

RESPOSTA DE UM ATERRAMENTO A CORRENTE ELÉTRICA IMPULSIVA: IMPEDÂNCIA OU RESISTÊNCIA? A GROUND RESPONSE TO ELECTRICITY IMPULSIVE: IMPEDANCE OR STRENGTH?

**Marcos Vinícius Dalla Venezia Bréder¹; Rafael Soares²; Andrei Roger Silva de Oliveira³
(Orientador); Adriana dos Reis Silva⁴ (Coorientadora).**

RESUMO: ESTE TRABALHO ABORDA O COMPORTAMENTO DOS ATERRAMENTOS ELÉTRICOS PERANTE A APLICAÇÃO DE CORRENTES DE NATUREZA IMPULSIVA. PARA ESSE PROPÓSITO, SERÃO APRESENTADOS OS CONCEITOS BÁSICOS QUE DEFINEM UM ATERRAMENTO ELÉTRICO. ALÉM DISSO, VÁRIOS FATORES QUE INFLUENCIAM A RESPOSTA DOS ATERRAMENTOS ELÉTRICOS FORAM CONTEMPLADOS NESTE TRABALHO E COMO EMBASAMENTO TEÓRICO, ADOTOU-SE A TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO, VISTO SUA OBJETIVIDADE NA MODELAGEM E ESTUDO DE ATERRAMENTOS FRENTE A EVENTOS IMPULSIVOS. A OPÇÃO PELA TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SE JUSTIFICADA AO COMPARAR RESULTADOS OBTIDOS PELAS TEORIAS DE CIRCUITOS E DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO, SENDO ESTA ÚLTIMA DE ELEVADO GRAU DE COMPLEXIDADE. ESSE TRABALHO APRESENTA INCLUSIVE, UM MODELO COMPUTACIONAL QUE ATRAVÉS DA ENTRADA DE DADOS RELATIVOS AO SOLO, AO ELETRODO DE ATERRAMENTO E À CORRENTE IMPULSIVA PERMITE A ANÁLISE DE VÁRIAS SITUAÇÕES, (ELETRODOS DE COMPRIMENTOS VARIADOS E SOLO COM CARACTERÍSTICAS DIFERENTES). O TRABALHO TAMBÉM ABORDA A DISTINÇÃO ENTRE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO E IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTO, UMA DEFINIÇÃO QUE NEM SEMPRE É LEVADA EM CONTA, PRINCIPALMENTE, NA EXECUÇÃO DE PROJETOS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

PALAVRAS-CHAVE: ATERRAMENTO ELÉTRICO, TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO, CORRENTE IMPULSIVA.

ABSTRACT: THIS PAPER AIMS TO STUDY THE BEHAVIOR OF ELECTRICAL EARTHLING WHEN THE APPLICATION OF IMPULSIVE NATURAL CURRENTS. FOR THIS STUDY HAS BEEN PRESENTED THE BASIC CONCEPTS WHICH DESCRIBE ELECTRICAL EARTHLING. FURTHERMORE, SEVERAL FACTORS THAT INFLUENCE THE RESPONSE OF ELECTRICAL EARTHLING HAVE BEEN DEMONSTRATED IN THIS STUDY. AS THEORETICAL FOUNDATION HAS BEEN ADAPTED THE TRANSMISSION LINE THEORY, DUE TO IT OBJECTIVITY IN MODELING AND EARTHLING STUDY RELATED TO IMPULSIVE EVENTS. THE OPTION TO LINE THEORY IS JUSTIFIED WHEN COMPARING RESULTS OBTAINED THROUGH CIRCUIT THEORIES AND ELECTROMAGNETIC FIELD, BEING THE LATTER WITH HIGH DEGREE OF COMPLEXITY. THE STUDY ALSO SHOWS A COMPUTER MODEL THAT THROUGH THE RECEPTION OF DATA RELATED FROM SOIL TO EARTHLING PROBE AND TO THE IMPULSIVE NATURAL ELECTRICAL CURRENT ALLOWS THE ANALYSIS OF VARIOUS SITUATIONS (EARTHLING PROBE WITH VARIED LENGTHS AND SOIL WITH DIFFERENT CHARACTERISTICS). DURING THE STUDY WILL BE EVIDENCE THE DISTINCTION BETWEEN EARTHLING RESISTANCE AND EARTHLING IMPEDANCE, A DEFINITION WHICH IS NOT ALWAYS TAKEN INTO ACCOUNT, MAINLY IN THE EXECUTION OF PROJECTS ON ATMOSPHERIC DISCHARGES.

