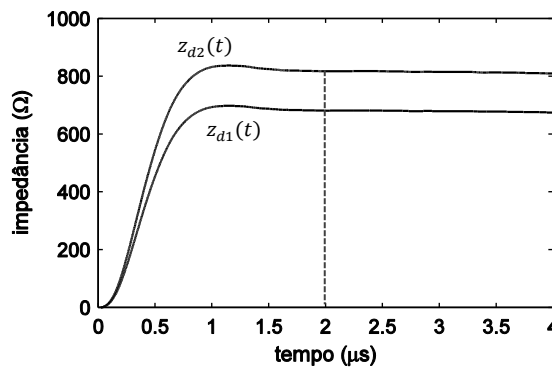


Fig. 4.3 - Impedâncias $z_{d1}(t)$ e $z_2(t)$ medidas às distâncias d_1 e d_2 , respectivamente. (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$, $\rho = 2.219 \Omega\text{m}$)

A impedância impulsiva do aterramento é, então, calculada, sendo de $928,2 \Omega$, como mostra a equação (15).

$$Z_{\infty} = \frac{z_{d1}(2\mu\text{s}) \cdot d_1 - z_{d2}(2\mu\text{s}) \cdot d_2}{d_1 - d_2} \quad (15)$$

$$Z_{\infty} = \frac{680,7 \cdot 0,9 - 816,8 \cdot 2}{0,9 - 2} = 928,2 \Omega$$

Apesar de a impedância ter sido prontamente determinada escolhendo-se um instante de tempo específico na região de estabilidade das curvas de impedância, é possível e até mesmo mais conveniente que seja determinado não apenas um valor, mas um conjunto de valores. Isto pode ser conseguido, observando que as curvas de impedância são, na verdade, constituídas por um conjunto de valores discretos devido às grandezas tensão e corrente terem sido obtidas digitalmente com o osciloscópio. Assim, de modo mais adequado, as curvas de impedância são denotadas como $z_{d1}(n)$ e $z_{d2}(n)$, onde n é o índice do sinal amostrado. É possível, portanto, determinar uma curva de impedância a partir dos n pares de valores discretos, onde:

$$z(n) = \frac{z_{d1}(n) \cdot d_1 - z_{d2}(n) \cdot d_2}{d_1 - d_2} \quad (16)$$

A Fig. 4.4a mostra a curva da impedância $z(n)$ obtida a partir da equação (16) e na Fig. 4.4b, essa curva é apresentada juntamente com $z_{d1}(n)$ e $z_{d2}(n)$.

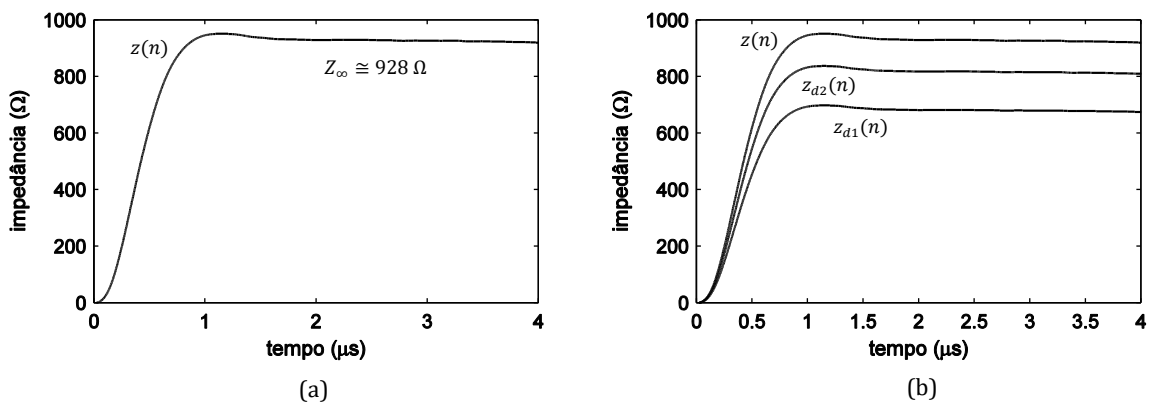


Fig. 4.4 - Curvas de impedâncias. Aterramento constituído por uma haste (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$, $\rho = 2.219 \Omega\text{m}$).

4.2.2 Impedância de aterramento utilizando o método do deslocamento oblíquo

A Fig. 4.5 mostra o arranjo usado em uma das medições. Nela verifica-se que os circuitos de tensão e de corrente estão a 90° . Entretanto, análises adicionais mostraram que esse ângulo pode variar entre 90° e 180° sem que os resultados apresentem diferenças significativas para o caso em que o aterramento é constituído por um eletrodo vertical.

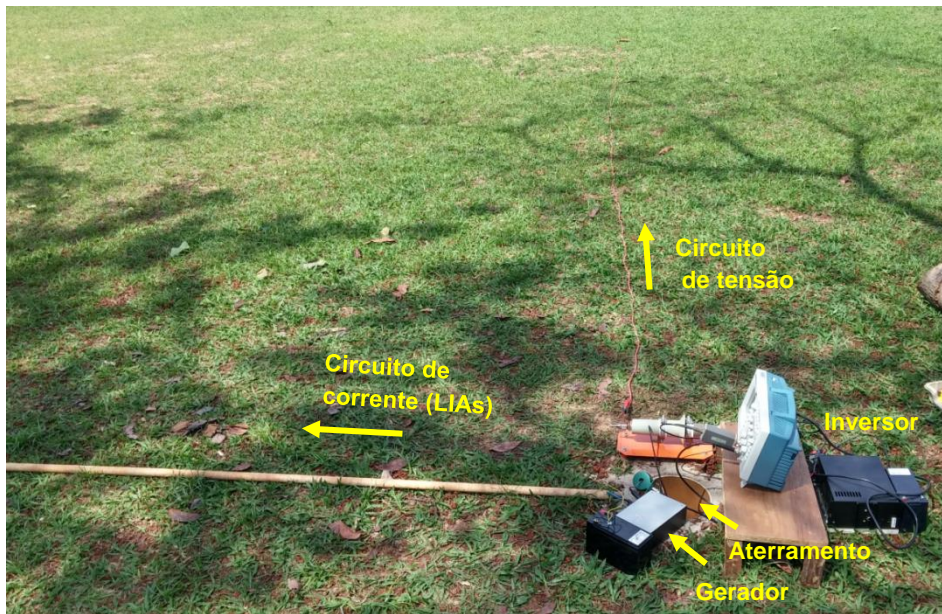


Fig. 4.5 – Método do Deslocamento Oblíquo: arranjo de medição.
(haste, $\ell = 2,4 \text{ m}$, $r = 6,35 \text{ mm}$ ($d = 1/2''$), $\rho_e = 954 \Omega\text{m}$)

Com o arranjo, são feitas medições variando-se a distância do eletrodo de potencial, P, em relação ao eletrodo de aterramento (ver Fig. 4.2). A primeira medição é feita com o eletrodo P próximo ao eletrodo de aterramento, a uma distância d_1 . Neste caso, é registrada a curva de impedância $z_{d1}(t)$. As demais medições são feitas com um acréscimo na distância (d_2, d_3, \dots, d_n), sendo registradas as impedâncias $z_{d2}(t), z_{d3}(t), \dots, z_{dn}(t)$, respectivamente. É importante mencionar que nesta medição foram usadas 6 LIAs no circuito de corrente. Portanto, as ondas refletidas vindas da sua extremidade distante chegam ao terminal de medição em um tempo um pouco maior que $4 \mu\text{s}$.

A Fig. 4.6 mostra o conjunto de curvas obtidas. Nela, observa-se que, como esperado, a “impedância impulsiva” (valor associado à região de estabilidade das curvas de impedância) aumenta à medida que o eletrodo de potencial se afasta do aterramento. Esse aumento, contudo, acontece em proporções cada vez menores, até que, a certa distância, esse aumento deixa de ser significativo. Essa distância, então, é considerada a “região distante”, local onde a elevação de potencial no solo já é desprezível ou inexistente. Assim, a última curva corresponde à impedância medida com o eletrodo P posicionado no “infinito” (d_∞), condição essa que permite determinar a impedância impulsiva do

aterramento. Para o conjunto de curvas apresentadas, $d_\infty \cong 4 \text{ m}$ e a impedância impulsiva, $Z_p \cong 400 \Omega$.

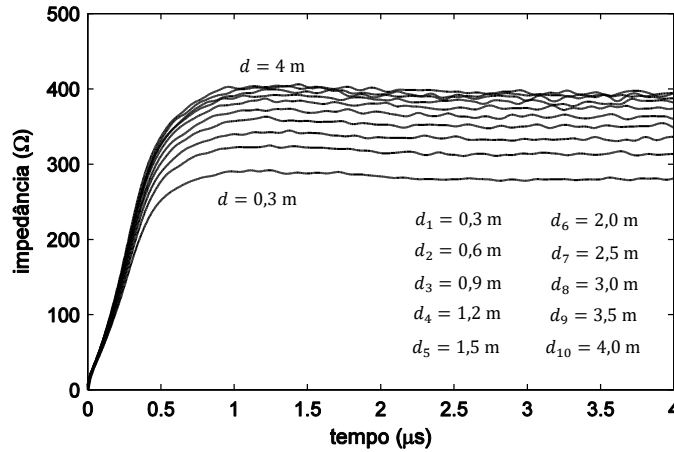


Fig. 4.6 – Conjunto de curvas de impedâncias.
(haste, $\ell = 2,4 \text{ m}$, $r = 6,35 \text{ mm}$ ($d = 1/2''$), $\rho_e = 954 \Omega\text{m}$)

O método do deslocamento oblíquo pressupõe o uso de apenas duas curvas de impedância para que a curva de impedância medida com o eletrodo de potencial posicionado no “infinito” ($d_\infty = 4 \text{ m}$ na Fig. 4.6) seja determinada. A seguir é feita uma avaliação com todas as combinações de pares de curvas possíveis, ou seja, avalia-se o uso dos pares de curvas obtidas nas distâncias d_1 e d_2 , d_1 e d_3 , d_1 e d_4 , assim sucessivamente, para determinar a curva medida no “infinito”. O uso do método, obviamente, mostra-se vantajoso somente quando o par de curvas usadas são medidas a uma distância significativamente menor que d_∞ , tornando, conseqüentemente, o circuito de tensão menor. Assim, para fins práticos, foi estipulado que a distância máxima do eletrodo de potencial não deveria ser maior que, aproximadamente, $d_\infty/2$. É importante ressaltar aqui que, apesar de a distância d_∞ , neste caso, ser relativamente pequena, aterramentos com dimensões maiores demandam distâncias significativamente maiores para d_∞ .

Nas figuras a seguir, (Fig. 4.7a–Fig. 4.21a), são apresentadas duas curvas de impedância, sendo uma relativa à impedância medida com o eletrodo de potencial no “infinito” e outra obtida com o método do deslocamento oblíquo (equação (16)). Em cada caso, também, é apresentado o gráfico com o erro percentual existente entre as curvas (Fig. 4.7b–Fig. 4.21b). O erro médio foi calculado no intervalo de tempo entre $1 \mu\text{s}$ e $4 \mu\text{s}$ devido à relativa estabilidade das curvas de impedância nessa região onde a impedância impulsiva é caracterizada. A distância máxima para o eletrodo de potencial, neste caso, foi de 2 m .

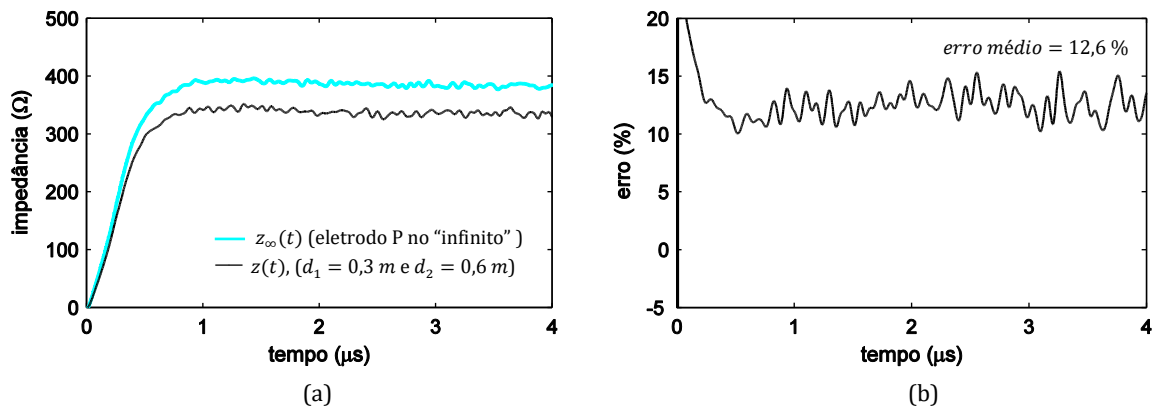


Fig. 4.7 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3\text{ m}$ e $d_2 = 0,6\text{ m}$) e (b) erro percentual.

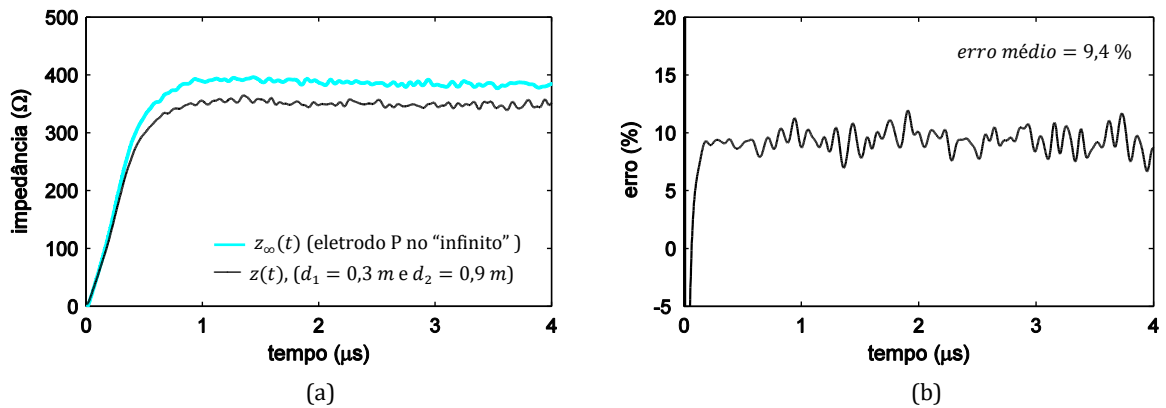


Fig. 4.8 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3\text{ m}$ e $d_2 = 0,9\text{ m}$) e (b) erro percentual.

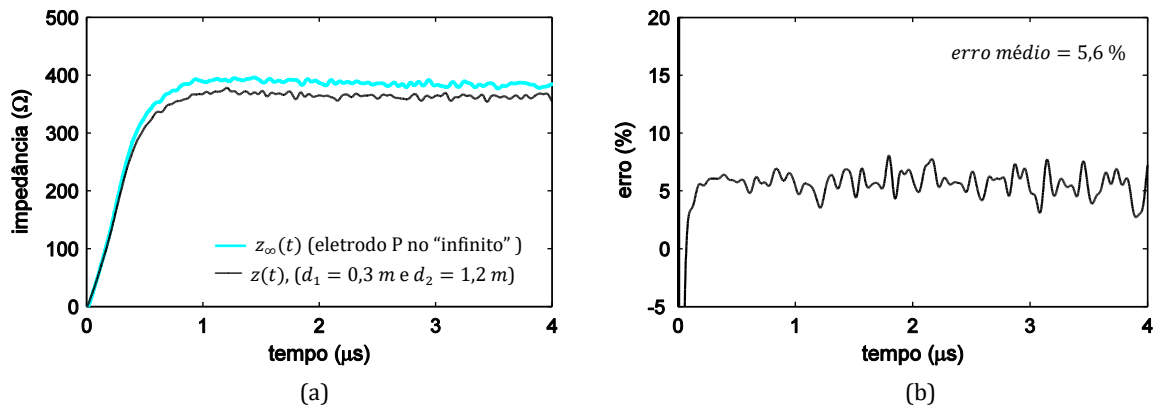


Fig. 4.9 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3\text{ m}$ e $d_2 = 1,2\text{ m}$) e (b) erro percentual.

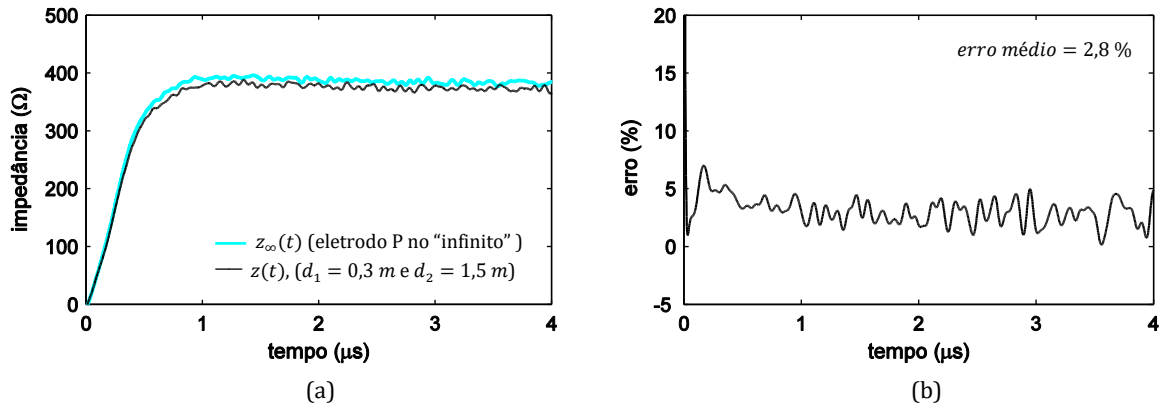


Fig. 4.10 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3 m$ e $d_2 = 1,5 m$) e (b) erro percentual.

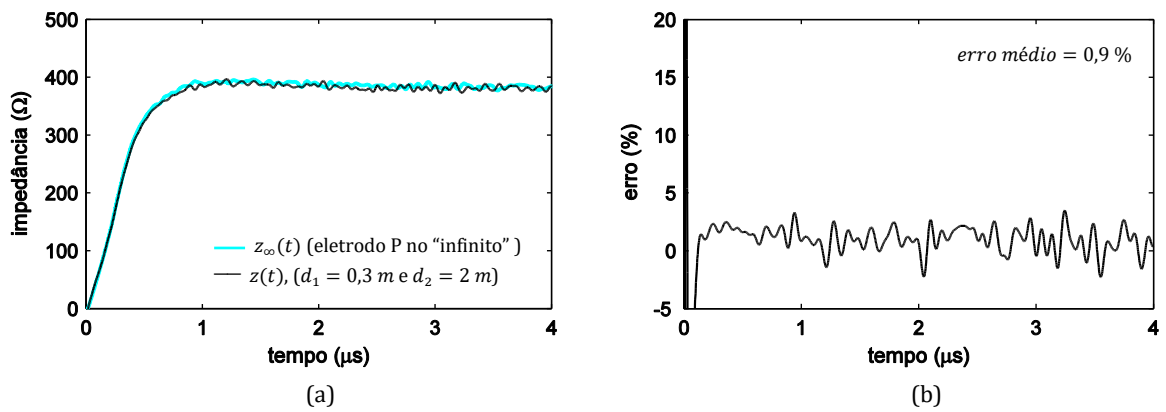


Fig. 4.11 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,3 m$ e $d_2 = 2 m$) e (b) erro percentual.

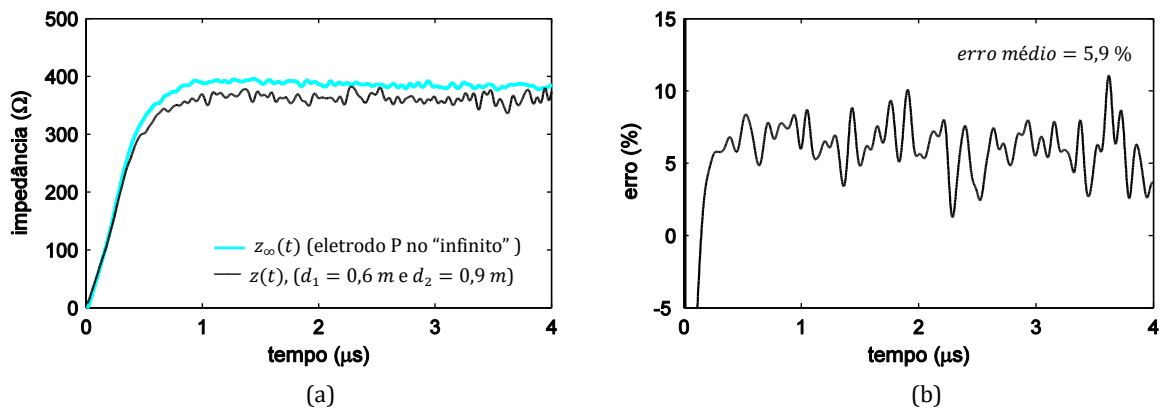


Fig. 4.12 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6 m$ e $d_2 = 0,9 m$) e (b) erro percentual.