KEYWORDS: ELECTRICAL GROUNDING, LINE TRANSMISSION THEORY, IMPULSIVE CURRENT.

1 INTRODUÇÃO

Os critérios adotados em projetos de aterramentos de sistemas encontrados nas concessionárias de energia elétrica são bem definidos. Fundamentalmente, esses critérios referem-se ao aterramento submetido a eventos eletromagnéticos de baixas frequências. Contudo, para que um sistema de energia elétrica opere dentro de padrões específicos de continuidade,

desempenho e segurança, exigidos em nível cada vez maior, é fundamental que o projeto de aterramento contemple também transitórios eletromagnéticos. Nesse último caso, ressaltam-se aqueles associados às correntes impulsivas de descargas atmosféricas.

Como ficará mais claro ao longo deste trabalho, quando submetido a uma corrente atmosférica, os eletrodos de um aterramento apresentam um comportamento

bastante peculiar. Em relação à generalidade de aplicações de aterramentos elétricos, chama atenção as formas distintas com que os profissionais da área de engenharia elétrica tratam um mesmo tema. No caso dos profissionais da área de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), o aterramento elétrico está associado à necessidade de se ter um caminho de baixa impedância, que é utilizado como referência do sistema elétrico, e que possa garantir uma rápida atuação da proteção na ocorrência de faltas para a terra. Além disso, visa-se manter as tensões de passo e toque dentro de níveis toleráveis aos seres vivos. Já para os profissionais da área de Eletrônica e Telecomunicações, em geral, o aterramento elétrico significa garantir um baixo valor de impedância entre os equipamentos e entre os equipamentos e a terra. Essa variabilidade leva a diferentes práticas que permeiam os projetos de aterramentos elétricos em instalações. Assim, o aterramento pode assumir configurações diversas, dependendo da aplicação. De modo mais específico, neste trabalho é feito um estudo dos transitórios eletromagnéticos decorrentes de uma descarga atmosférica incidente em eletrodos de aterramentos com uma configuração tipicamente usada em linhas de transmissão.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

As descargas atmosféricas são consideradas um dos mais importantes fatores associados a desligamentos não programados de linhas de transmissão em vários locais do mundo. Em determinadas regiões da Suíça, 40% dos desligamentos das linhas de 66 kV e 132 kV são atribuídos a esse fenômeno [1]. Na Austrália os índices de desligamento chegam a 20% em linhas de 66 kV que fazem uso de cabos pára-raios e de 55% para as que não o utilizam [2,3]. Um amplo estudo apresentado por Whitehead [4], onde foram analisados 11 anos de desempenho de várias linhas de transmissão da Tennessee Valley Authority's (TVA) revelou índices percentuais de desligamentos associados às descargas variando entre 16% e 100%

para linhas de 161 kV e entre 12% e 62% para linhas de 500 kV. Já no Brasil, são atribuídas às descargas cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e de 40% na distribuição [5]. Estes índices indicam uma expressiva degradação na qualidade da energia e evidenciam a importância de se usar estudar técnicas que possam melhorar o desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas.

1.2 OBJETIVOS

Avaliar a resposta de um aterramento elétrico frente a eventos de natureza impulsiva, considerando as dimensões e os arranjos dos eletrodos e as características elétricas do solo.

- Verificar a influência da resistividade do solo na resposta do aterramento a uma corrente impulsiva.
- Verificar a influência do comprimento do eletrodo na resposta do aterramento a uma corrente impulsiva.
- Avaliar a impedância do aterramento no domínio da frequência (resposta em frequência).
- Avaliar o comportamento da impedância no domínio do tempo.
- Verificar a diferença existente entre a resistência de aterramento e impedância de aterramento.