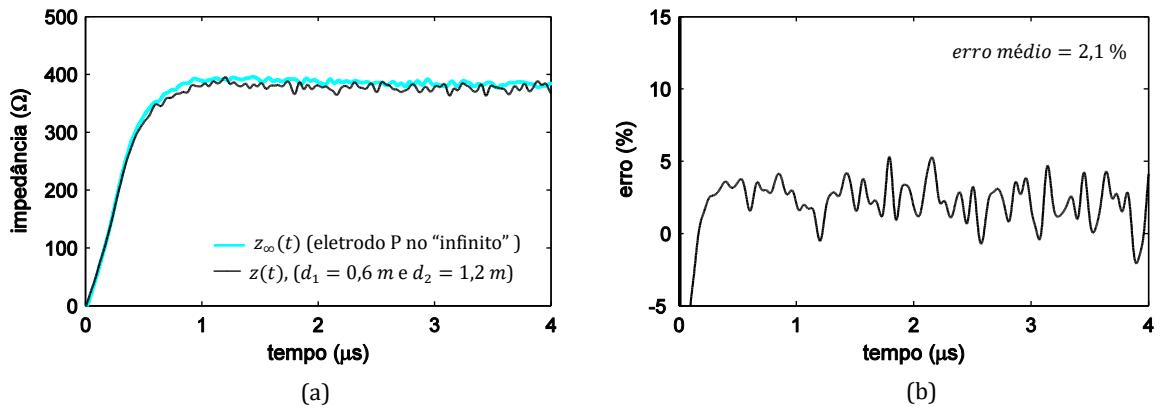


Fig. 4.13 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6 m$ e $d_2 = 1,2 m$) e (b) erro percentual.

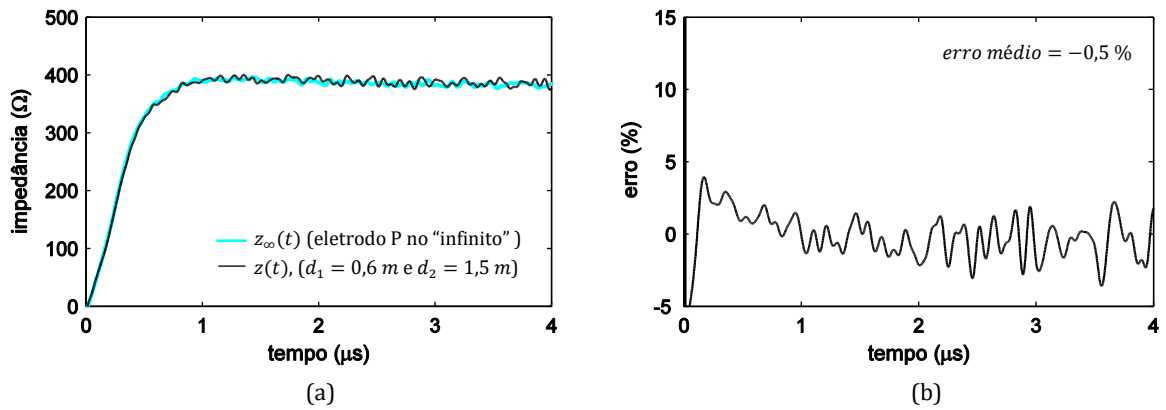


Fig. 4.14 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6 m$ e $d_2 = 1,5 m$) e (b) erro percentual.

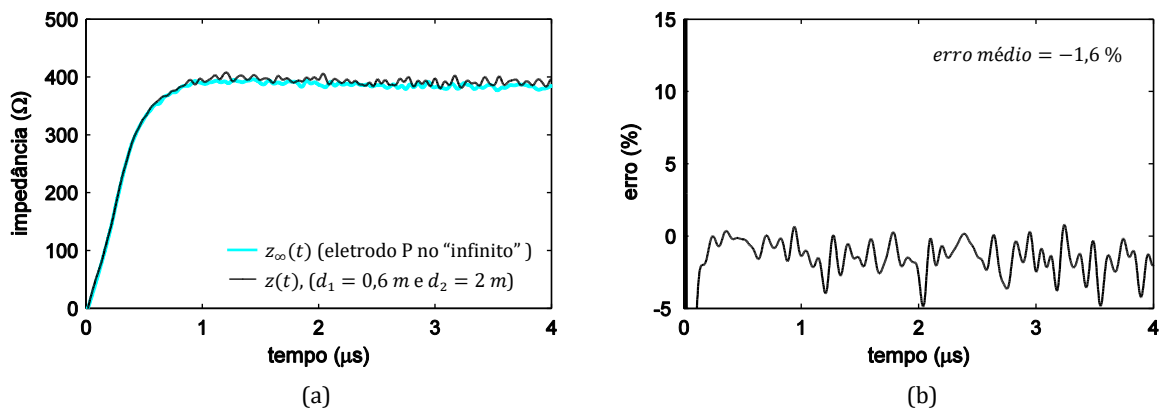


Fig. 4.15 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,6 m$ e $d_2 = 2 m$) e (b) erro percentual.

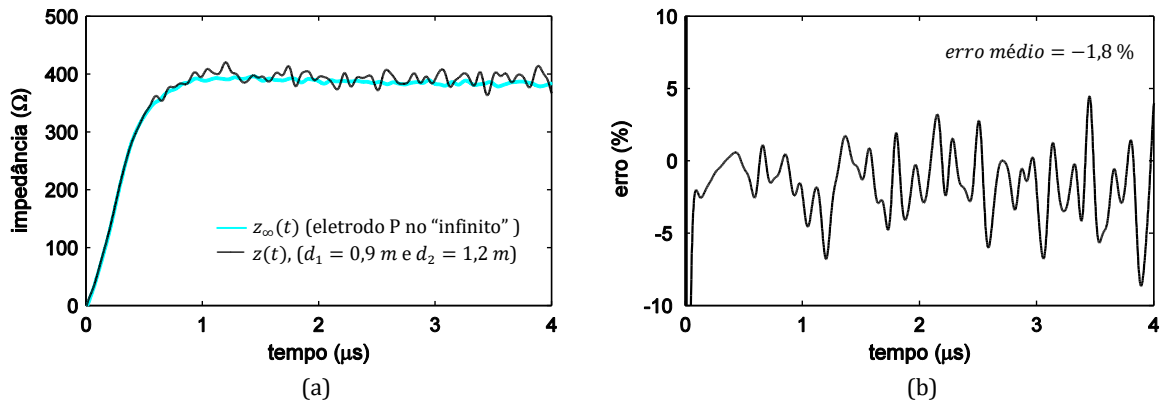


Fig. 4.16 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9\text{ m}$ e $d_2 = 1,2\text{ m}$) e (b) erro percentual.

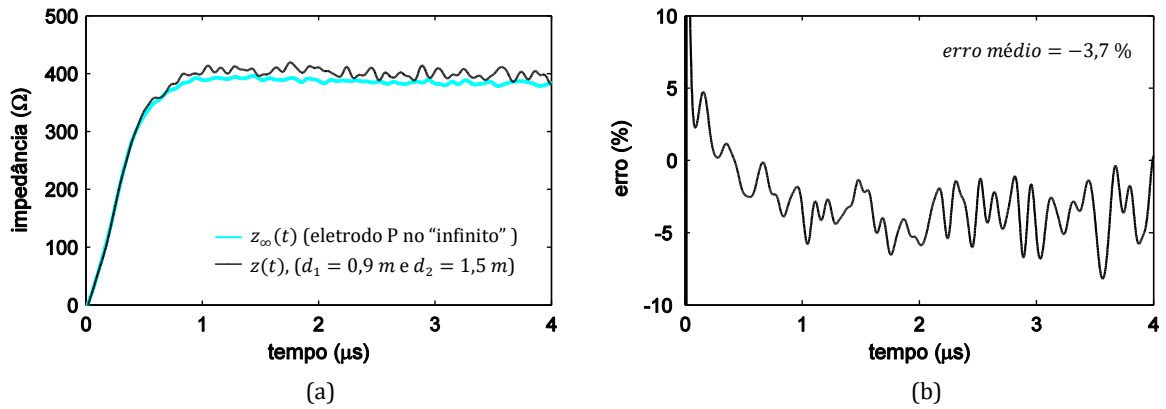


Fig. 4.17 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9\text{ m}$ e $d_2 = 1,5\text{ m}$) e (b) erro percentual.

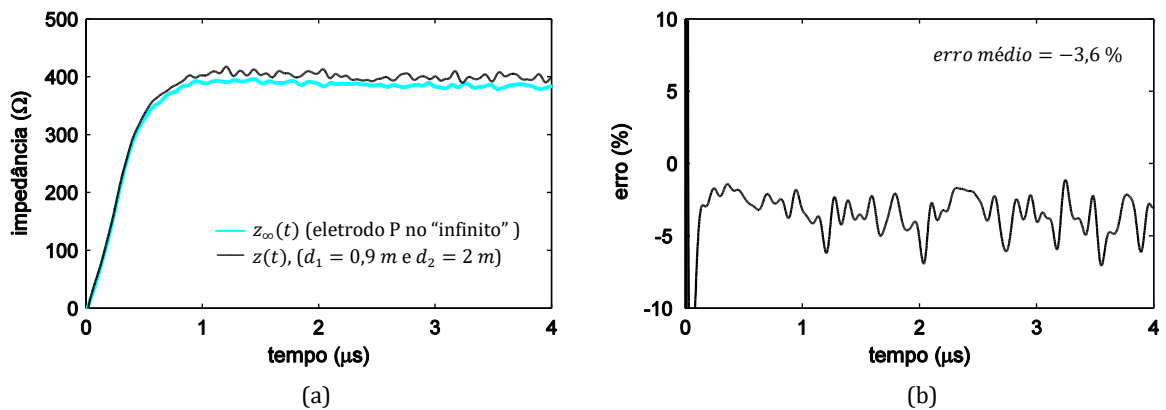


Fig. 4.18 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 0,9\text{ m}$ e $d_2 = 2\text{ m}$) e (b) erro percentual.

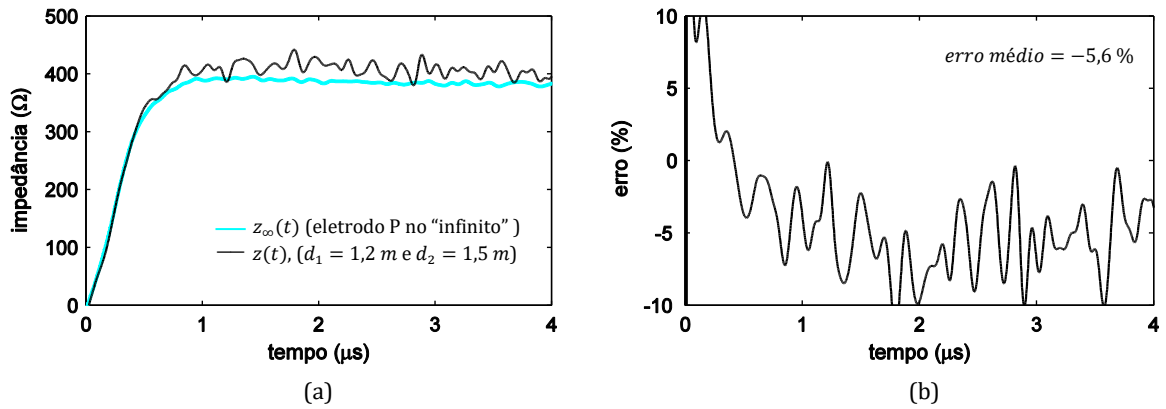


Fig. 4.19 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,2 m$ e $d_2 = 1,5 m$) e (b) erro percentual.

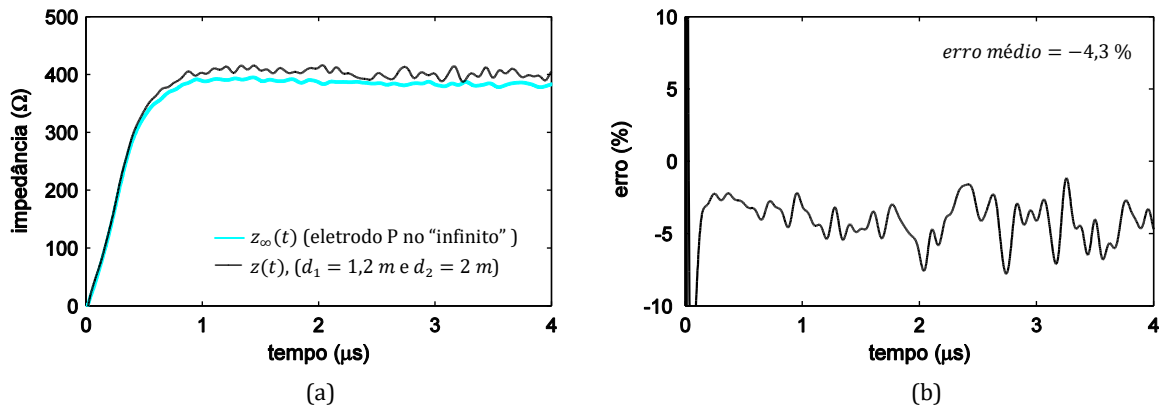


Fig. 4.20 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,2 m$ e $d_2 = 2 m$) e (b) erro percentual.

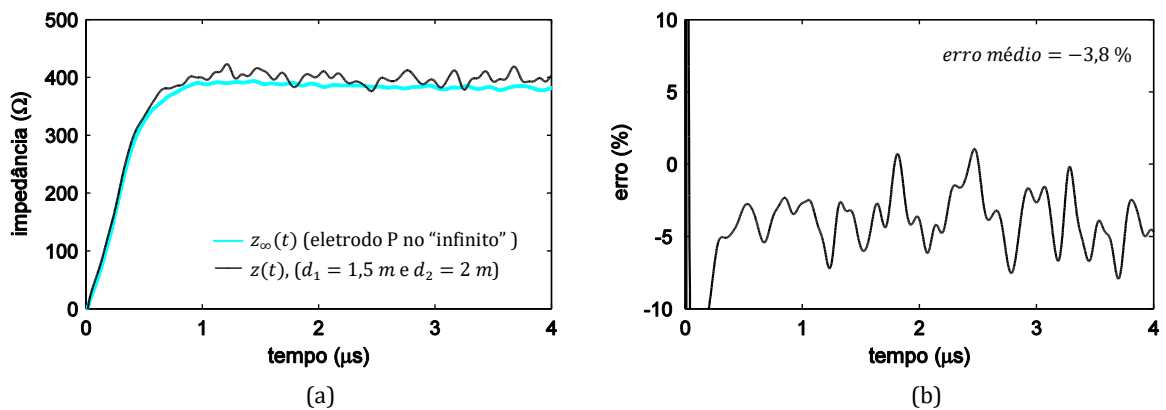


Fig. 4.21 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 4 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 1,5 m$ e $d_2 = 2 m$) e (b) erro percentual.

A Tabela 2 mostra de forma sucinta a efetividade do uso do método do deslocamento oblíquo para determinar a curva de impedância obtida na distância d_{∞} . Os resultados mostram que os pares de distâncias 0,3/2,0 m, 0,6/1,5 m e 0,9/1,2 m produziram erros bem pequenos, menores que 2 %. Contudo, a observação de maior relevância talvez seja que, em todos os casos, o erro é sempre menor que, aproximadamente, 13 %, o que para fins práticos, pode ser considerado pequeno.

Tabela 2 – Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (haste, $\ell = 2,4$ m, $r = 6,35$ mm, $\rho_e = 954$ Ω m).

d_1 (m)	d_2 (m)	erro médio (%)
0,3	0,6	12,6
	0,9	9,4
	1,2	5,6
	1,5	2,8
	2,0	0,9
0,6	0,9	5,9
	1,2	2,1
	1,5	-0,5
	2,0	-1,6
0,9	1,2	-1,8
	1,5	-3,7
	2,0	-3,6
1,2	1,5	-5,6
	2,0	-4,3
1,5	2,0	-3,8

Fonte: feito pelo autor.

O método do deslocamento oblíquo também foi aplicado em aterramentos constituídos por eletrodos horizontais “longos”. Neste caso, foi avaliado um aterramento constituído por um cabo de 6 m e outro de 12 m de comprimento, ambos com 10 mm de diâmetro e enterrados a 20 cm de profundidade no solo. Tal como no caso anterior, foi feito um conjunto de medições onde cada curva foi obtida a uma distância específica do aterramento. Tanto para o eletrodo de 6 m como para o eletrodo de 12 m, a primeira medição foi feita com o eletrodo de potencial posicionado a 2 m do aterramento. As demais medições foram feitas com espaçamentos de 2 m até que a “região distante” (d_{∞}) fosse alcançada. Nessas medições foram usadas 4 LIAs no circuito de corrente. A Fig. 4.22 mostra de forma esquemática o arranjo de medição e a Fig. 4.23 mostra imagens dos arranjos em campo.

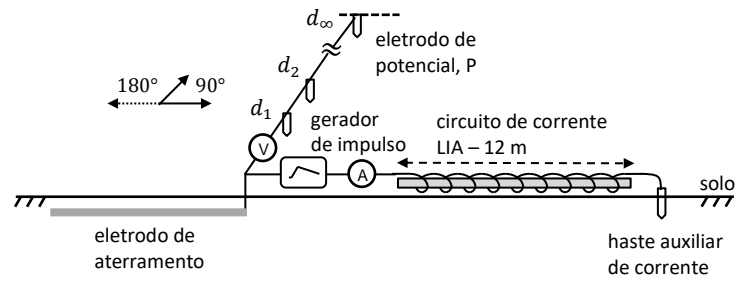


Fig. 4.22 – Arranjo usado nas medições em aterramentos constituídos por eletrodos horizontais.

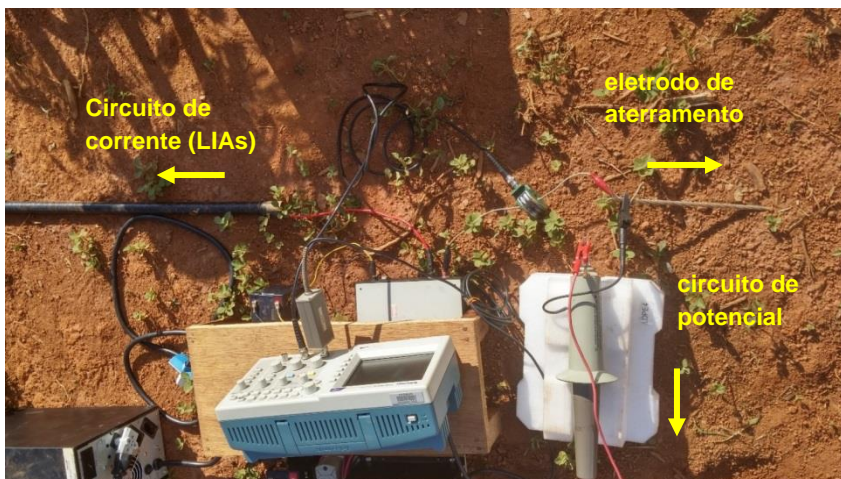


Fig. 4.23 – Imagens dos arranjos de medição em campo. Fonte: feito pelo autor.

A Fig. 4.24 mostra as curvas das impedâncias registradas no aterramento constituído por um eletrodo horizontal de 6 m. Na figura, tal como no caso anterior, verifica-se que as curvas $z(t)$ estabilizam-se com valores cada vez maiores à medida que o eletrodo P se afasta do aterramento. Fica evidente, também, que a “região distante” (d_{∞}) é alcançada com uma distância de 14 m, onde o valor de $z(t)$ na região de estabilidade é de, aproximadamente, 600 Ω .

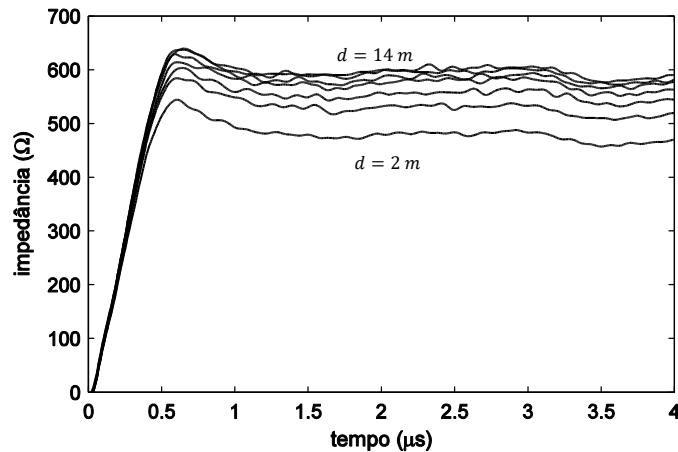


Fig. 4.24 – Conjunto de curvas de impedância.
(eletrodo horizontal, $\ell = 6\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$)

Neste aterramento, o método do deslocamento oblíquo também foi usado para determinar a sua impedância impulsiva a partir de duas das curvas medidas. Neste caso, a curva medida a uma distância de 14 m foi usada para expressar a impedância na região “distante”. Com isso, foi estipulada a distância máxima de 8 m ($d_n \cong d_{\infty}/2$) para o afastamento do eletrodo de potencial na aplicação do método. As figuras a seguir (Fig. 4.25a–Fig. 4.30a) mostram as curvas de impedâncias, uma relativa à impedância medida com o eletrodo de potencial no “infinito” e outra obtida com o método do deslocamento oblíquo. Além disso, em cada caso, é apresentado o gráfico com o erro percentual existente entre as curvas (Fig. 4.25b–Fig. 4.30b). O erro médio foi calculado no intervalo de tempo entre 1 μs e 4 μs .

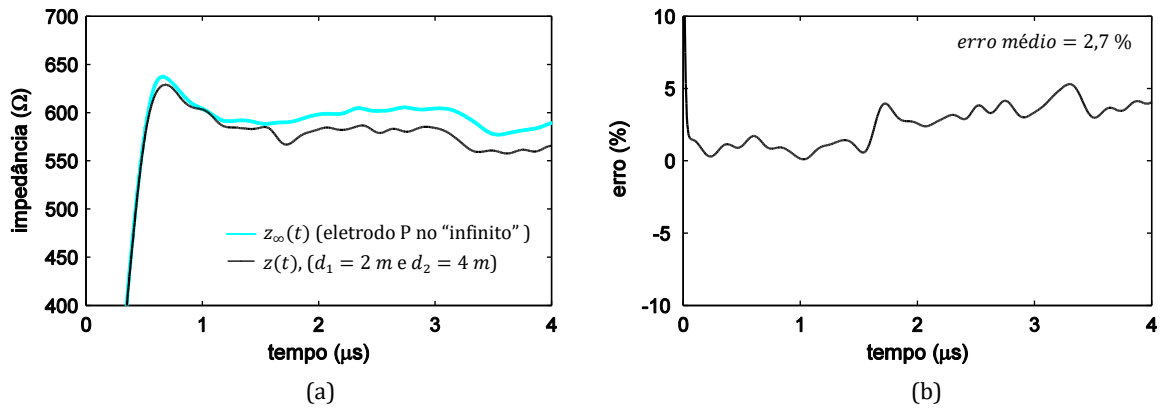


Fig. 4.25 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 14 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 m$ e $d_2 = 4 m$) e (b) erro percentual.

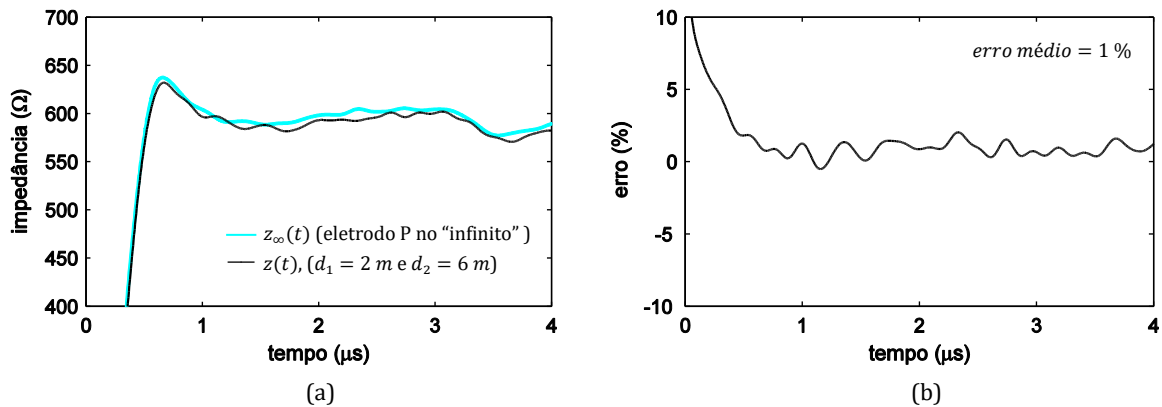


Fig. 4.26 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 14 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 m$ e $d_2 = 6 m$) e (b) erro percentual.

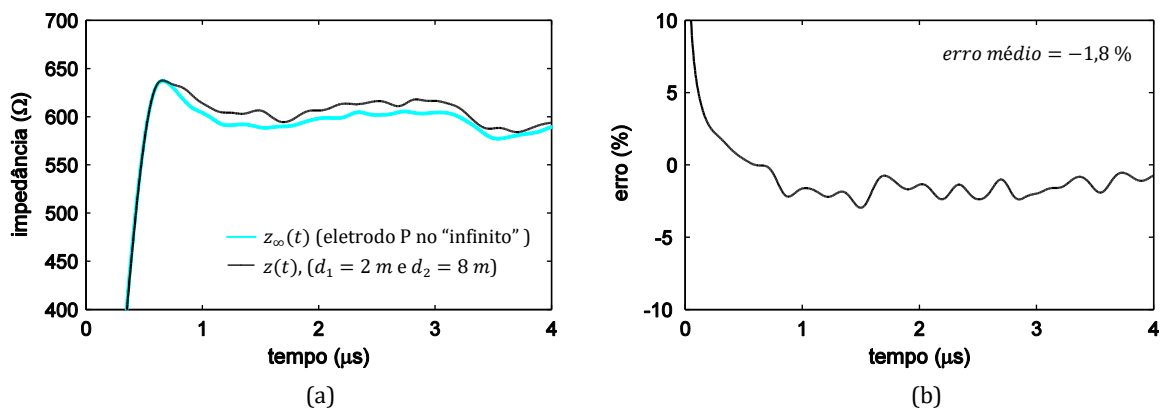


Fig. 4.27 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 14 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 m$ e $d_2 = 8 m$) e (b) erro percentual.

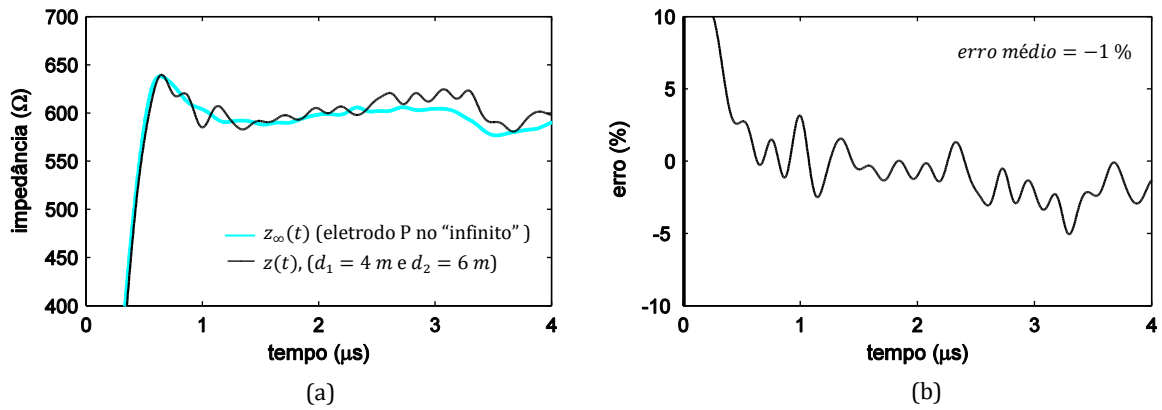


Fig. 4.28 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual.

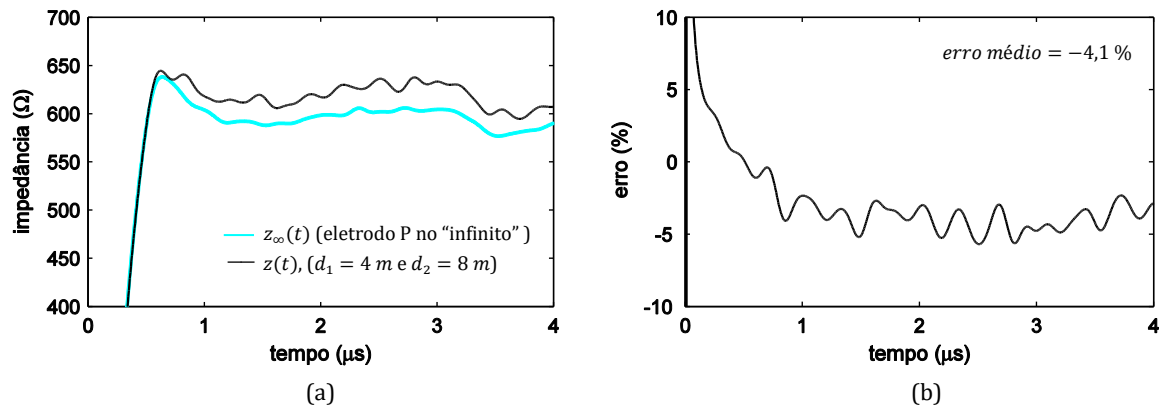


Fig. 4.29 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual.

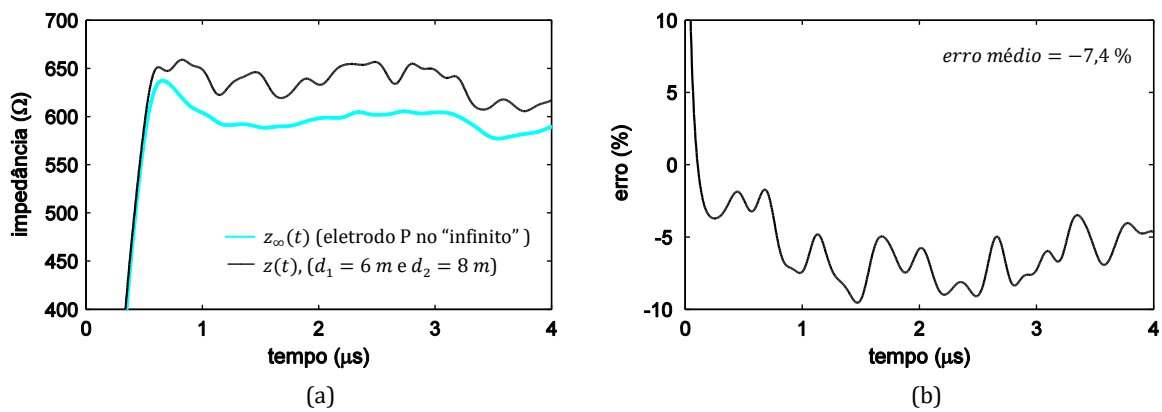


Fig. 4.30 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 14\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual.

Tabela 3 mostra o erro percentual médio existente entre a curva medida com o eletrodo de potencial no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. Os resultados mostram que, em todos os casos, o erro é sempre menor que, aproximadamente, 13 %, tal como no caso anterior.

Tabela 3 – Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (eletrodo horizontal, $\ell = 6 \text{ m}$, $r = 5 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$).

d_1 (m)	d_2 (m)	erro médio (%)
2,0	4,0	2,7
	6,0	1,0
	8,0	-1,8
4,0	6,0	-1,0
	8,0	-4,1
6,0	8,0	-7,4

Fonte: feito pelo autor.

A Fig. 4.31 mostra as curvas $z(t)$ medidas em um aterramento constituído por um eletrodo horizontal de 12 m de comprimento. Nela, como nos casos anteriores, verifica-se um aumento no valor da impedância à medida que o eletrodo P se afasta do eletrodo de aterramento, porém o aumento acontece em proporções cada vez menores. A região “distante” (d_∞) é alcançada com uma distância de 18 m do aterramento e a impedância impulsiva é de, aproximadamente, 350Ω .

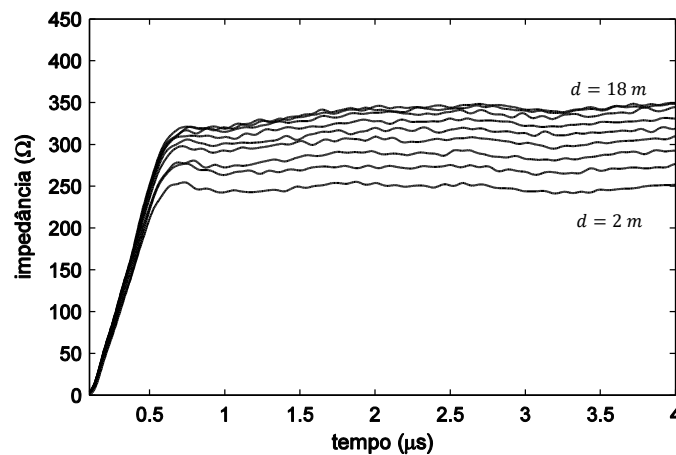


Fig. 4.31 – Conjunto de curvas de impedância. (eletrodo horizontal, $\ell = 12 \text{ m}$, $r = 5 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$)

No método do deslocamento oblíquo, a curva medida a uma distância de 18 m foi usada para expressar a impedância na região “distante”. Conseqüentemente, foi estipulada a distância máxima de 10 m ($d_n \cong d_\infty/2$) de afastamento para o eletrodo de potencial. Nas figuras a seguir, Fig. 4.32a–Fig. 4.41a e Fig. 4.32b–Fig. 4.41b, são apresentadas, respectivamente, as curvas de impedância

e os gráficos com os erros percentuais de cada caso. O erro médio foi calculado no intervalo de tempo entre $1 \mu\text{s}$ e $4 \mu\text{s}$.

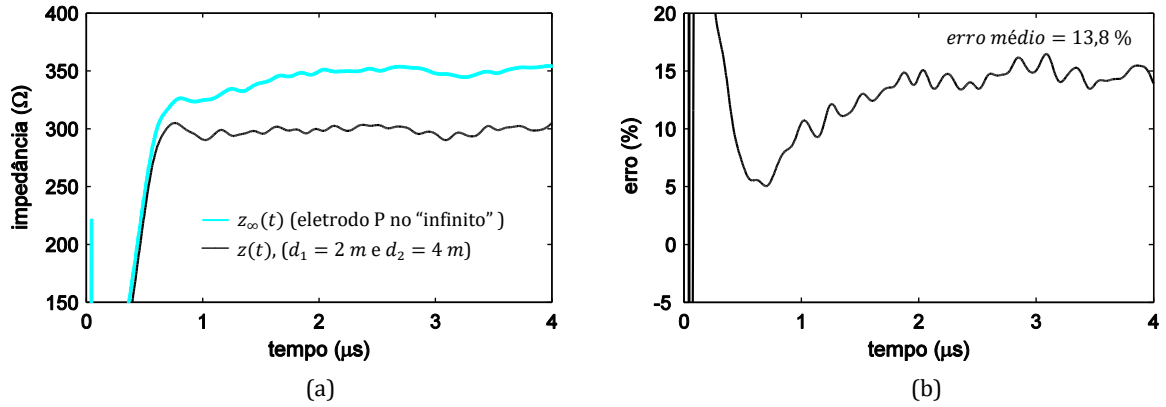


Fig. 4.32 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18 \text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 \text{ m}$ e $d_2 = 4 \text{ m}$) e (b) erro percentual.

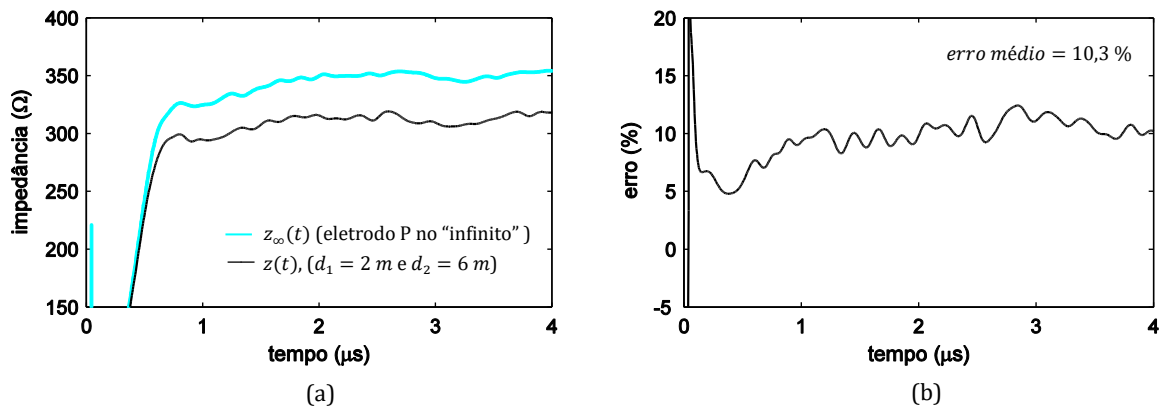


Fig. 4.33 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18 \text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 \text{ m}$ e $d_2 = 6 \text{ m}$) e (b) erro percentual.

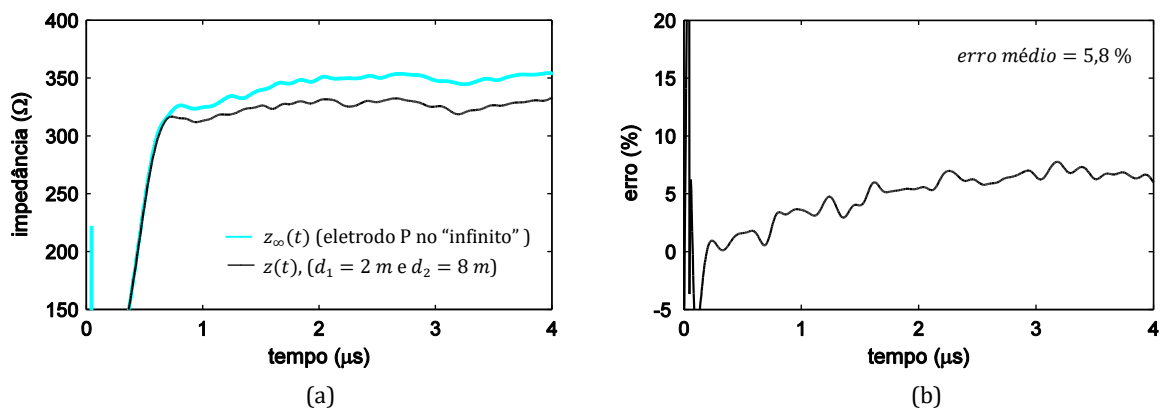


Fig. 4.34 – (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18 \text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2 \text{ m}$ e $d_2 = 8 \text{ m}$) e (b) erro percentual.

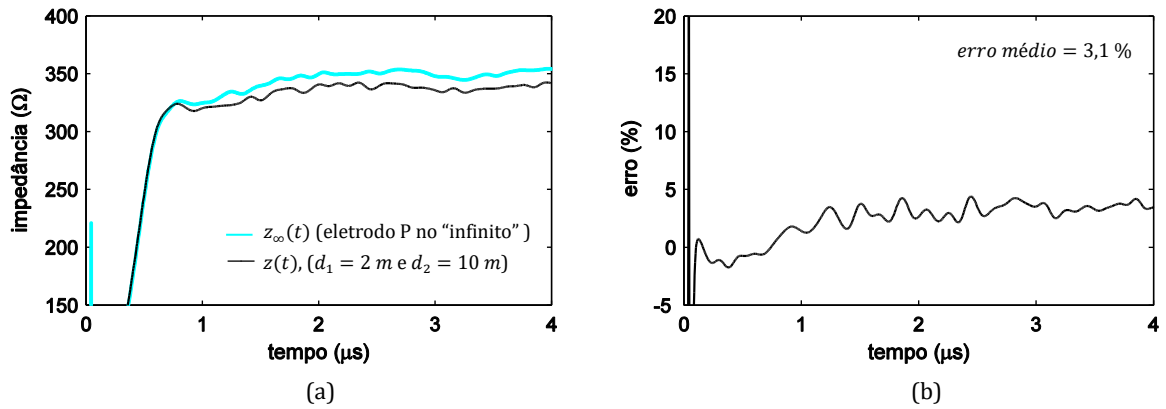


Fig. 4.35 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 2\text{ m}$ e $d_2 = 10\text{ m}$) e (b) erro percentual.

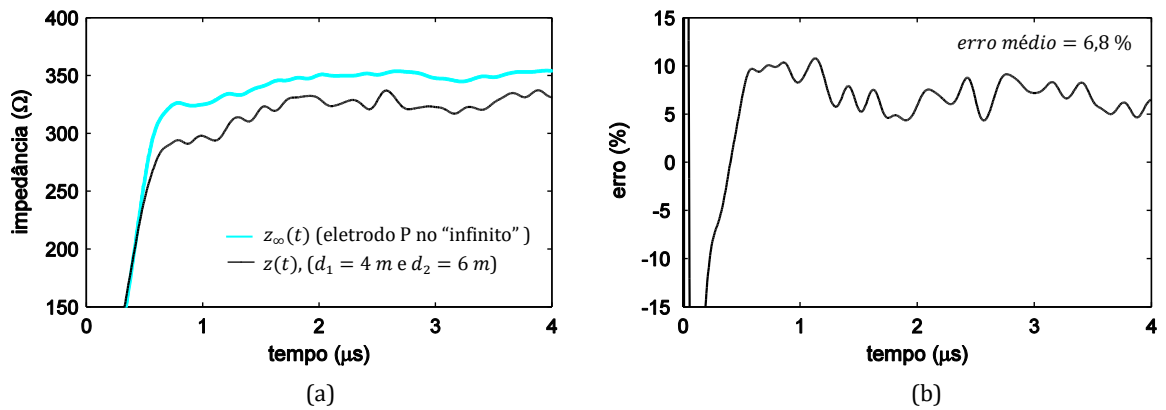


Fig. 4.36 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 6\text{ m}$) e (b) erro percentual.