1.3 JUSTIFICATIVA

A necessidade de se operar dentro de padrões de qualidade e continuidade cada vez mais rigorosos evidencia a importância dos estudos relacionados à eficiência da operação das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. As práticas de proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas requerem que o valor da impedância de aterramento das torres seja bem baixo. Contudo, normalmente as companhias de energia fazem a medição da resistência

de aterramento em baixa frequência na expectativa de certo desempenho frente a descargas atmosféricas. Assim, neste trabalho é feita uma análise comparativa da resposta do aterramento a eventos de frequência mais baixa, como um curto-circuito (60 Hz), com a resposta a uma solicitação impulsiva, como aquela devido a uma descarga atmosférica.

1.4 METODOLOGIA

Neste trabalho os resultados foram obtidos por meio de simulação computacional. O arranjo de aterramento foi modelado usando-se a Teoria de Linhas de Transmissão, sendo usado um modelo já validado. A corrente foi modelada por uma função dupla exponencial devido as suas características serem representativas para a forma de onda de uma descarga atmosférica. Os resultados no domínio da frequência foram obtidos diretamente usando-se a Teoria de Linhas. Já para os resultados apresentados no domínio do tempo, foi usada a Transforma de Fourier direta e inversa. Todos os cálculos e gráficos foram feitos no programa Mathcad.

2.1 ASPECTOS RELEVANTES EM ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Neste capítulo é feita uma revisão da bibliografia especializada que trata de assuntos referentes às características do solo e que permeiam a sua resposta quando submetidos a correntes elétricas. São apresentados, também, conceitos importantes para a definição adequada da resposta do aterramento a correntes elétricas.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A RESPOSTA DO ATERRAMENTO A CORRENTES ELÉTRICAS

Um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo, sendo basicamente constituído por conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos enterrados no solo, eletrodos de aterramento e a terra que envolve os

eletrodos. Esquemáticamente, a Figura mostra um segmento do eletrodo sob a terra, quando nele é injetado certa corrente. A corrente que entra no eletrodo apresenta duas componentes: uma transversal que está associada a corrente dissipada no solo e uma longitudinal que está associada a corrente transferida para o segmento seguinte do eletrodo [6].

O fluxo da corrente longitudinal provoca perdas internas, que normalmente são desprezadas na modelagem dos eletrodos, e estabelece um campo magnético em torno do eletrodo. A energia associada a esse fluxo de corrente no eletrodo é computada por meio de uma indutância (L) série no circuito equivalente. Já a corrente transversal está associada ao fluxo de corrente condutiva e capacitiva, ambas capacitiva para o solo. A energia associada a essas correntes é modelada por meio de uma condutância (G) e de uma capacitância (C) em paralelo no circuito equivalente [6].

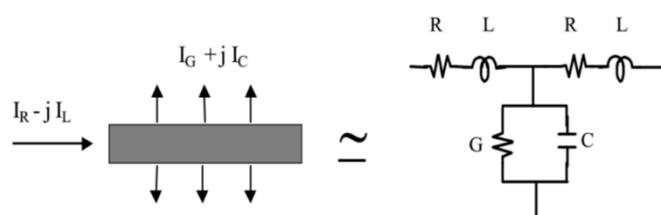


Figura 1 - Componentes da corrente em um eletrodo de aterramento.

Fonte: Retirado de [6]

A impedância de aterramento é caracterizada pela oposição oferecida à entrada e dispersão de corrente para o solo. É definida precisamente para cada componente de frequência de uma onda impulsiva, onde $Z(\omega) = V(\omega) / I(\omega)$, sendo também chamada impedância harmônica [7]. Para evidenciar a variação da impedância com a frequência, a Figura 2 mostra a resposta em frequência de um eletrodo horizontal de 30 m, raio de 0.7 cm, enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de $2400 \Omega\text{m}$. Nela fica claro que para frequências menores que, aproximadamente, 30 kHz o ângulo da impedância é zero e o módulo é constante, características essas de uma impedância puramente

resistiva. Para frequências maiores que aproximadamente 30 kHz, os efeitos reativos começam a surgir. Nessa condição o aterramento começa a apresentar características de uma impedância [7].