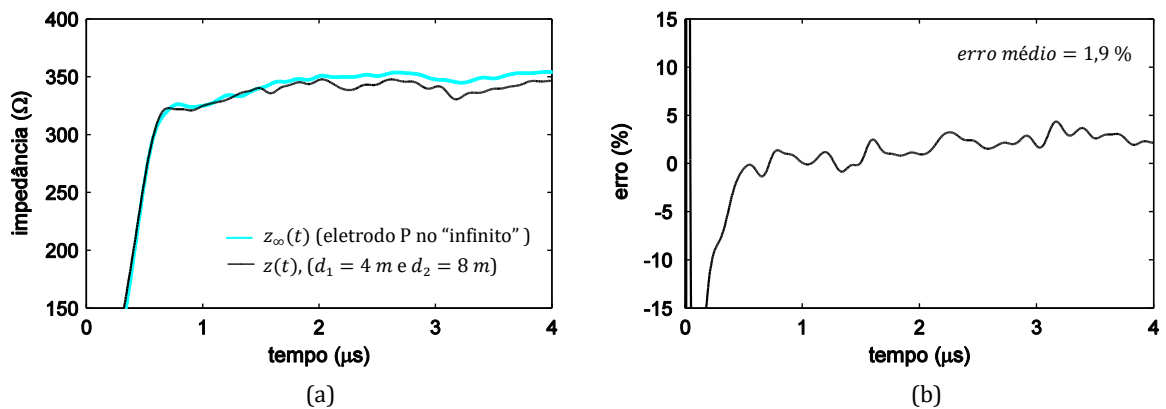


Fig. 4.37 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18\text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4\text{ m}$ e $d_2 = 8\text{ m}$) e (b) erro percentual.

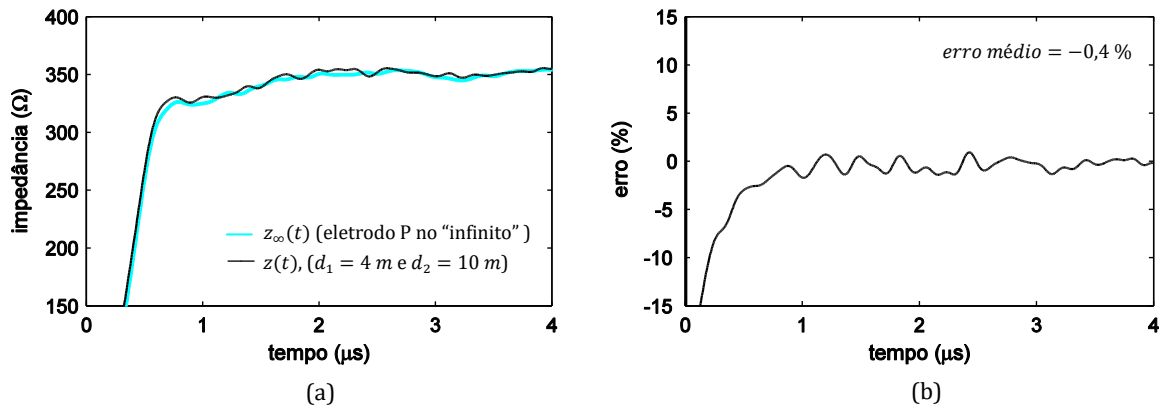


Fig. 4.38 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 4 m$ e $d_2 = 10 m$) e (b) erro percentual.

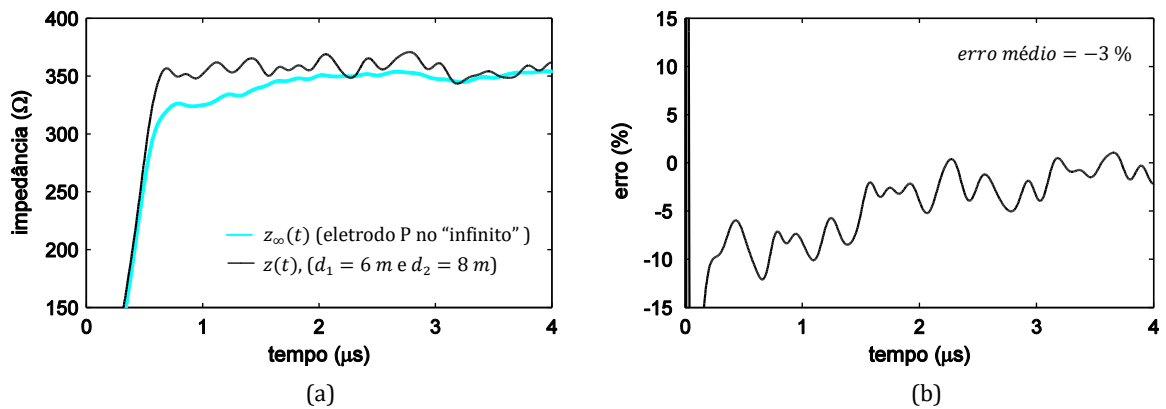


Fig. 4.39 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6 m$ e $d_2 = 8 m$) e (b) erro percentual.

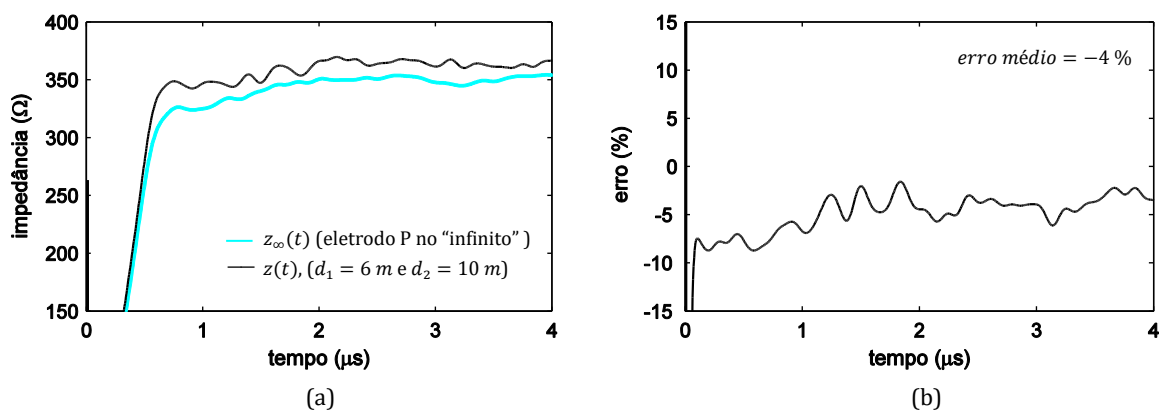


Fig. 4.40 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no "infinito" ($d_{\infty} = 18 m$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 6 m$ e $d_2 = 10 m$) e (b) erro percentual.

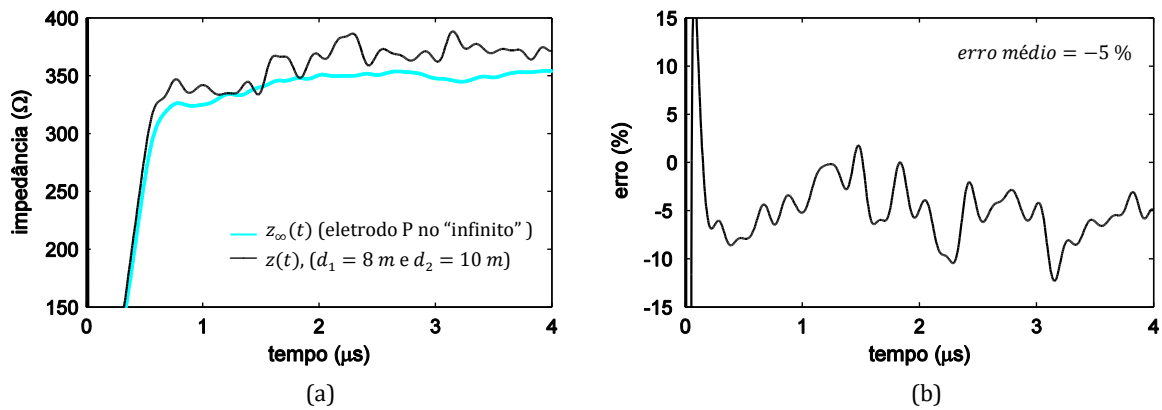


Fig. 4.41 - (a) curvas de impedâncias: medida com o eletrodo de potencial no “infinito” ($d_{\infty} = 18 \text{ m}$) e calculada com o método do deslocamento oblíquo ($d_1 = 8 \text{ m}$ e $d_2 = 10 \text{ m}$) e (b) erro percentual.

A Tabela 4 mostra o erro percentual médio existente entre a curva medida com o eletrodo de potencial no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. Os resultados mostram que o erro, nos casos avaliados, é sempre menor que, aproximadamente, 14 %.

Tabela 4 - Erro médio existente entre a curva medida no “infinito” e a curva gerada com o método do deslocamento oblíquo. (eletrodo horizontal, $\ell = 12 \text{ m}$, $r = 5 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$).

d_1 (m)	d_2 (m)	erro médio (%)
2	4	13,8
	6	10,3
	8	5,8
	10	3,1
4	6	6,8
	8	1,9
	10	-0,4
6	8	-3,0
	10	-4,0
8	10	-5,0

Fonte: feito pelo autor.

4.3 Medição da impedância de aterramento com a extremidade distante das LIAs abertas (alta impedância)

Na Fig. 4.42 é apresentado o arranjo usado para medir a impedância impulsiva com o circuito de corrente (LIA) terminado com uma alta impedância (linha aberta). Assim, a onda que chega na extremidade distante da LIA, na sua totalidade, é refletida de volta ao ponto de medição. Quando a onda refletida de corrente chega ao terminal de medição, o valor resultante começa a decair e, em certo momento, passa pelo valor zero. Conseqüentemente, a impedância assume um valor muito alto (“infinito”, para $i(t) = 0$). A impedância impulsiva, então, deve ser determinada antes deste instante de tempo. Uma avaliação das características citadas e da efetividade desse tipo de medição foi feita em aterramentos constituídos por eletrodos horizontais de 18 m e 12 m. A seguir são apresentados os resultados.

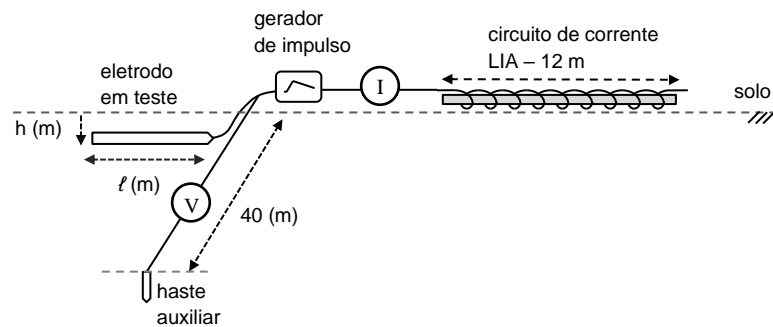


Fig. 4.42 – Arranjo usados na medição.

Na Fig. 4.43, são apresentados os resultados da medição feita em um aterramento constituído por um eletrodo horizontal de 18 m ($r = 5 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$, $\rho_e = 802 \Omega \text{ m}$). Visando uma melhor comparação dos resultados, a figura mostra simultaneamente duas curvas, sendo uma referente à medição feita com circuito de corrente aberto em sua extremidade distante e a outra referente à medição feita com o circuito terminado com uma haste de 20 cm (aterrada). Na Fig. 4.43a, verifica-se que as curvas de tensão são coincidentes, independentemente da LIA estar aterrada ou não, até o instante de tempo de $\sim 3 \mu\text{s}$. A partir desse instante a tensão aumenta para a situação em que a LIA está aterrada em sua extremidade distante e decai no caso em que a LIA não está aterrada. Características idênticas são verificadas nas curvas de corrente (Fig. 4.43b).

Analisadas à luz da teoria de Linhas de Transmissão, as curvas de tensão (Fig. 4.43a) e as de corrente (Fig. 4.43b) mostram de forma bem clara que a amplitude da onda que entra na linha (LIAs), no momento em que o impulso é aplicado, é totalmente independente das condições da “carga” em sua extremidade distante (final da linha), como esperado. Com isso, os resultados evidenciam ser possível determinar o valor da impedância impulsiva de um aterramento ainda que o circuito de corrente esteja aberto em sua extremidade distante. A condição necessária pra isso é que a “janela”

de tempo, delimitada pelo momento em que as ondas refletidas vindas da extremidade distante das LIAs chegam ao terminal de medição, seja maior que o *tempo de resposta* do solo (τ). Segundo [74], quando submetido a um sinal impulsivo o solo leva certo tempo para responder adequadamente à excitação, sendo esse tempo quantificado por:

$$\tau = \rho\varepsilon \quad (17)$$

onde, τ é o tempo mínimo necessário para que o solo apresente uma resposta adequada a excitação ou simplesmente tempo de resposta do solo, ρ a resistividade do solo e ε a permissividade elétrica do solo. Neste caso, como a resistividade do solo é de $802 \Omega\text{m}$ e, considerando que permissividade elétrica relativa seja igual a 20, o *tempo de resposta* do solo é de $\sim 142 \text{ ns}$. Como mostra a Fig. 4.43c, a curva de impedância leva aproximadamente 600 ns para entrar na região de “estabilidade”, sendo, portanto, esse tempo maior que *tempo de resposta* do aterramento. Considerando, então, a região de “estabilidade” das curvas, a impedância impulsiva do aterramento é de $\sim 70 \Omega$.

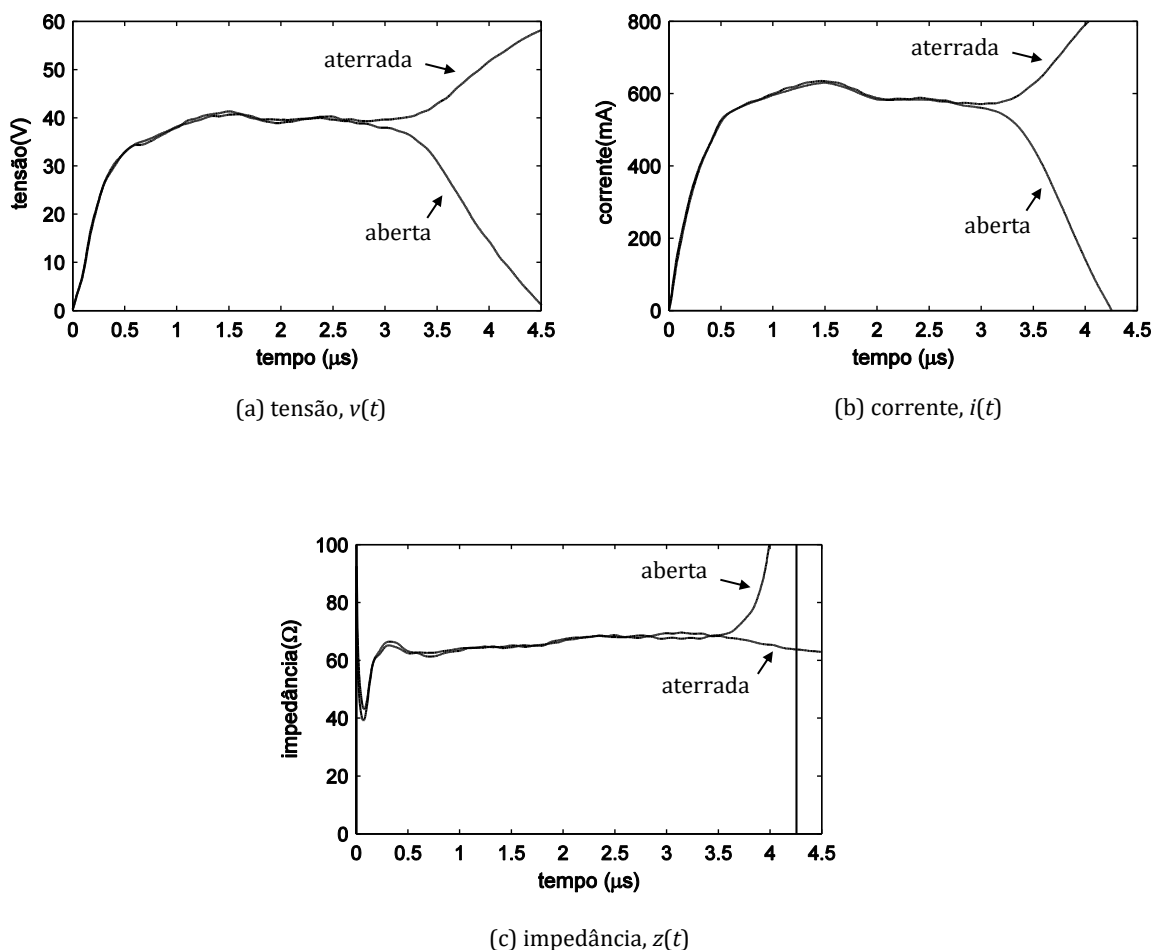


Fig. 4.43 – Resultados obtidos com o final do circuito de corrente (LIAs) aterrado (haste de 20 cm) e não aterrado (circuito aberto). Eletrodo horizontal, $\ell = 18 \text{ m}$, $r = 6,35 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$, $\rho_e = 802 \Omega\text{m}$.

Análise semelhante também foi feita em um aterramento constituído por um eletrodo de 12 m. Na Fig. 4.44 são apresentados os resultados obtidos. De modo geral, as curvas de tensão, corrente e impedância transitória mostram a existência das mesmas características verificadas no aterramento constituído por um eletrodo de 18 m, apresetado anteriormente. Mais uma vez, fica evidenciado que a amplitude inicial das ondas de tensão e de corrente não é dependente da “carga” conectada no final da linha (LIAs). A total coincidência das curvas de tensão e de corrente até o instante de tempo de $\sim 3 \mu\text{s}$ torna tal assertiva absolutamente verdadeira. Neste instante de tempo, tal como aconteceu no caso anterior, as ondas refletidas vindas da extremidade do circuito de corrente chegam ao terminal de medição. Consequentemente, o valor da impedância, para a condição de linha aberta, tende a aumentar a partir desse instante (Fig. 4.44c).

Neste aterramento, a resistividade do solo é de $730 \Omega\text{m}$. Considerando uma permissividade elétrica relativa igual a 20, o *tempo de resposta* do solo, neste caso, é de $\sim 129 \text{ ns}$. A Fig. 4.44c mostra que a impedância “estabiliza” em, aproximadamente, 500 ns , tempo esse maior que o *tempo de resposta* do aterramento. Considerando, então, a região de “estabilidade” das curvas, a impedância impulsiva do aterramento é de $\sim 100 \Omega$.

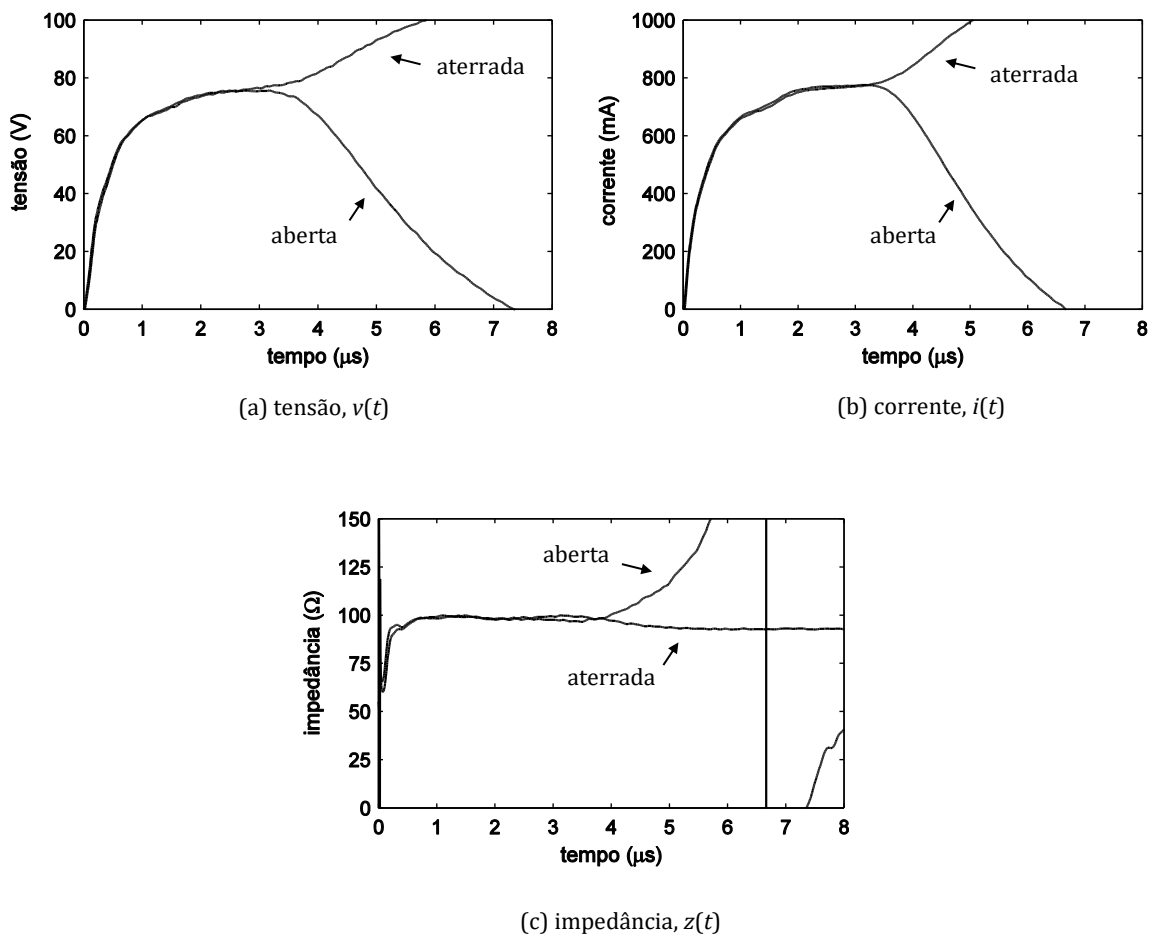


Fig. 4.44 – Resultados obtidos com o final do circuito de corrente (LIAs) aterrado (haste de 20 cm) e não aterrado (circuito aberto). Eletrodo horizontal, $\ell = 12 \text{ m}$, $r = 6,35 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$, $\rho_e = 730 \Omega\text{m}$.

4.4 Considerações finais

Neste capítulo, o *método do deslocamento oblíquo* foi usado para determinar a impedância impulsiva de um aterramento. A técnica é baseada no uso de duas curvas de impedância ($z_{d1}(t)$ e $z_{d2}(t)$) medidas a certa distância do eletrodo de aterramento (d_1 e d_2). A técnica foi aplicada em aterramentos com características distintas (eletrodos vertical e horizontal longo), conferindo-lhe maior generalidade. Os resultados mostraram a viabilidade do seu uso. Contudo, é importante ressaltar alguns aspectos de ordem prática. Nas medições de impedância, o comprimento do eletrodo de aterramento ou a sua dimensão equivalente determina a distância na qual o eletrodo de potencial é posicionado. Via de regra, quanto maior a dimensão do aterramento, maior é a distância d_∞ . Para os chamados aterramentos concentrados essa distância é relativamente pequena. Nesses casos, portanto, o *método* não se mostra verdadeiramente vantajoso, sendo desnecessário o seu uso na maioria das situações práticas. De modo contrário, o *método do deslocamento oblíquo* revela-se bastante atrativo quando as medições são feitas em aterramento com eletrodos maiores. Nos casos avaliados, aterramentos constituídos por eletrodos de 6 m e de 12 m demandaram as distâncias de, respectivamente, 14 m e 18 m para se alcançar a região “distante” (d_∞). Conseqüentemente, o circuito de tensão deve ter no mínimo esses comprimentos na medição convencional. Com o uso do *método*, o circuito de tensão ficou limitado à, aproximadamente, metade destes comprimentos ($d_\infty/2$). Entretanto, a questão de ordem prática que surge é qual seria o par de distâncias d_1 e d_2 que, de modo geral, permitiria determinar a impedância impulsiva de qualquer aterramento. Os resultados mostraram que para aterramentos concentrados constituídos por hastes, é possível fixar a distância d_1 em 0,6 m ou em 0,9 m e usar, para d_2 , qualquer distância entre 1,2 m e 2 m para se ter erros menores que 4 %. Para os aterramentos constituídos por eletrodos horizontais de 6 m, sugere-se fixar a distância d_1 em 2 m ou 4 m, com d_2 assumindo valores que podem variar entre 4 m e 8 m para erros menores que 5 %. No caso do aterramento constituído por um eletrodo de 12 m, assumindo valores entre 4 m e 6 m para d_1 e variando a distância d_2 entre 8 m e 10 m, o erro é menor que 4 %. Entretanto, do ponto vista prático, a observação de maior relevância talvez seja o fato de que, independentemente dos valores considerados para d_1 e d_2 , o uso do método do deslocamento oblíquo produziu erros sempre menores que 14 %. É importante ressaltar, contudo, que o principal objetivo desta tese é apresentar as Linhas Infinitas Artificiais (LIAs) como alternativa ao uso de cabos simples nos circuitos de corrente, normalmente muito longos. Assim, julga-se necessário ampliar o estudo desta técnica, sobretudo ampliando-se o número de medições e as dimensões dos eletrodos. Neste trabalho, entretanto, fica evidente a viabilidade e a potencialidade do *método*.

Em outra técnica de medição avaliada neste capítulo, a impedância impulsiva de aterramentos constituídos por eletrodos horizontais de 12 m e 18 m foi determinada com o circuito de corrente (LIAs) aberto em sua extremidade distante. Os resultados mostraram que não existe nenhuma relação entre a amplitude da onda que inicialmente entra no circuito de corrente (LIAs) com o fato

desse circuito estar ou não aterrado em sua extremidade distante. Essa independência é confirmada pela total coincidência existente nas curvas de tensão e de corrente obtidas com a extremidade distante aterrada e não aterrada (linha aberta). Fica evidente, portanto, a possibilidade de se determinar o valor da impedância impulsiva ainda que o circuito de corrente esteja aberto em sua extremidade distante. Deve-se ficar atento, contudo, ao tempo de resposta do solo. Assim, com a devida atenção a tais aspectos, esta técnica mostra-se particularmente atrativa nas situações em que a disponibilidade de terra para cravar a haste auxiliar de corrente é restrita ou inexistente.

5 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO USANDO ONDA IMPULSIVA E A LIA NO CIRCUITO DE CORRENTE

5.1 Introdução

A resistência de aterramento é um importante parâmetro relacionado à proteção de sistemas. A determinação desse parâmetro é feita por meio de medição, sendo o Método da Queda de Potencial um procedimento amplamente utilizado neste caso. Disso decorrem, dentre outros, dois aspectos: *i)* o comprimento do fio usado no circuito de corrente pode ser bem longo, e normalmente é, dependendo das dimensões do aterramento; *ii)* os equipamentos de medição usam um sinal alternado de baixa frequência para determinar o valor da resistência. É importante ressaltar, contudo, que essa frequência não é normatizada, variando de acordo com os critérios de projeto adotados por cada fabricante. Neste capítulo são apresentados os resultados de um estudo onde a *resistência* de aterramento é determinada a partir do mesmo arranjo usado, no capítulo anterior, para medir a *impedância*. Conseqüentemente, o sinal é impulsivo e o circuito de corrente é relativamente pequeno.

5.2 Resistência de aterramento obtida com um terrômetro

Atualmente, muitos dos equipamentos usados em medições de resistência de aterramento são dotados de sistemas eletrônicos bastante sofisticados. Alguns destes equipamentos já fornecem diretamente o valor em um *display*. No estudo feito neste capítulo, foi usado o terrômetro digital de uma empresa nacional de boa reputação. Contudo, sua marca/modelo será omitida neste trabalho por não ter sido conseguido junto à empresa uma autorização expressa de citação. O equipamento, segundo o manual do fabricante, conta com um elaborado sistema de filtros ativos e passivos, conferindo-lhe boa imunidade a possíveis sinais espúrios presentes no local de medição. Ainda segundo o manual, sempre que a resistência de aterramento for menor que 1 k Ω o erro associado à medição é menor que 5 %. Antes dos experimentos terem início, foi feita uma verificação da calibração do equipamento, sendo usado para isso um resistor de 100 Ω (± 5 %). Seguindo as instruções do manual, o equipamento mediu o valor de 103,0 Ω . Adicionalmente, também foram usados dois multímetros na medição, ambos medindo o mesmo valor de 99,7 Ω . Os resultados indicam, portanto, que o equipamento não apresenta problemas de calibração. Ainda nesta etapa inicial de verificações e ajustes, uma ocorrência chamou a atenção. Quando o botão que dá início à medição era pressionado, levava certo tempo para que o valor apresentado no *display* estabilizasse. Assim, algumas verificações adicionais foram feitas.

Numa análise feita ainda em caráter preliminar, verificou-se que o terrômetro opera como uma fonte de corrente. A constância no valor corrente ($\sim 7,5$ mA) independentemente da carga a que fica submetido mostrou isso. É de se esperar, portanto, que exista um intervalo de tempo necessário para

que o sistema de controle do equipamento possa fazer os ajustes necessários à estabilidade de corrente. Medições feitas com resistores de diversos valores mostraram que o equipamento leva, aproximadamente, 75 ms até que a estabilidade seja alcançada, como mostra a Fig. 5.1. Nessa figura são apresentadas as medições de tensão (canal 1) e de corrente (canal 2). A estabilidade do valor apresentado no *display*, contudo, leva um tempo um pouco maior (3-5 s).

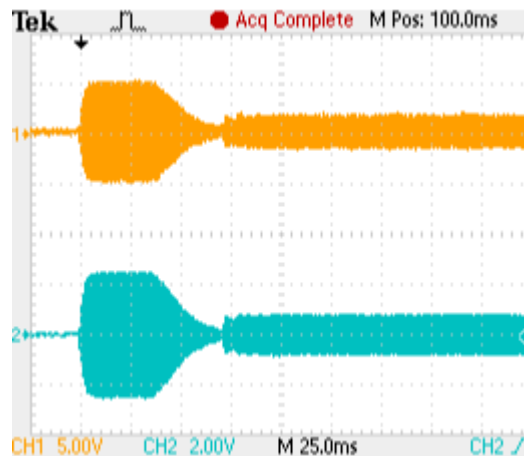


Fig. 5.1 – Instantes iniciais que precedem a estabilidade da corrente gerada pelo terrômetro.

Na etapa seguinte, as medições passaram a ser feitas em aterramentos constituídos por eletrodos vertical e horizontal. Neste ambiente, o equipamento levou um tempo ainda maior para estabilizar e apresentar um valor fixo no *display*. Foi feita, então, uma nova verificação do tempo que a corrente estava levando para estabilizar. Os oscilogramas, semelhantes ao apresentado Fig. 5.1, mais uma vez indicaram um tempo aproximado de 75 ms. Contudo, o tempo necessário para o valor apresentado no *display* estabilizar foi um pouco maior que no caso dos resistores (de 5 a 8 s). Houve também situações em que o valor ficou oscilando numa faixa de valores não muito ampla, mas que obrigam o operador a tomar uma decisão e escolher um dos valores apresentados. O relato de um profissional que trabalha com medições de aterramento veio de encontro a tais achados. Segundo o profissional, essa é uma condição comum, independentemente da marca/modelo do equipamento. Disto decorrem algumas considerações importantes: *i)* se os valores apresentam oscilações, a medição feita com um terrômetro pressupõe a existência de uma faixa de valores representativos para a resistência, ainda que não muito ampla. *ii)* ainda que o valor apresentado seja fixo, leva certo tempo para que a estabilidade seja alcançada. Neste caso, fica a dúvida se realmente houve a estabilidade do sistema ou se o equipamento, em nível de *hardware* e/ou *software*, adota algum critério para que o valor apresentado seja constante. Qualquer que seja o caso, as respostas para tais questões somente seriam possíveis com a colaboração direta dos projetistas dos equipamentos. Obviamente, por questões de segredo comercial/industrial essas respostas dificilmente são

conseguidas. Diante disso, fez-se necessário desenvolver um estudo das características básicas dos sinais elétricos existentes em uma medição feita com o terrômetro.

5.2.1 Características elétricas básicas dos sinais usados pelo terrômetro e o cálculo da resistência

O procedimento mais amplamente usado em medições da resistência de aterramento é o Método da Queda de Potencial. A técnica usada no processamento dos sinais elétricos e os critérios adotados no cálculo da resistência, contudo, são informações que dificilmente são conseguidas junto aos fabricantes de equipamentos de medição de resistência. Para contornar essa situação, foi feito um estudo das características elétricas do sinal gerado pelo terrômetro usado neste trabalho a fim de se determinar um critério de similaridade que fosse representativo para o valor apresentado no *display* do equipamento. Foi, então, elaborado um arranjo onde fosse possível se obter com um osciloscópio as ondas de tensão e de corrente geradas durante as medições.

Inicialmente, foi montado em um *protoboard* um circuito constituído por dois resistores em série, ambos de 100Ω ($\pm 5\%$). O terrômetro mediu o valor de $199,5 \Omega$ para o arranjo e dois multímetros diferentes mediram o valor de $194,7 \Omega$. O registro dos sinais de tensão e de corrente foi feito com um osciloscópio Tektronix TDS 2012C e pontas de prova Tektronix TPP0201-10X ($10 \text{ M}\Omega$, 12 pF). Antes de dar início às medições, as pontas de prova também foram calibradas. A Fig. 5.2 mostra as curvas obtidas. A corrente foi calculada pela relação entre a tensão medida sobre um dos resistores e o seu valor nominal, 100Ω (Fig. 5.2b). O registro dos dados mostrou que o gerador opera com uma onda quadrada simétrica na frequência $1,5 \text{ kHz}$. Assim, a cada $333 \mu\text{s}$ há uma inversão na polaridade do sinal. Já o tempo de subida/descida da onda é de, aproximadamente, $50 \mu\text{s}$. Neste caso, cada um dos semiciclos pode ser analisado como se um degrau de tensão ou de corrente tivesse sido aplicado no aterramento. Os resultados mostram que a onda de tensão apresenta boa simetria, alternando entre os valores aproximados de $\pm 1,5 \text{ V}$. Já a corrente apresenta uma tendência ligeiramente diferente. O valor positivo em todos os ciclos foi de, aproximadamente, $7,3 \text{ mA}$ e o valor negativo de, aproximadamente, -8 mA . Consequentemente, o valor da resistência definida pela relação tensão/corrente não é o mesmo para os semiciclos positivo e negativo, como mostra a Fig. 5.3. Na comparação com o valor apresentado no *display* do equipamento ($199,5 \Omega$), a diferença é de $1,75\%$ para o semiciclo positivo e de $-8,27\%$ para o semiciclo negativo. Foi feito, também, o cálculo da resistência baseado nos valores eficazes da tensão ($1,36 \text{ V}$) e da corrente ($7,03 \text{ mA}$). Neste caso, o valor calculado é de $193,5 \Omega$, sendo o desvio, em relação ao valor apresentado no *display*, de $-3,0\%$. Portanto, neste ensaio o uso do semiciclo positivo levou a maior proximidade de resultados. Deve-se observar, contudo, que qualquer que seja o caso a diferença percentual é sempre menor que 10% .

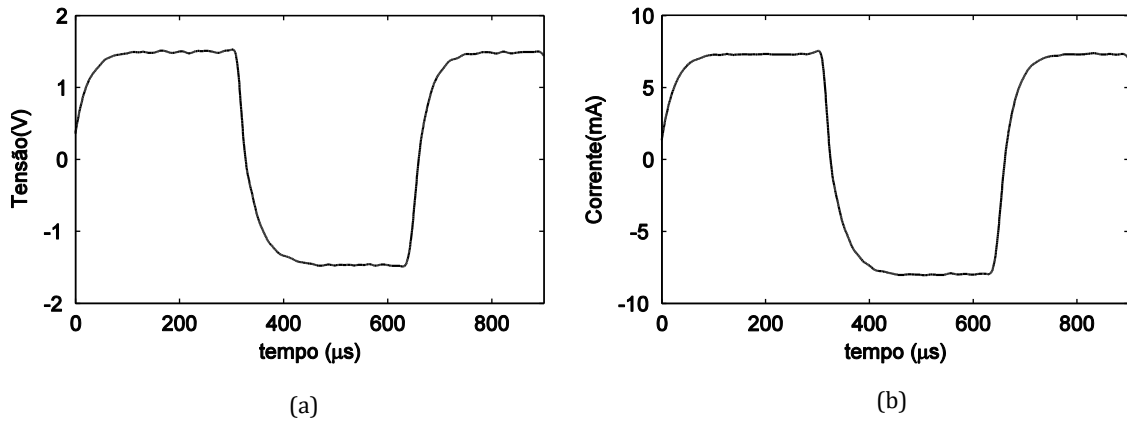


Fig. 5.2 – Curvas das ondas de tensão e de corrente gerados pelo terrômetro.

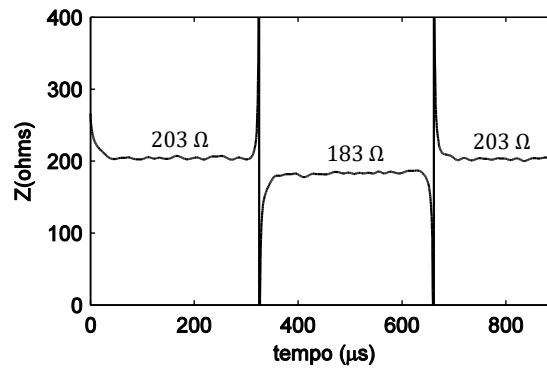


Fig. 5.3 – Resistência definida pela relação entre curvas tensão-corrente apresentadas na Fig. 5.2.

Numa etapa seguinte as medições foram feitas em aterramentos. A Fig. 5.4 mostra o arranjo usado. Nela verifica-se que em um canal do osciloscópio está a tensão do aterramento e no outro a tensão sobre um resistor. A tensão sobre o resistor foi usada apenas para determinar a corrente do circuito.

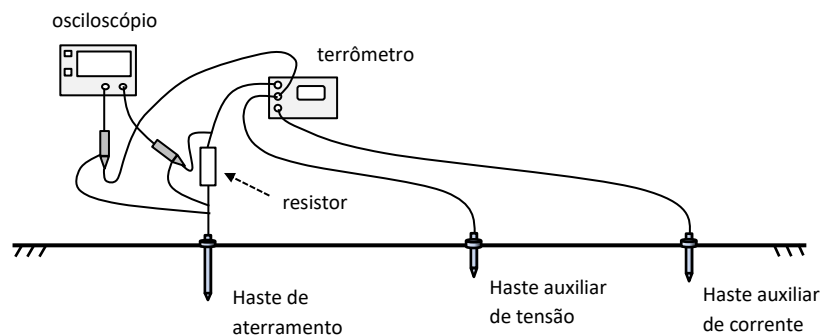


Fig. 5.4 – Arranjo usado na medição da resistência de aterramento.

Na Fig. 5.5a e na Fig. 5.5b são apresentadas as curvas de tensão e de corrente obtidas em um aterramento constituído por um eletrodo vertical ($\ell = 2,1 \text{ m}$, $r = 6,35 \text{ mm}$, $\rho = 1.341 \Omega\text{m}$). A Fig. 5.5 mostra a resistência $R(t)$ calculada a partir dessas grandezas. Nesta medição o valor da resistência fornecida pelo equipamento, R_t , foi de 629Ω . A partir das figuras, algumas características podem ser destacadas: *i*) Na região de estabilidade, logo após o transitório de crescimento, a curva de tensão torna-se aproximadamente constante ao passo que a curva de corrente apresenta certo decaimento. Apesar de pequeno, esse decaimento faz com que a resistência, $R(t)$, em cada um dos semiciclos, apresente certa variação de valores na região de estabilidade; *ii*) No semiciclo positivo ($0 \leq t \leq 333 \mu\text{s}$) a variação é de 56Ω (8,5 %) e no semiciclo negativo ($333 \mu\text{s} \leq t \leq 666 \mu\text{s}$) a variação é um pouco menor, sendo de 26Ω (5,3 %); *iii*) Em relação ao valor apresentado no *display* do equipamento ($R_t = 629 \Omega$), as diferenças percentuais, considerando o valor médio (R_m), são de 9,5 % para o semiciclo positivo e de -19,7 % para o semiciclo negativo. Considerando os valores eficazes da tensão (4,45 V) e da corrente (7,53 mA), a resistência é de 591Ω . Neste caso, a diferença percentual em relação ao valor apresentado no *display* de -6 %.

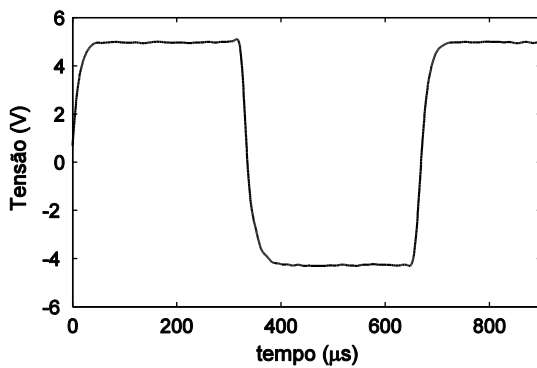
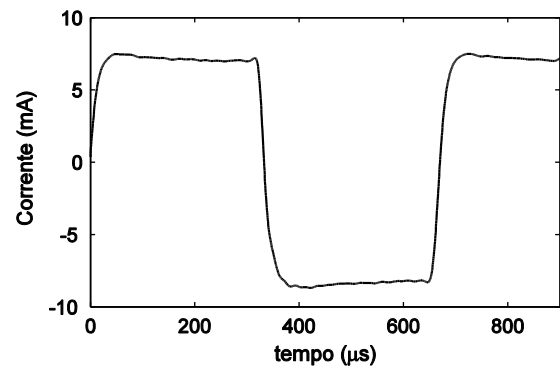
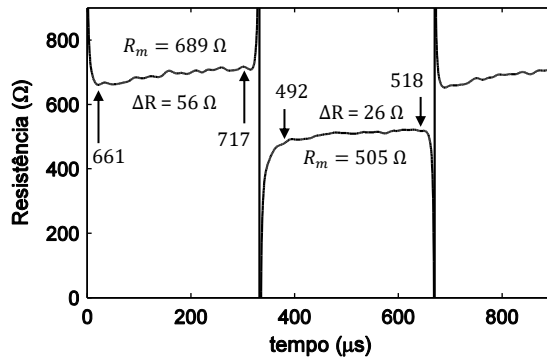
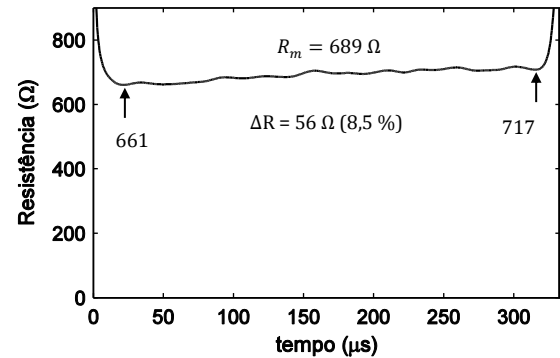
(a) tensão $v(t)$ (b) corrente $i(t)$ (c) resistência, $R(t)$ (d) resistência, $R(t)$, $0 \leq t \leq 330 \mu\text{s}$

Fig. 5.5 – Curvas obtidas na medição da resistência de aterramento. Eletrodo vertical, $\ell = 2,1 \text{ m}$, $r = 6,25 \text{ mm}$, $\rho = 1.341 \Omega\cdot\text{m}$, $R_t = 629 \Omega$.