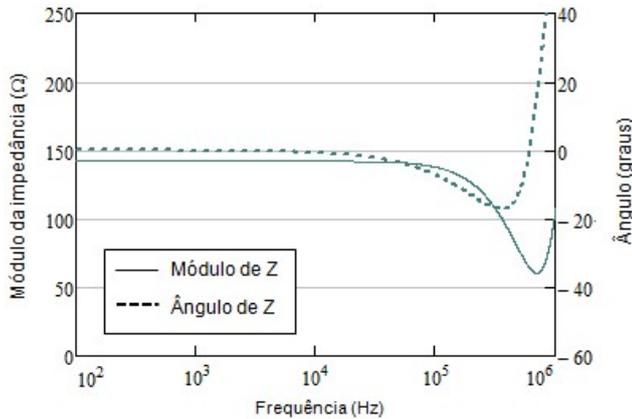


Figura 2 - Impedância de aterramento ao longo do espectro de frequência característico de uma descarga atmosférica.

Fonte: Adaptado de [7]

Quando se analisa o desempenho de um aterramento submetido a correntes impulsivas, como a de uma descarga atmosférica, é bastante usual representar a resposta desse sistema diretamente no domínio do tempo por meio da impedância impulsiva, Z_p , esse parâmetro é definido pela relação entre os valores de pico de tensão e de corrente, sendo [8,9]:

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}$$

onde, V_p é a tensão de pico e I_p é a corrente de pico medidas na entrada do aterramento.

Apesar de muitas vezes os valores de pico de tensão e de corrente não acontecerem no mesmo instante de tempo, essa representação permite que seja feita uma estimativa de forma rápida da tensão máxima que se desenvolve no ponto de injeção de corrente simplesmente efetuando o produto de Z_p pelo valor de pico da corrente injetada [10].

2.3 EFEITOS DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS NO SOLO E COMPRIMENTO EFETIVO

Quando uma corrente impulsiva é aplicada em um condutor longo enterrado no solo, a onda eletromagnética correspondente propaga longitudinalmente guiada pelo condutor. Este sistema se comporta como uma linha de transmissão imersa num meio com perdas havendo, conseqüentemente, atenuação e distorção da onda aplicada. A atenuação ocorre devido às perdas para o meio (solo). A distorção é devida às diferentes velocidades de propagação das várias componentes de frequência contidas no sinal impulsivo aplicado. Como resultado, a onda de corrente que propaga ao longo do eletrodo tem sua amplitude atenuada e, também, sofre deformações com a redução da inclinação da frente de onda. Tais aspectos são ilustrados na Figura 3 [10].

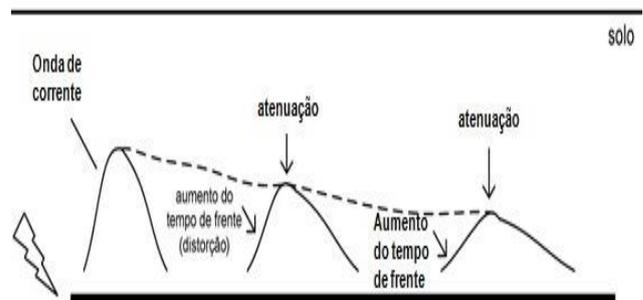


Figura 3 – Atenuação e distorção da corrente ao longo do eletrodo.

Fonte: Adaptada de [10]

A corrente longitudinal que propaga ao longo do eletrodo não é uniforme em consequência da atenuação. Portanto, a densidade linear de corrente (A/m) diminui ao longo do eletrodo. Deste comportamento surge o conceito de comprimento efetivo, introduzido por Gupta [11], que corresponde a um comprimento limite para eletrodo acima do qual não há mais nenhuma redução significativa no valor da impedância de aterramento [10]. Portanto o uso de eletrodos de comprimentos maiores que o comprimento efetivo representa desperdício.

O comprimento efetivo decresce com o aumento da condutividade e da frequência [8,11]. Isto ocorre devido a esses parâmetros serem responsáveis pelo aumento das perdas no solo (ramo condutivo e capacitivo) e, conseqüentemente, pelo aumento da atenuação da onda de corrente que propaga ao longo do eletrodo [12].

3 CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE ATERRAMENTOS: TEORIA APLICÁVEL

No passado, os pesquisadores e cientistas não tinham à sua disposição os avançados recursos computacionais de hoje, sendo necessário, muitas vezes, recorrer a simplificações dos problemas estudados na intenção de se viabilizar soluções. Um método muito usado na engenharia é a modelagem de sistemas, tendo como finalidade representar um comportamento físico por meio de modelos matemáticos.

O cálculo da impedância de aterramento tem sido feito a partir de soluções analíticas, empíricas ou numéricas que estão condicionadas à evolução da capacidade de processamento computacional ocorrido nas últimas décadas. Cada um destes métodos apresenta certo grau de complexidade. A modelagem usando a teoria de campos eletromagnéticos é de alta complexidade, contudo é possível que mesmo os sistemas mais complexos sejam devidamente modelados com essa técnica. O contraponto fica por conta do elevado custo computacional demandado, mesmo considerando os recursos atualmente disponíveis. Entretanto, é possível modelar e calcular a impedância de aterramento com recursos computacionais "comuns" usando a teoria de linhas de transmissão. É importante, contudo, definir as condições necessárias para que o seu uso produza resultados que expressem de maneira correta a resposta do aterramento. Um importante trabalho que evidencia tal assertiva foi apresentado por Grcev [9], onde é feita uma comparação dos resultados obtidos para a resposta de aterramentos submetidos a

correntes impulsivas considerando modelos baseados na teoria de campos eletromagnéticos (TCE), na teoria de linhas (TL) e na teoria de circuitos (TC). O autor avalia aterramentos constituídos por eletrodos verticais e horizontais de comprimentos variados enterrados em solos de resistividades também variados. As análises são feitas na faixa de frequência entre 100 Hz e 10 MHz. Os resultados computacionais, obtidos a partir dos três modelos, aplicados em um aterramento constituído por um eletrodo vertical (cobre, com $r = 2,5$ cm) são apresentados na Figura 4, Figura 6 e Figura 8.

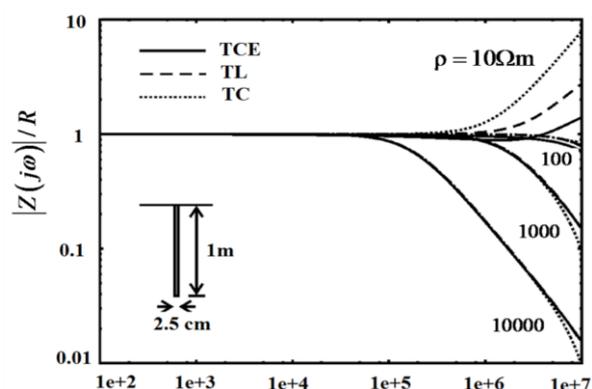


Figura 4 – Módulo da impedância harmônica normalizada com a resistência de baixa frequência para um eletrodo vertical de 1m.

Fonte: Adaptado de [9].

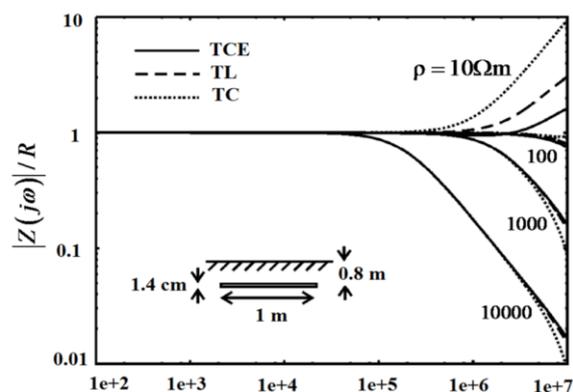


Figura 5 - Módulo da impedância harmônica normalizada com a resistência de baixa frequência para um eletrodo horizontal de 1m.