Características semelhantes foram verificadas em uma medição feita em um aterramento similar ao apresentado a cima (haste, $\ell = 2,1$ m, $r = 6,25$ mm). A localização do aterramento, contudo, foi outra (solo diferente, $\rho = 2.150 \Omega\text{m}$). A Fig. 5.6 mostra a curva da resistência obtida, onde fica evidente, mais uma vez, a existência de certa variação ΔR tanto no semiciclo positivo como no negativo. O valor R_t apresentado pelo equipamento foi de 1.008Ω . A diferença percentual em relação a esse valor é de $5,9\%$ para o semiciclo positivo e de $-12,7\%$ para o semiciclo negativo, considerando o valor médio dos semiciclos. Já o valor da resistência baseado nos valores eficazes da tensão (7 V) e da corrente ($7,1$ mA) é de 986Ω . Neste caso, a diferença percentual em relação ao valor apresentado no *display* é de $-2,2\%$.

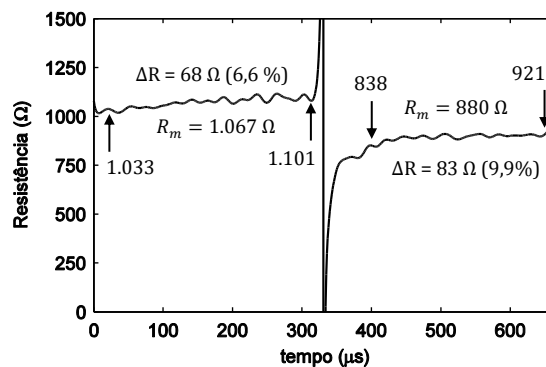


Fig. 5.6 – Curvas obtidas na medição de resistência de aterramento. Eletrodo vertical, $\ell = 2,1$ m, $r = 6,25$ mm, $\rho = 2.150 \Omega\text{-m}$, $R_t = 1.008 \Omega$.

Na Fig. 5.7 é apresentada a curva $R(t)$ obtida para um aterramento constituído por um eletrodo horizontal ($\ell = 6$ m, $r = 5$ mm, $\rho = 1.188 \Omega\text{m}$). O equipamento, neste caso, apresentou o valor de 282Ω em seu *display*. Em relação a esse valor, as diferenças são de $1,4\%$ e $-7,8\%$, considerando os valores médios dos semiciclos positivo e negativo, respectivamente. O valor da resistência calculada a partir dos valores eficazes da tensão (2 V) e da corrente ($7,37$ mA) é de $271,2 \Omega$. Neste caso a diferença é de $3,8\%$.

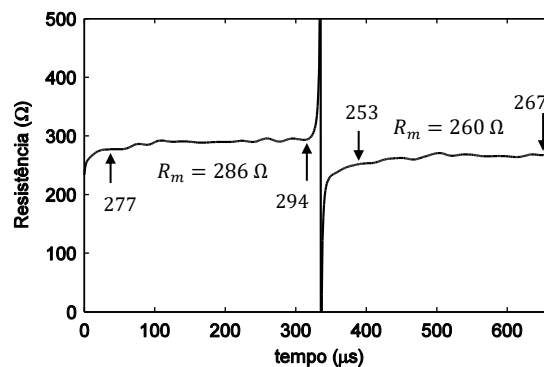


Fig. 5.7 – Curvas obtidas na medição de resistência de aterramento. Eletrodo horizontal, $\ell = 6$ m, $r = 5$ mm, $\rho = 1.188 \Omega\text{-m}$, $R_t = 282 \Omega$

5.2.2 Análise dos resultados

Os resultados mostraram que o equipamento usado nas medições usa um sinal de tensão alternada (onda quadrada simétrica com tempo de subida e descida de, aproximadamente, $50 \mu\text{s}$), de amplitude variável e na frequência de 1,5 kHz. Assim, cada um dos semiciclos dura $\sim 333 \mu\text{s}$. Nesse intervalo de tempo a amplitude da tensão não apresenta variação significativa ($\sim V_{dc}$), de forma que, para cada semiciclo, o que se tem é um degrau de tensão sendo aplicado no aterramento. Assim, a resistência de aterramento poderia ser definida pela relação entre essa tensão e a corrente. Baseado nesse critério e tendo os valores apresentados no *display* do equipamento (R_t) como referência, as diferenças percentuais variaram entre 1,4 % e 9,5 %, para o semiciclo positivo, e entre -19,7 % e -7,8 %, para o semiciclo negativo. Também foi feita uma verificação da representatividade dos cálculos feitos a partir dos valores eficazes da tensão e da corrente. Neste caso, a diferença variou entre -6 % e 3,8 %.

As diferenças mostram que aquilo que é apresentado no *display* do equipamento é baseado em critérios específicos adotados pelo fabricante. Esses critérios, claro, expressam aquilo que o fabricante, de forma particular, acredita ser o melhor para determinar a resistência de aterramento. Obviamente, esta é uma condição implícita quando se adquire um equipamento de medição, qualquer que seja a sua marca. Com isso, considerando que cada fabricante tem seus critérios específicos de projeto, é de se esperar que equipamentos distintos apresentem valores de resistência diferentes para medições feitas em um mesmo aterramento. Já a universalidade dos princípios físicos que regem a determinação da resistência não pode ser alterada, sendo, portanto, única para todos. Assim, o correto valor da resistência de um aterramento deve ser balizado por tais princípios e não por um equipamento específico, qualquer que seja ele. Os equipamentos de medição, portanto, não expressam a verdade única e absoluta para o valor da resistência, mas sim algo apenas aproximado. Considerando, ainda, os procedimentos práticos de execução operacional realizados durante as medições, fica evidente que a precisão representada por um valor único deve ser usada apenas como uma referência. Portanto, parece ser razoável e inevitável que a precisão dos resultados, sobretudo nas situações em que as medições são feitas em campo, venha acompanhada de certa variabilidade.

5.3 Medição da resistência de aterramento usando uma onda impulsiva

Na medição da resistência de aterramento, usando uma onda impulsiva, é importante que os circuitos de tensão e de corrente fiquem dispostos de forma que o acoplamento mútuo seja evitado ou minimizado. Assim, o arranjo é o mesmo usado na medição da impedância de aterramento, como mostra a Fig. 5.8.

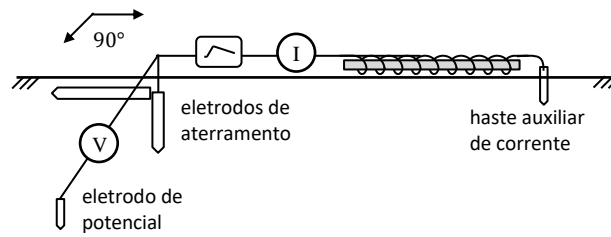


Fig. 5.8 – Arranjo para medição da resistência de aterramento.

Na seção anterior foi mostrado que o terrômetro opera com uma onda quadrada simétrica que leva, aproximadamente, $50 \mu\text{s}$ para chegar ao seu valor máximo (ou mínimo). Após esse transitório de crescimento a tensão praticamente não varia até que a polaridade do sinal é invertida. Essa alternância acontece a cada $333 \mu\text{s}$. Com tais características, em cada semiciclo as análises podem ser feitas como se um degrau de tensão fosse aplicado ao aterramento. A onda impulsiva usada para determinar a resistência de aterramento também apresenta características que a assemelha a um degrau, porém com o tempo de subida de $\sim 1,5 \mu\text{s}$ e o tempo de cauda de $\sim 500 \mu\text{s}$. A Fig. 5.9a mostra essa onda no intervalo de tempo de $10 \mu\text{s}$ e a Fig. 5.9b em um intervalo de $50 \mu\text{s}$.

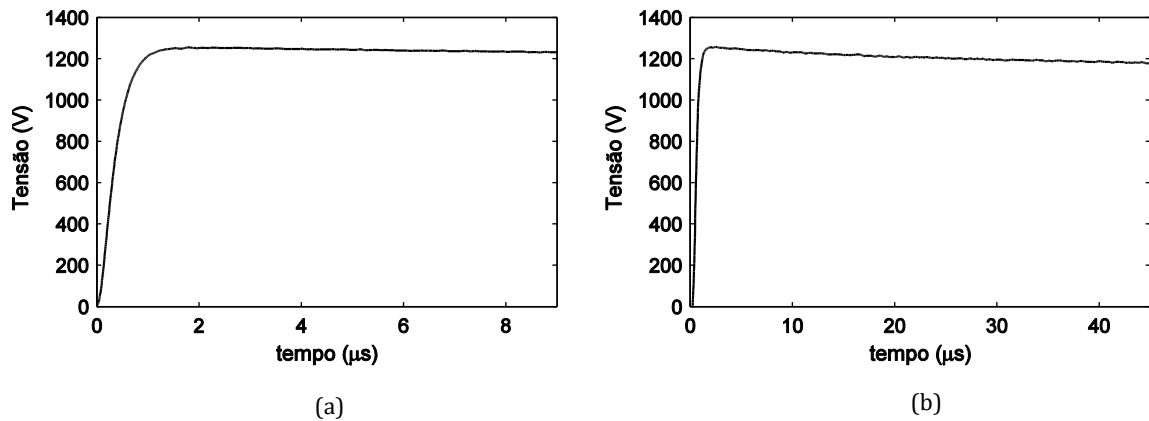
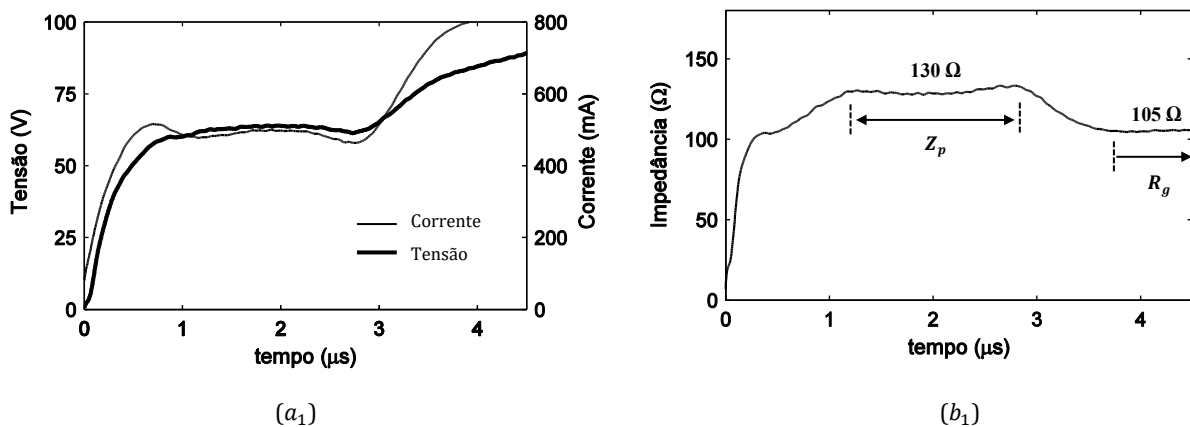
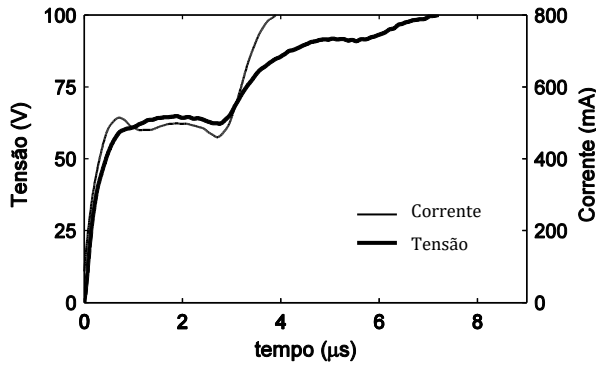


Fig. 5.9 – Formas de onda de tensão (a) base de tempo de $10 \mu\text{s}$ e (b) base de tempo de $50 \mu\text{s}$.

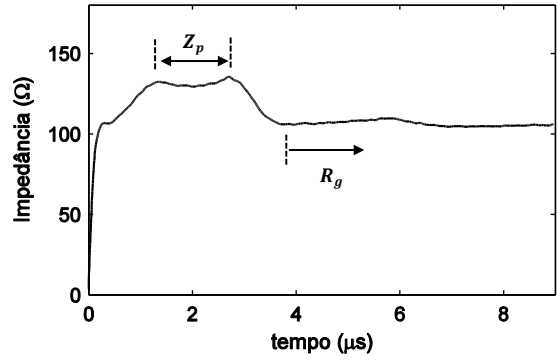
Apesar do sinal usado nas medições a seguir ser aproximadamente um degrau de tensão, tal como o sinal usado pelo terrômetro, existe uma diferença fundamental que é importante ser pontuada. O degrau do terrômetro leva $\sim 50 \mu\text{s}$ para atingir o valor máximo (degrau com subida lenta). Uma verificação simples, usando a função FFT (Transformada Rápida de Fourier) do próprio osciloscópio, deixou claro que, além da frequência fundamental ($1,5 \text{ kHz}$), nesse sinal também existem componentes de frequência que chegam a $\sim 50 \text{ kHz}$. Para essa faixa de frequências o solo ainda apresenta, aproximadamente, uma resposta com características apenas resistivas [70]. Já o degrau do gerador impulsivo (degrau com crescimento rápido) apresenta uma faixa de frequências

bem maior, chegando à 1,5 MHz. Conseqüentemente, as reatâncias associadas à resposta do solo passam a ser expressivas e são detectadas durante a medição. Contudo, passado o transitório rápido de crescimento, o sinal torna-se aproximadamente constante ($\sim V_{dc}$), de modo que nessa região as características reativas se tornam menos importantes. É, portanto, nessa região que a resistência é determinada. Na Fig. 5.10 são apresentados os resultados de uma medição feita em um aterramento constituído por eletrodo horizontal ($\ell = 18\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$). A resistividade do solo é de $1.113\ \Omega\text{m}$ e a resistência medida com o terrômetro foi de $112\ \Omega$. Nesta figura, todas as curvas são relativas a uma mesma medição. O que muda é a janela de tempo de visualização. A intenção, neste caso, é mostrar de forma bem clara que na curva $z(t)$ existem duas regiões distintas, estando uma relacionada à impedância de aterramento e a outra à resistência. Na Fig. 5.10a₁, a janela de tempo é de $5\ \mu\text{s}$. Nela, como visto no capítulo anterior, a impedância é determinada antes das ondas refletidas vindas da extremidade distante da LIA chegarem ao ponto de medição. As curvas de tensão e de corrente mostram que isso acontece, aproximadamente, no instante $t = 3\ \mu\text{s}$. A Fig. 5.10a₂ mostra que a impedância para esse aterramento é de $130\ \Omega$, sendo determinada no intervalo $1\ \mu\text{s} \leq t \leq 3\ \mu\text{s}$. Mostra, também, que a partir do instante $t \cong 4\ \mu\text{s}$ a curva $z(t)$ assume um novo patamar de estabilidade no valor de $\sim 105\ \Omega$ e que esse patamar é mantido independentemente das reflexões chegarem ao ponto de medição sucessivamente a cada $\sim 3\ \mu\text{s}$. As reflexões vindas da extremidade distante das LIAs somente deixam de ser significativas a partir do instante $t \cong 10\ \mu\text{s}$, entretanto, a relação tensão/corrente ainda assim é mantida no patamar de $105\ \Omega$. Comparado ao valor medido com o terrômetro ($112\ \Omega$) a diferença é de $-6,3\%$, indicando que esse patamar certamente é representativo para a resistência de aterramento. De modo geral, então, a impedância é determinada no intervalo de tempo que precede a primeira chegada das ondas refletidas de tensão e de corrente ao ponto de medição. A partir desse instante, a curva $z(t)$ tende a expressar a resistência de aterramento.

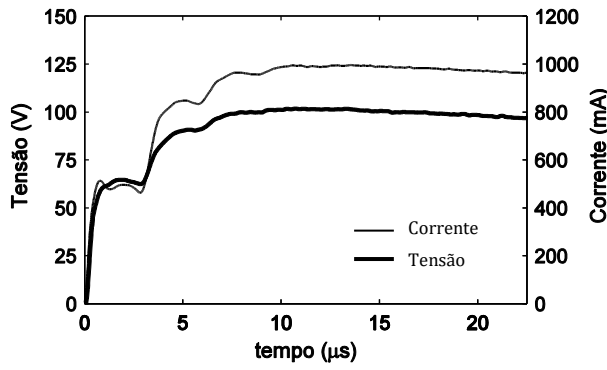




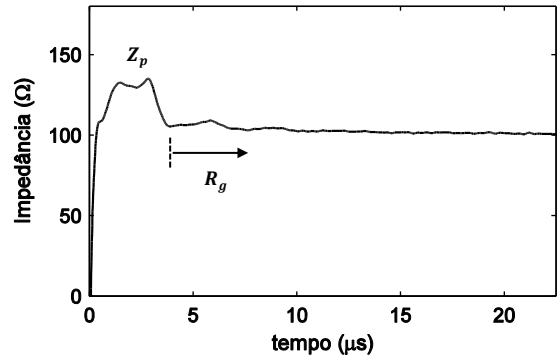
(a₂)



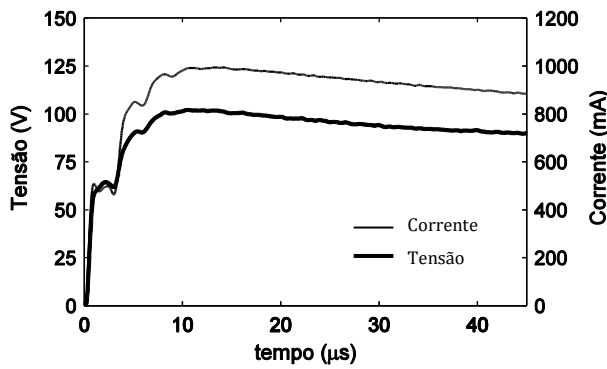
(b₂)



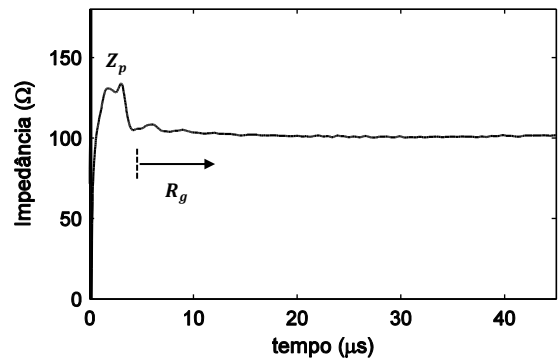
(a₃)



(b₃)



(a₄)



(b₄)

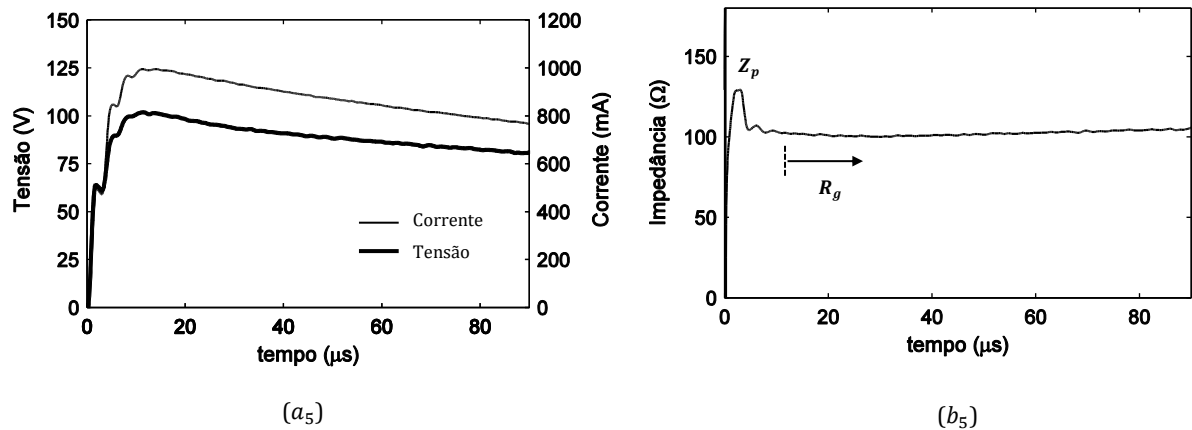
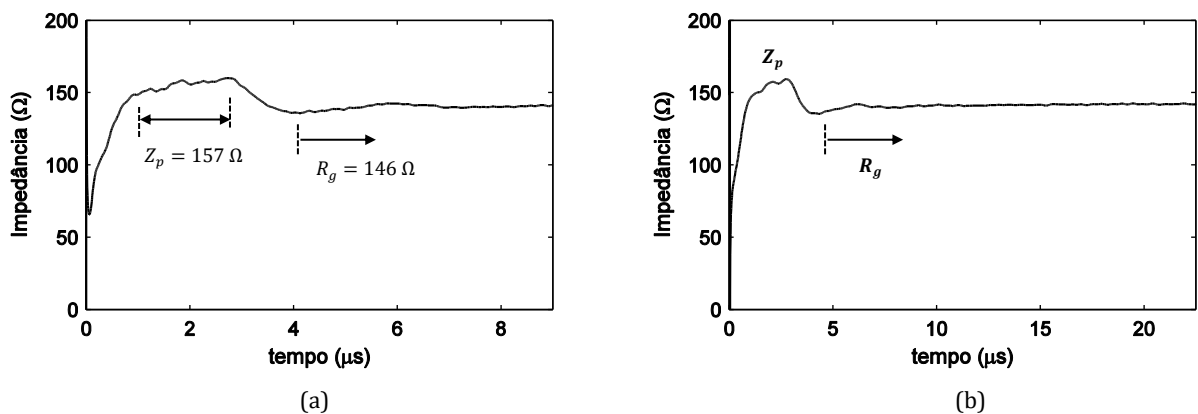


Fig. 5.10 – Curvas da tensão, corrente e impedância transitória.
 Eletrodo horizontal, $\ell = 18 \text{ m}$, $r = 5 \text{ mm}$, $h = 20 \text{ cm}$, $\rho = 1.113 \Omega\text{m}$, $R_t = 112 \Omega$.