Fonte: Adaptado de [9].

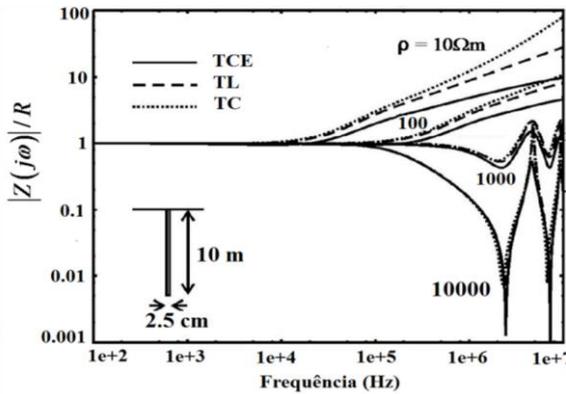


Figura 6 – Módulo da impedância harmônica normalizada com a resistência de baixa frequência para um eletrodo vertical de 10 m.

Fonte: Adaptado de [9].

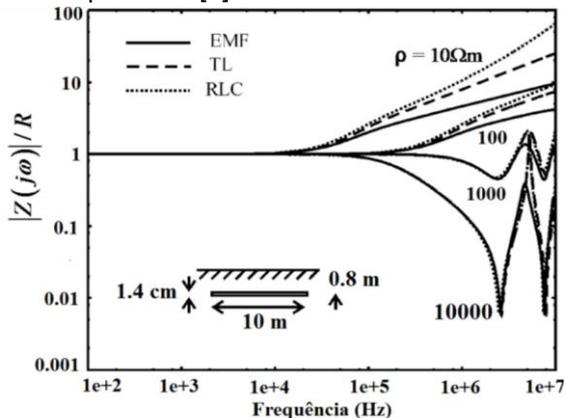


Figura 7 - Módulo da impedância harmônica normalizada com a resistência de baixa frequência para um eletrodo horizontal de 10 m.

Fonte: Adaptado de [9].

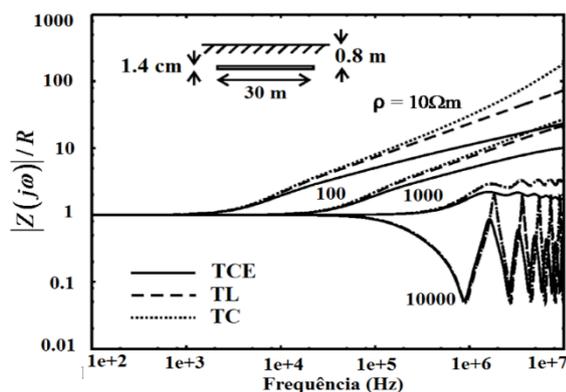


Figura 9 - Módulo da impedância harmônica normalizada com a resistência de baixa frequência para um eletrodo horizontal de 30 m.

Fonte: Adaptado de [9].

Figura 7 e a Figura 9 estão organizadas de forma semelhante, porém o eletrodo de aterramento é

horizontal (1.4cm de diâmetro, enterrado a uma profundidade de 0.8 m). Comparando os resultados obtidos fica evidente que as respostas dos aterramentos são muito semelhantes em toda a faixa de frequência. As figuras mostram também que, em todas as situações, existe uma frequência limite abaixo da qual o valor da impedância é constante independentemente da frequência ($|Z| \approx R$). Acima desta frequência existe dependência, tendo a resposta características indutivas ($|Z| > R$) ou capacitivas ($|Z| < R$). Geri [13] chamou esse ponto de transição de frequência característica. Sendo definida a partir do modelo TC. Grcev [8] também propôs uma fórmula para a frequência característica, contudo a partir do modelo TCE. Fica clara, também, a forte dependência da resistividade do solo na definição das características indutivas/capacitivas da resposta do aterramento. Entretanto, a observação de maior relevância, no contexto deste trabalho de TCC é o fato de que em todas as situações os resultados obtidos a partir do modelo TL e do modelo TCE tornam-se mais próximos à medida que a resistividade do solo aumenta. Como se pode verificar nos gráficos, para valores de resistividade do solo maiores que 1000 Ωm os resultados obtidos pelos modelos TL e TCE já são bem próximos.

Alípio [7], em sua dissertação de mestrado, também faz um estudo sobre a resposta de aterramentos a correntes elétricas. Neste trabalho o autor avalia amplamente os modelos desenvolvidos a partir da teoria de circuitos, da teoria de linhas de transmissão e da teoria de campos eletromagnéticos e opta por utilizar este último devido à menor necessidade de simplificações, à elevada consistência física e robustez matemática oferecida por esta técnica. Ao longo do trabalho é feita uma comparação entre os resultados obtidos a partir do modelo proposto, baseado na teoria de campos, e de outro que é baseado na teoria de circuitos. Em uma de suas análises um aterramento é constituído por uma haste de 3 m de comprimento, raio

de 1,25 cm e solo com valores de resistividades de 1000 Ωm e 2000 Ωm . A permissividade elétrica relativa considerada é 10. A Figura 10 e a Figura 11 mostram os resultados obtidos para o módulo da impedância, observando-se uma ótima concordância em praticamente toda a faixa de frequência considerada. É importante ainda mencionar que o autor também apresenta as curvas dos ângulos das impedâncias para ambos os casos, omitidas aqui, tendo sido verificada, também, uma ótima concordância.

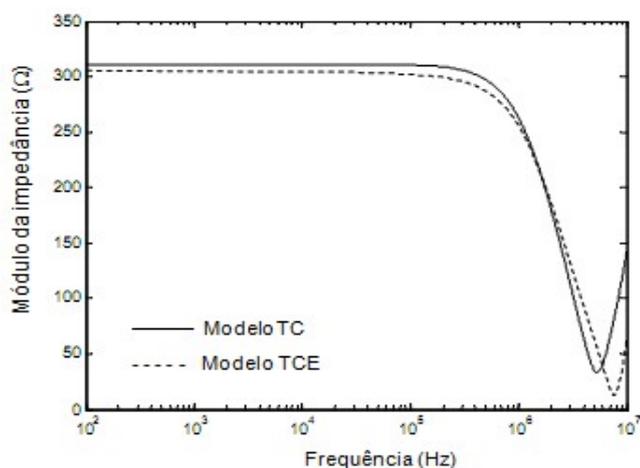


Figura 10 – Módulo da impedância de aterramento para uma haste em solo de resistividade.

Fonte: Adaptado de [7].

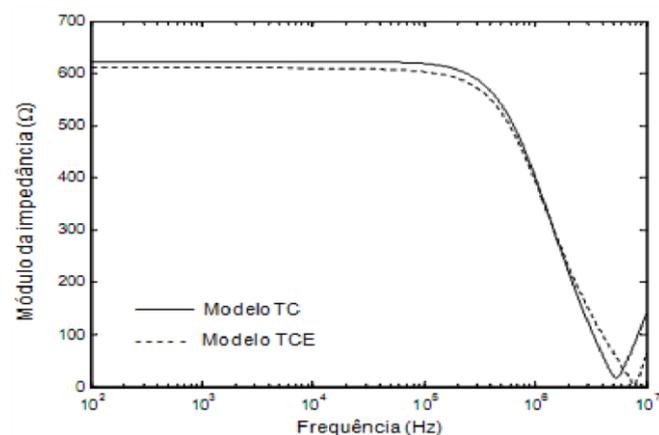


Figura 11 – Módulo da impedância de aterramento para uma haste em solo de resistividade.

Fonte: Adaptado de [7].