Na Fig. 5.11 são apresentadas as curvas de impedância para um aterramento constituído por um eletrodo horizontal de 12 m de comprimento e raio de 5 mm . A resistividade do solo é de $1.109 \Omega\text{m}$ e a resistência medida com o terrômetro foi de 152Ω . Os gráficos, mais uma vez, são apresentados em janelas de tempo que variam ($5 \mu\text{s}$ a $90 \mu\text{s}$). Nessa figura, tal como aconteceu no caso anterior, fica evidente a existência de duas regiões bem distintas na curva $z(t)$, uma associada à impedância e outra à resistência de aterramento. Para este aterramento, baseado no valor médio do intervalo $1 \mu\text{s} \leq t \leq 3 \mu\text{s}$, a impedância impulsiva é de 157Ω . Após este instante ($t \cong 3\mu\text{s}$) a curva assume um novo patamar se “estabilizando”. De fato, nessa região há uma pequena variação com tendências de crescimento no valor instantâneo da impedância transitória (142Ω a 150Ω). Essa, também, foi uma característica verificada com o uso do terrômetro. Pode ser que essa tendência já esteja relacionada com efeitos galvânicos na região de contato entre o eletrodo e o solo. Contudo, não foram encontrados na literatura estudos específicos que indicassem o tempo médio a partir do qual tais efeitos começam a ter significância. A despeito disso, na comparação entre o valor médio do intervalo (146Ω) e o valor medido com o terrômetro, a diferença é de $-3,9 \%$, sendo pequena, portanto.



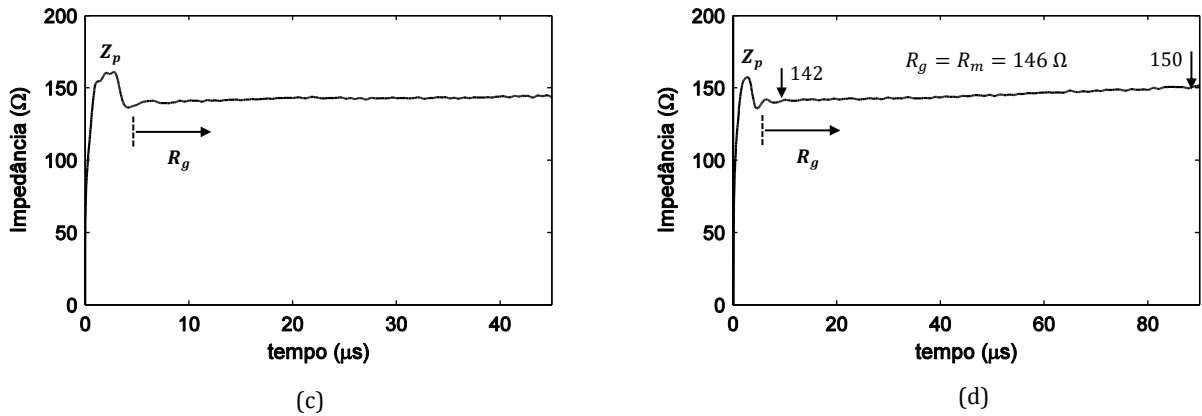
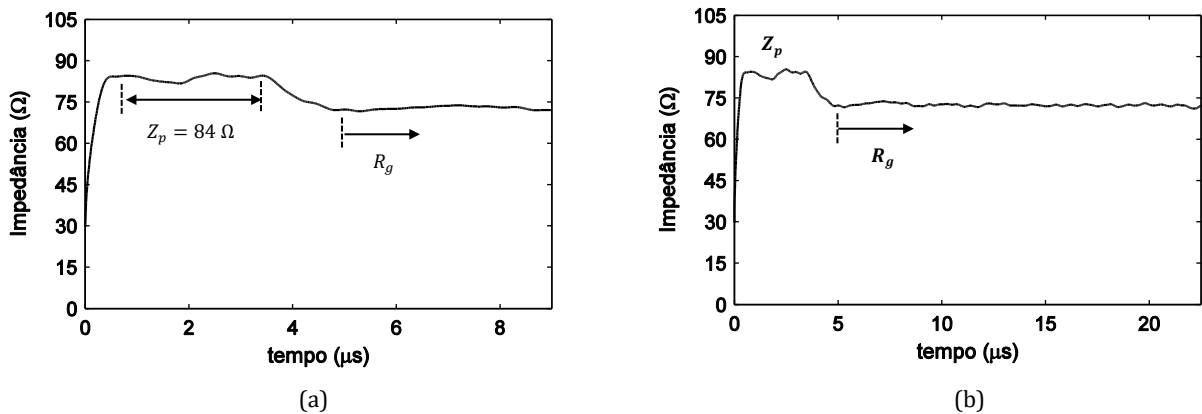


Fig. 5.11 – Curvas da impedância transitória.
Eletrodo horizontal, $\ell = 12\text{ m}$, $r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$, $\rho = 1.109\ \Omega\text{m}$, $R_t = 152\ \Omega$.

As curvas da impedância apresentadas na Fig. 5.12 são de um aterramento constituído por um eletrodo horizontal de 18 m ($r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$) enterrado em um solo com resistividade 802 Ωm . O terrômetro mediu o valor de 79 Ω para esse aterramento. Na Fig. 5.13, as curvas de impedância são de um aterramento com eletrodo de 12 m ($r = 5\text{ mm}$, $h = 20\text{ cm}$, $\rho = 795\ \Omega\text{m}$). Neste caso, o valor medido com o terrômetro foi de 109 Ω . Em ambos os casos, verificam-se características semelhantes àsquelas apresentadas nas figuras anteriores. Nas curvas das impedâncias é possível distinguir de forma clara duas regiões distintas, uma associada à impedância impulsiva e outra à resistência de aterramento. Além disso, em ambas, a região que tende ao valor da resistência apresenta uma pequena variação. A despeito disso, mais uma vez, o valor médio calculado a partir dessa região apresentou boa proximidade com os valores medidos com o terrômetro. Para o aterramento com o eletrodo maior (18 m) a diferença é de -5% . Já no caso do eletrodo menor, (12 m) a diferença é de $-12,8\%$. Apesar de esse último índice ter sido maior que os demais, ainda assim julga-se que ele seja aceitável, considerando a variabilidade e complexidade de parâmetros inerentemente existente em uma medição.



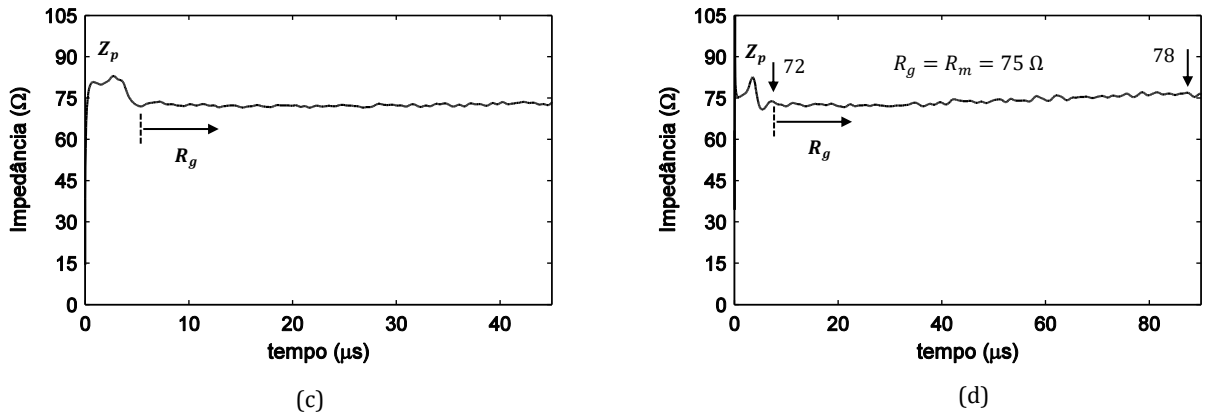


Fig. 5.12 - Curvas da impedância transitória.
 Eletrodo horizontal, $\ell = 18$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 802$ Ω m, $R_t = 79$ Ω .

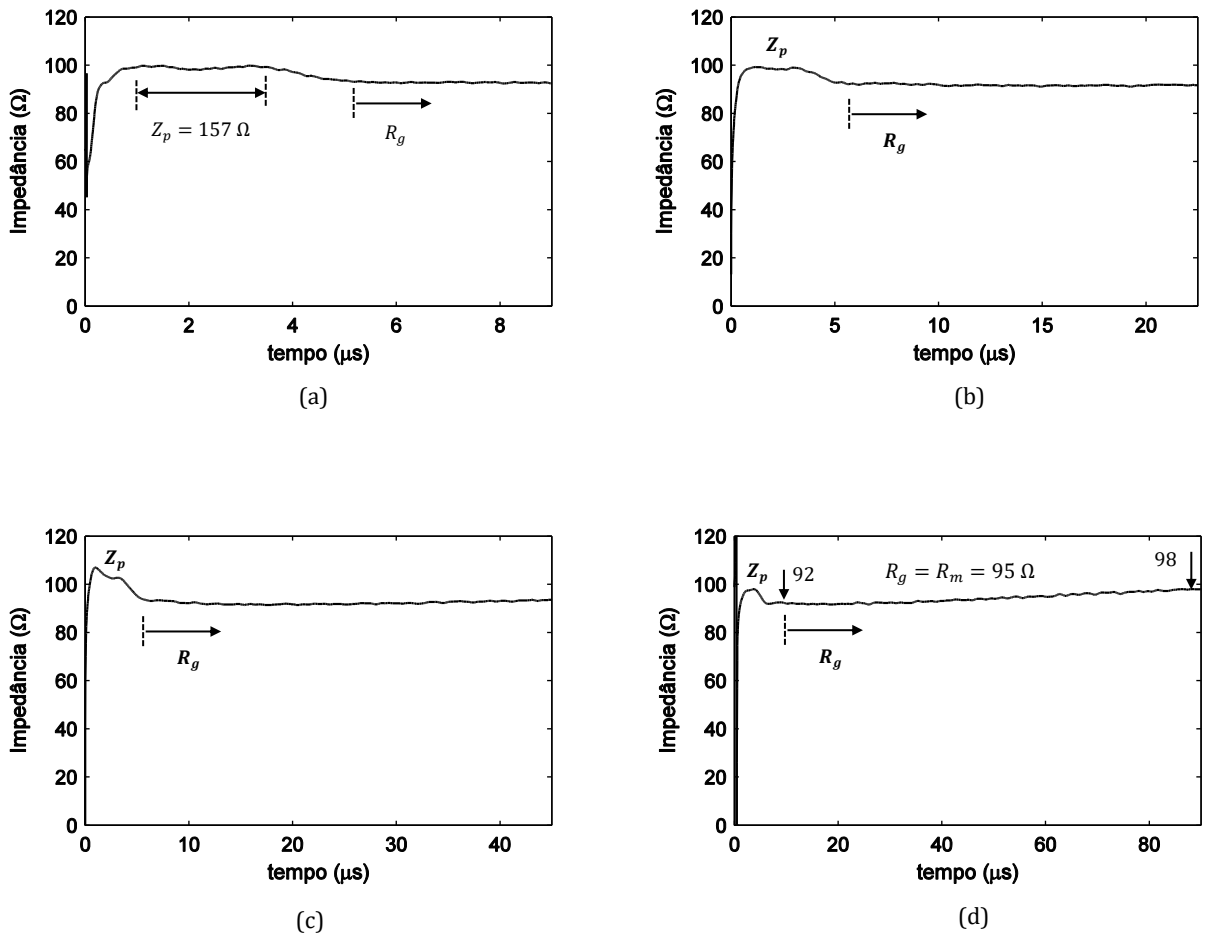


Fig. 5.13 - Curvas da impedância transitória.
 Eletrodo horizontal, $\ell = 12$ m, $r = 5$ mm, $h = 20$ cm, $\rho = 795$ Ω m, $R_t = 109$ Ω .

Os resultados apresentados anteriormente, em todos os casos, evidenciam a existência de duas regiões distintas na curva da impedância transitória que caracterizam a impedância impulsiva e a resistência de aterramento. Entretanto, nem sempre essa distinção é evidente. Isto, contudo, não significa que as regiões não existam. Significa apenas que ambas têm valores muito próximos. Esse é o caso das curvas apresentadas na Fig. 5.14 referentes à medição feita em um aterramento constituído por um eletrodo vertical (haste, $\ell = 2,4 \text{ m}$, $r = 6,25 \text{ mm}$) cravado em um solo com resistividade de $954 \Omega \text{ m}$. O terrômetro mediu o valor de 450Ω para esse aterramento. Como se pode verificar na figura, praticamente não há uma distinção de regiões. Neste caso, significa que a impedância impulsiva e a resistência de aterramento têm valores muito próximos ($Z_p = 415 \Omega$ e $R_g = 418 \Omega$). Na comparação com o valor medido com o terrômetro, R_g apresenta um desvio de $-7,1 \%$, sendo mais uma vez bem próximos.

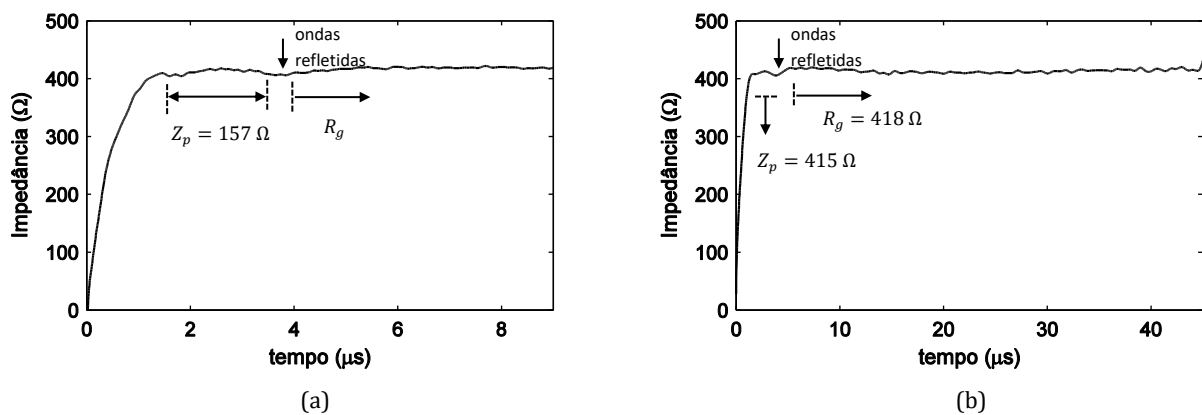


Fig. 5.14 – Curvas da impedância transitória.
Eletrodo vertical, $\ell = 2,4 \text{ m}$, $r = 6,25 \text{ mm}$, $\rho = 954 \Omega \text{ m}$, $R_t = 450 \Omega$.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo foi avaliada a viabilidade do uso de um sinal impulsivo ($1,5/500 \mu\text{s}$) para se determinar o valor da resistência de aterramento. Com tais características, o sinal apresenta uma ampla faixa de frequências. Assim, a curva da impedância traz não só as características resistivas da resposta do solo, mas também os seus efeitos reativos. Isto ficou evidente nas curvas apresentadas, onde se verificam duas regiões distintas, uma associada à impedância impulsiva e outra à resistência de aterramento. Nos aterramentos constituídos por um eletrodo horizontal, tanto no de 12 m como no de 18 m , isto ficou bem evidente. Em ambos os casos a impedância impulsiva, Z_p , foi maior que a resistência de aterramento, R_g . Isto já não aconteceu no aterramento tipo haste. Neste caso, o valor de Z_p foi aproximadamente o mesmo de R_g . Tal ocorrência, possivelmente, é devido à maior indutância do eletrodo horizontal, que é acentuada pelas componentes de frequência mais altas presentes no sinal impulsivo. Resultados semelhantes foram obtidos por Rosado [75] e Visacro [48],

onde os autores fizeram medições em aterramentos semelhantes aos apresentados neste capítulo (eletrodos vertical e horizontal). Nos trabalhos desses autores houve casos em que a relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento, denotada coeficiente impulsivo (A), foi menor, igual e maior que a unidade. Grcev [76,22,77], analisando por meio de simulações computacionais a resposta de aterramentos (eletrodos vertical e horizontal) a sinais impulsivos, obteve resultados semelhantes. O que chama a atenção nesse último caso é que, segundo o autor, o coeficiente impulsivo deve ser sempre maior ou igual a unidade. Nesta tese, os resultados coincidiram apenas com os achados desse último autor ($A \geq 1$). Obviamente, é necessário ampliar o número de “amostras” de medições para que algo conclusivo possa ser determinado. É importante salientar, contudo, que os resultados obtidos por meio de medição apresentam inerentemente certa variabilidade, não estando sujeitos, portanto, ao rigor da precisão naturalmente existente em simulações.

Na comparação com os valores apresentados pelo terrômetro, os resultados apresentaram desvios que variaram entre $-12,8\%$ e $-3,9\%$, o que parece ser aceitável. Afinal, o estudo feito das características básicas dos sinais elétricos gerados pelo terrômetro revelou que, de fato, os valores apontados pelo equipamento não expressam de forma única e absoluta a resistência do aterramento. Isto porque tais valores são baseados em critérios que cada fabricante adota para processar e determinar a resistência de aterramento por meio de um valor único. Se for considerada ainda a variabilidade dos parâmetros existentes nos procedimentos de execução de uma medição, fica evidente que a precisão, inevitavelmente, deve vir acompanhada de certa flexibilidade. Considerando tais aspectos, os resultados obtidos parecem expressar adequadamente a resistência de aterramento nos casos avaliados.

6 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Neste trabalho, foi apresentado a Linha Infinita Artificial (LIA), um solenoide constituído por um tubo de PVC que tem ao longo do seu comprimento, na sua superfície, um fio isolado enrolado. Testes de avaliação mostraram que esse elemento apresenta características que o assemelham a uma linha de transmissão de perdas desprezíveis. Além disso, devido a sua alta indutância por metro, a velocidade de propagação nesse elemento é relativamente baixa, sendo esse um importante aspecto de atratividade para o seu uso em substituição ao cabo simples normalmente utilizado nos circuitos de corrente de arranjos de medição de impedância de aterramento. Algumas observações relativas ao seu uso e a aspectos adicionais são feitas a seguir.

6.1 Impedância de aterramento

A impedância de aterramento é um importante parâmetro usado em projetos aplicados na proteção contra os efeitos indesejados de correntes elétricas. Determinar a impedância em condições de campo, contudo, continua sendo, ainda hoje, um desafio de engenharia. Importantes institutos, como o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e o EPRI (*Electric Power Research Institute*), já incorporaram em seus Guias procedimentos e instruções para a medição de impedância. Contudo, a sua adoção de modo amplo pelas empresas de energia em todo o mundo parece ainda esbarrar em dificuldades técnicas e práticas. A experiência adquirida neste trabalho mostrou que geradores impulsivos, dispositivos para leitura, registro e processamento das grandezas elétricas e metodologia de medição são elementos que certamente ainda precisam evoluir bastante para que tenham a mesma praticidade e aceitação verificadas em medições de resistência. Nesse sentido, há ainda uma grande lacuna a ser preenchida, garantindo que todos os esforços nesse sentido são importantes e justificáveis. Isso, ao menos em parte, parece justificar o fato da medição da resistência de aterramento ainda ser o procedimento comum em práticas de proteção contra descargas, ainda que modo inadequado. Tendo tais aspectos como alicerce, a contribuição deste trabalho foi dirigida, sobretudo, a dois dos elementos citados:

i) gerador impulsivo: o gerador desenvolvido para este trabalho apresenta as seguintes características que o qualificam como adequado e prático: dimensões reduzidas (19x11x5 cm), leveza (540 g), alimentação com bateria de 12 V, facilidade de configuração da forma de onda (tempo de frente e de meia onda), boa amplitude do sinal de tensão (1 kV; $\pm 0,2$ kV) e boa capacidade de corrente (8 A, corrente de curto-circuito).

ii) método de medição: no circuito de corrente do arranjo de medição foi usada a Linha Infinita Artificial (LIA), por onde as ondas propagam com uma velocidade relativamente baixa (2-3 % da velocidade da luz). A sua efetividade foi verificada por meio de simulação computacional e medições feitas em campo. Na comparação dos resultados, obtidos com um arranjo convencional constituído

por um cabo simples esticado sobre o solo e aquele em que a LIA é usada, foi verificada uma diferença desprezível. Disso decorre que a substituição do cabo simples pela LIA é absolutamente possível com a vantagem do circuito, nesse último caso, ser bem menor. Considerando apenas a ordem de grandeza aproximada, uma janela de tempo de medição de $\sim 1 \mu s$ é conseguida com 3 m de LIA. Para esse mesmo intervalo de tempo seriam necessários pelo menos 100 m de fio esticado sobre o solo. Essa é uma importante contribuição deste trabalho, sobretudo quando as medições são feitas em condições de campo. Ainda em relação ao método de medição, podem ser citadas contribuições adicionais. O Método do Deslocamento Oblíquo é uma modificação de outros dois existentes. Com ele o circuito de tensão também se torna menor. Os resultados mostraram a viabilidade do seu uso, contudo, é importante que as distâncias usadas para o eletrodo de potencial sejam investigadas de modo mais sistemático. Em outro tipo de medição, a extremidade distante das LIAs usadas no circuito de corrente não foi aterrada (linha aberta). Na comparação com a situação em que a LIA está aterrada na sua extremidade distante, verificou-se que há uma coincidência de valores até que as ondas refletidas chegam ao terminal de medição. Portanto, a impedância é determinada ainda que o circuito de corrente (LIAs) não esteja aterrado. Este tipo de medição é particularmente útil nos casos em que há dificuldades em se efetivar o aterramento auxiliar, como em áreas urbanas.

6.2 Resistência de aterramento

A resistência de aterramento é um importante parâmetro usado em muitas aplicações de engenharia relacionadas, também, aos efeitos indesejados das correntes elétricas. Neste caso, contudo, os projetos são direcionados a frequências mais baixas, usualmente a de geração. A prática comum é usar o Método da Queda de Potencial e um terrômetro para determinar esse parâmetro. Neste trabalho, a resistência de aterramento foi determinada com um sinal impulsivo e com o mesmo arranjo usado na medição da impedância. Os resultados mostraram que para janelas de tempo longas a curva de impedância tende para o valor da resistência de aterramento. A comparação foi feita com os valores obtidos com o terrômetro, ficando evidente a proximidade dos resultados.

Nesta etapa do trabalho um aspecto que normalmente passa despercebido chamou a atenção. Isso possivelmente acontece devido à solidez com o tema resistência de aterramento é visto e tratado. Os equipamentos de medição mais novos são dotados de sistemas eletrônicos bastante sofisticados. Muitos já apresentam diretamente o valor da resistência de aterramento em um *display*. Certamente essa é uma condição desejável que traz facilidade e comodidade ao operador do equipamento. O valor apresentado é o resultado do processamento que é feito internamente no equipamento, portanto, expressa de forma particular aquilo que um fabricante específico acredita ser o melhor para representar quantitativamente a resistência do aterramento. Com isso, considerando que cada fabricante tem seus critérios de projeto, é natural que equipamentos distintos apresentem valores distintos para medições feitas em um mesmo aterramento. De modo contrário, os princípios físicos para a sua determinação são únicos. Assim, o valor da resistência de um aterramento deve ser

balizado por tais princípios e não por um equipamento específico, qualquer que seja ele. Os equipamentos de medição, portanto, não apresentam um valor que expresse a verdade única e absoluta para a resistência, mas sim algo apenas aproximado. Considerando, ainda, os procedimentos práticos da técnica usada na medição, como o Método da Queda de Potencial, fica evidente que a precisão representada por um valor único deve ser usada apenas como uma referência. Portanto, parece ser razoável e inevitável que a precisão dos resultados obtidos por meio de medição, sobretudo em condições de campo, venha acompanhada de certa flexibilidade. De fato, esta conclusão se estende a todas as medições realizadas neste trabalho.

6.3 Aspectos de ordem prática no uso da LIA

- Devido a sua alta indutância por metro, a sua impedância característica também é alta. Assim, é importante que a amplitude do sinal gerado seja suficientemente elevada para garantir que a corrente que entra no aterramento seja adequada.
- A região de “estabilidade” das curvas da tensão, da corrente e, conseqüentemente, da impedância transitória apresentaram certa oscilação. Em parte, isto é devido às descontinuidades existentes, quais sejam: conexões entre as LIAs e desalinhamento vertical e horizontal devido as irregularidades naturalmente existentes em condições de campo.
- O circuito de potencial mostrou-se mais sensível que o de corrente. Durante as medições ocorreram situações em que o patamar da região de “estabilidade” do circuito de corrente foi alcançado e o de tensão, de modo contrário, não. Essa tendência sugere a existência de alguma capacitância no circuito de medição. Visando trazer compreensão a essa falta de “estabilidade”, foi elaborado um ensaio no laboratório de Extra Alta Tensão (LEAT) que fica nas dependências da Universidade Federal de Minas Gerais. A expectativa foi a de que neste ambiente mais controlado as respostas poderiam ser conseguidas. Entretanto, apesar dos esforços empreendidos na busca por um entendimento de tal ocorrência, isto não foi conseguido neste trabalho.

6.4 Sugestões de continuidade

Dentre as contribuições deste trabalho, ressalta-se a apresentação da Linha Infinita Artificial (LIA), elemento esse que tornou possível o circuito de corrente ser relativamente pequeno. Sendo absolutamente inovador, esta é a primeira vez que esse elemento está sendo avaliado. Devido justamente a essa condição de ineditismo, este trabalho expressa apenas a sua efetividade, num primeiro passo. Disso decorre a necessidade de se avaliar melhor algumas das suas características e explorar de forma mais ampla as suas potencialidades, tais como:

- Detectar experimentalmente o que faz com que o circuito de tensão em certas medições apresente o comportamento de “instabilidade”;
- Construir LIAs com emendas “contínuas” para evitar ou minimizar a descontinuidade;
- Construir LIAs em tubos de PVC de diâmetro maiores e/ou fios condutores mais finos e verificar se existe um arranjo mais adequado para cada situação em campo;
- Estudar de modo mais amplo o Método do Deslocamento Oblíquo e verificar a possibilidade de se definir valores padrões para as distâncias do eletrodo de potencial;
- Determinar a resistência de aterramento usando o Método do Deslocamento Oblíquo;
- Usar a LIA de modo sistemático em medições de impedância de aterramento de torres de linhas de transmissão e subestações, tanto em área rural como urbana;
- Usar LIA de modo sistemático em medições realizadas em área urbana com a sua extremidade distante não aterrada (linha aberta).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination. **IEEE Std 1313.2-1999**, 1999.
2. WHITEHEAD, J. T. The Lightning Performance of TVA's 500kV and 161kV Transmission Lines. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, n. 3, p. 752-768, mar. 1983.
3. HAYASHI, T.; MIZUNO, Y.; NAITO, K. Study on Transmission-Line Arresters for Tower With High Footing Resistance. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 23, n. 4, p. 2456-2460, Oct. 2008.
4. CHUNHUA, L. et al. Lightning Performance and its Prevention for Quadruple-circuit Transmission Line with 220kV/110kV Voltage in a Tower. **TELKOMNIKA**, v. 11, n. 10, p. 5833-5841, Oct. 2013.
5. MSWANE, L. M.; GAUNT, C. T. Lightning performance improvement of the Swaziland electricity board transmission system (66kV & 132kV lines) - results of the pilot project. **Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005 IEEE**, 11-15 Jul. 2005. 364-370.
6. DARVENIZA, M.; LIBOURN, G. J. . P. S. A. Line Design and Electrical Properties of Wood. **IEEE Transactions on Power and Apparatus and Systems**, n. 11, p. 1344-1356, set. 1967.
7. DARVENIZA, M. **Electrical Properties of Wood and Line Design**. Queensland, Australia, University of Queensland Press. [S.l.]. 1980.
8. HE, J. et al. Laboratory investigation of impulse characteristics of transmission tower grounding devices. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 18, n. 3, p. 994-1001, Jul. 2003.
9. INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Portal ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em:
<<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>>. Acesso em: 13 nov. 2014.
10. CHOWDHURI, P.; LI, S.; YAN, P. Rigorous analysis of back-flashover outages caused by direct lightning strokes to overhead power lines. **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**, v. 149, n. 1, p. 58-65, Jan. 2002.
11. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines. **IEEE Std 1243-1997**, p. 1;44, Dec. 16 1997.
12. WORKING GROUP ON ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES. IEEE Working group report estimating lightning performance of transmission lines II-updates to analytical models. **Power Delivery, IEEE Transaction on**, v. 8, n. 3, p. 1254-1267, 1993.
13. ZHENGHUA, F.; LING, L.; JUNZHONG, F. Research on reducing grounding resistance of transmission line tower grounding grid. **Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on**, p. 1216-1219, 16-18 Sep. 2011.

14. GRCEV, L. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 11, n. 4, p. 815-823, apr. 1996.
15. LIU, Y.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. An improved transmission-line model of grounding system. **IEEE Trans. Electromagn. Compatibility**, v. 43, n. 3, p. 348-355, Aug. 2001.
16. GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI-TOSEVA, V. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations. **Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna**, Bologna, Italia, v.3, jun. 2003. p.7.
17. LIU, Y.; THEETHAYI, N.; THOTTAPPILLIL, R. An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: nonuniform transmission-line approach. **#IEEE_J_PWRD#**, v. 20, p. 722-730, 2005.
18. GRCEV, L.; POPOV, M. On High-Frequency Circuit Equivalentents of a Vertical Ground Rod. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1598-1603, abr. 2005.
19. THEETHAYI, N. et al. External impedance and admittance of buried horizontal wires for transient studies using transmission line analysis. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 14, n. 3, p. 751-761, jun. 2007.
20. VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, p. 381-386, jan. 2007.
21. MOTOYAMA, H. Experimental and analytical studies on lightning surge characteristics of a buried bare wire. **Elect. Eng. Jpn.**, v. 164, n. 3, p. 35-41, Aug. 2008.
22. GRCEV, L. Impulse efficiency of ground electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 1, p. 441-451, Jan. 2009.
23. SURTEES, A. J.; ROUSSEAU, A.; MARTZLOFF, F. Resistência de aterramento versus impedância de aterramento. **Revista Eletricidade Moderna**, São Paulo, v. 35, n. 395, p. 170-179, fev. 2007.
24. GONOS, I. F.; STATHOPULOS, I. A. Soil Ionisation Under Lightning Impulse Voltages. **Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings**, v. 151, n. 5, p. 343-346, Sept. 2004.
25. BEWLEY, L. V. Theory and tests of counterpoise. **Electrical Engineering**, v. 53, n. 8, p. 1163-1172, Aug. 1934.
26. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System. **IEEE Std 81-2012 (Revision of IEEE Std 81-1983)**, p. 1-86, Dec. 2012.
27. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **EPRI Zed-Meter® Construction Guide**.
Disponível em:
<<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=000000000001023232>>.
Acesso em: 11 Apr. 2015.

28. RAKOV, V. A.; RACHIDI. Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 3, p. 428-442, Aug. 2009.
29. IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. IEEE Approved Draft Guide for Safety in AC Substation Grounding. **IEEE P80/D10, April 2013**, p. 1,236, Jan. 31 2014.
30. CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Instrução para aterramento de suportes de linhas de transmissão**. Manual técnico da diretoria de projetos e construções. [S.l.]. jul. 1998.
31. ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. **ABNT NBR 15749**, p. 49, set. 2009.
32. CURDTS, E. B. Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements. **American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics, Transactions of the**, v. 77, n. 5, p. 760-767, Nov. 1958.
33. TAGG, G. F. Measurement of earth-electrode resistance with particular reference to earth-electrode systems covering a large area. **Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of**, v. 111, n. 12, p. 2118-2130, Dec. 1964.
34. TAGG, G. F. Measurement of the resistance of an earth-electrode system covering a large area. **Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of**, v. 116, n. 3, p. 475-479, Mar. 1969.
35. DIMCEV, V.; HANDJISKI, B.; SEKERINSKA, R. Alternative fall-of-potential method for grounding grids impedance measurements and inductive coupling between leads. **Electromagnetic Compatibility, 2003. EMC '03. 2003 IEEE International Symposium on**, v. 1, p. 74-77, May 2003.
36. KORASLI, C. Ground resistance measurement with alternative fall-of-potential method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 1657-1661, Apr 2005.
37. WOODHOUSE, D. J.; MIDDLETON, R. H. Consistency in ground potential rise estimation utilizing fall of potential method data. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 2, p. 1226-1234, Apr 2005.
38. LADANYI, J.; SMOHAI, B. Influence of auxiliary electrode arrangements on earth resistance measurement using the Fall-of-Potential method. **Energy (IYCE), 2013 4th International Youth Conference on**, p. 1-6, Jun 2013.
39. WANG, C.-G. et al. Grounding resistance measurement using fall-of-potential method with potential probe located in opposite direction to the current probe. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 13, n. 4, p. 1128-1135, Oct. 1998.
40. MA, J.; DAWALIBI, F. P. Extended analysis of ground impedance measurement using the fall-of-potential method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 17, n. 4, p. 881-885, Oct. 2002.

41. KORASLI, C. Ground Resistance Measurement with Fall-of-Potential Method Using Capacitive Test Probes. **Transmission & Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2006. ESMO 2006. IEEE 11th International Conference on**, 15-19 Oct. 2006.
42. MA, J.; DAWALIBI, F. P. Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall-of-potential method. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 16, n. 4, p. 739-743, Oct 2001.
43. CHISHOLM, W.; ANDERSON, J. **Guide for Transmission Line Grounding: A Roadmap for Design, Testing, and Remediation**. EPRI. Palo Alto, CA, p. 298. 2004. (1002021).
44. GRCEV, L.; HEIMBACH, M. Frequency dependent and transient characteristics of substation grounding system. **IEEE Transactions on power delivery**, v. 12, n. 1, p. 172-178, Jan 1997.
45. HEIMBACH, M.; GRCEV, L. D. Grounding System Analysis in Transients Programs Applying Electromagnetic Field Approach. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 1, p. 186-193, Jan 1997.
46. CHOI, J.-K. et al. Direct measurement of frequency domain impedance characteristics of grounding system. **Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on**, vol.4, 2002. pp.2218-2221.
47. CHOI, J.-H.; LEE, B.-H. An analysis on the Frequency-dependent grounding impedance based on the ground current dissipation of counterpoises in the two-layered soils. **Journal of Electrostatics**, v. 70, n. 2, p. 184-191, Abr 2012.
48. VISACRO, S.; ROSADO, G. Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v. 51, n. 1, p. 161-164, Feb 2009.
49. PETRACHE, E.; CHISHOLM, W. A.; PHILLIPS, A. Evaluating the Transient Impedance of Transmission Line Towers. **IX International Symposium on Lightning Protection**, Foz do Iguacu, Brazil, 26-30 Nov 2007.
50. NAYEL, M. et al. Experimental study of induced voltage between two bare horizontal electrodes in ground. **Electromagnetic Compatibility, 2006. EMC 2006. 2006 IEEE International Symposium on**, v. 2, p. 324-328, 14-18 Aug 2006.
51. TSUMURA, M. et al. FDTD Simulation of a Horizontal Grounding Electrode and Modeling of its Equivalent Circuit. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v. 48, n. 4, p. 817-825, Nov 2006.
52. CHISHOLM, W. A.; PETRACHE, E.; BOLOGNA, F. Comparison of Low Frequency Resistance and Lightning Impulse Impedance on Transmission Towers. **X International Symposium on Lightning Protection**, Curitiba, Brazil, 9-13 Nov 2009.

53. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Lightning Performance of Transmission Line. In: _____ **Transmission Line Reference Book - 345 kV and Above**. 2a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 1982. Cap. 12, p. 555.
54. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Insulation Design. In: _____ **EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above**. 3a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2005. Cap. 3, p. 58.
55. CHISHOLM, W. A.; PETRACHE, E.; BOLOGNA, F. Grounding of overhead transmission lines for improved lightning protection. **Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES**, 19-22 Apr 2010.
56. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Insulation Design. In: _____ **EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above**. 3a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2005. Cap. 3, p. 1-86.
57. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Insulation for Power Frequency Voltage. In: _____ **EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above**. 3a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2005. Cap. 4, p. 1-104.
58. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Lightning and Grounding. In: _____ **EPRI AC Transmission Line Reference Book-200 kV and Above**. 3a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2005. Cap. 6, p. 1-92.
59. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Lightning Performance of Compact Lines. In: _____ **EPRI Transmission Line Reference Book—115-345 kV Compact Line Design**. 2a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2008. Cap. 6, p. 1-26.
60. AMETANI, A. et al. Experimental investigation of a transient induced voltage to an overhead control cable from a grounding circuit. **17th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)**, Barcelona, 12-15 May 2003.
61. PAUL, C. R. **Analysis of Multiconductor Transmission Lines**. 2a. ed. New York: Wiley-Interscience, 2008. Chap. 4, p. 145.
62. FILHO, S. V. Conceitos Básicos em Condições de Baixa Frequência: Resistividade do Solo e Resistência de Aterramento. In: FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. 1a. ed. São Paulo: Artliber, 2012. Cap. 2, p. 52-54.
63. FILHO, S. V. Métodos de Medição de Resistência de Aterramento e de Resistividade do Solo. In: FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. 1a. ed. São Paulo: Artliber, 2012. Cap. 3, p. 67-68.
64. PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2a. ed. Hoboken: Wiley, 2006. Chap. 4, p. 208.
65. ULABY, F. T.; MICHIELSEN, E.; RAVAIOLI, U. **Fundamentals of Applied Electromagnetics**. 6a. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. Chap. 5, p. 266.

66. LIMA, A. B. **Método para Cálculo da Impedância de Malhas de Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão**. Dissertação de Mestrado. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG). [S.l.]. 2010.
67. LIMA, A. B. et al. A simplified method for calculating the tower grounding impedance by means of PSPICE. **Lightning Protection (ICLP), 2012 International Conference on**, Vienna, Austria, 2-7 Sep. 2012. 1,4.
68. LIMA, A. B. et al. Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead. **Electric Power Systems Research (EPSR)**, n. 118, p. 69-75, 2015.
69. CHISHOLM, W. A. et al. Simultaneous transient soil resistivity and footing impedance measurements. **International Conference on Grounding and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects**, Manus, Brazil, 12-16 May 2014.
70. ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on**, v. 55, n. 1, p. 132-139, Feb. 2013.
71. CHISHOLM, W. A. et al. Transient Resistivity Measurements on 345-kV Transmission Towers. **Proceedings of the 2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)**, Belo Horizonte, Brazil, 7-11 Oct. 2013. 171-176.
72. CHISHOLM, W. A. et al. Measurements of Apparent Transient Resistivity on Wind Turbines and Transmission Towers. **Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing, GROUND'2012 & 5th LPE**, Bonit-MS, Brazil, 25-29 Nov. 2012.
73. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Field Guide Zed-Meter Oblique Method Testing**. Disponível em:
<<http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001025482>>.
Acesso em: 11 abr. 2015.
74. EPRI - ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Lightning and Grounding. In: ____ **EPRI AC Transmission Line Reference Book-200 kV and Above**. 2a. ed. Palo Alto, CA: EPRI, 2005. Cap. 6, p. 71.
75. ROSADO, G. C. **Investigação teórico-experimental sobre a resposta de aterramento elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (PPGEE/UFMG). [S.l.]. 2008.
76. GRCEV, L. Impulse efficiency of simple grounding electrode arrangements. **Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC Zurich 2007. 18th International Zurich Symposium on**, Munich, Germany, 24-28 Sept. 2007. p.325,328.
77. GRCEV, L. Modeling of grounding electrodes under lightning currents. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, n. 3, p. 559-571, aug. 2009.

78. PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**. 2a. ed. Hoboken: Wiley, 2006. Chap. 4, p. 206.