Na Figura 10 e na Figura 11 também são observadas diferenças de valores para frequências acima de 4 MHz. Isso, contudo, não compromete as análises envolvendo eventos impulsivos associados a descargas atmosféricas. Como bem observou Alípio, a

faixa de frequência para ondas típicas de corrente de descargas variam entre 100Hz a 1MHz, estando bem abaixo daquela em que as diferenças acontecem. Essa condição fica mais evidente quando se avalia a sobretensão transitória resultante da injeção de uma onda de corrente impulsiva em uma haste de aterramento vertical modelada a partir da teoria de campos e da teoria de circuitos. A Figura 12 ilustra a resposta no domínio do tempo de um aterramento constituído por uma haste imersa em um solo de resistividade 2000 Ωm quando submetido a uma corrente com tempo de frente de 0,7 μs e meia onda de 20 μs . Observa-se que os resultados obtidos a partir de ambos os modelos apresentam excelente concordância.

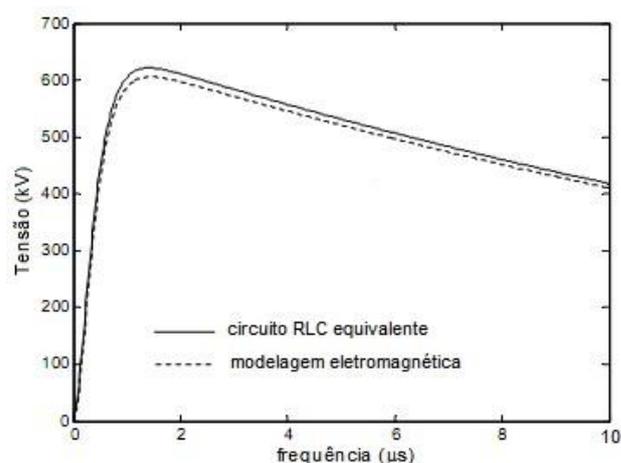


Figura 12 - Resposta transitória do aterramento constituído por uma haste.

Fonte: Retirado de [7].

Cabe finalmente destacar que, apesar desta comparação ter sido realizada utilizando-se um eletrodo relativamente pequeno, o autor, em outro trabalho [14] chegou a resultados bastante similares onde a comparação foi realizada utilizando-se hastes maiores.

Considerando as dificuldades tanto técnicas como muitas vezes operacionais, ainda são relativamente poucos os estudos disponíveis envolvendo medições da resposta de aterramento a corrente elétrica impulsivas. Grcev e Arnautovski [15] fizeram uma análise comparativa dos resultados obtidos por meio de

medições e os obtidos por meio de simulações. Na modelagem teórica foram considerados os desenvolvidos a partir da teoria eletromagnética, da teoria de circuitos e da teoria de linhas. Os dados experimentais utilizados na comparação foram obtidos pela Electricité de France (EDF), resultado de um extenso registro de medições de campo.

Citando apenas a análise de maior interesse, os autores consideram um aterramento caracterizado por um eletrodo vertical de cobre com 16 m de comprimento e área de seção de 50 mm² inserido em um “poço” com 62 mm de diâmetro. O espaço entre a haste e a terra é preenchido com bentonita e água. A resistividade dessa mistura semilíquida é de 1 Ωm e a do solo é de 1300 Ωm . Para a simulação foi considerada uma resistividade equivalente do conjunto no valor de 450 Ωm e uma permissividade elétrica relativa igual a 10. A Figura 13 mostra que os resultados obtidos a partir dos modelos teóricos apresentam excelente proximidade com os dados de medições, sobretudo para aquele modelo que teve como base a teoria de linhas. Este resultado, de certa forma, chega mesmo a ser surpreendente, já que sabidamente os modelos com aproximação por teoria de campos são fisicamente mais rigorosos. Por outro lado, fica evidente o fato de que a precisão desejada em soluções de engenharia, dependendo da aplicação, pode vir acompanhada de certa flexibilidade, já que ambos os modelos produziram resultados apenas aproximados daqueles medidos.

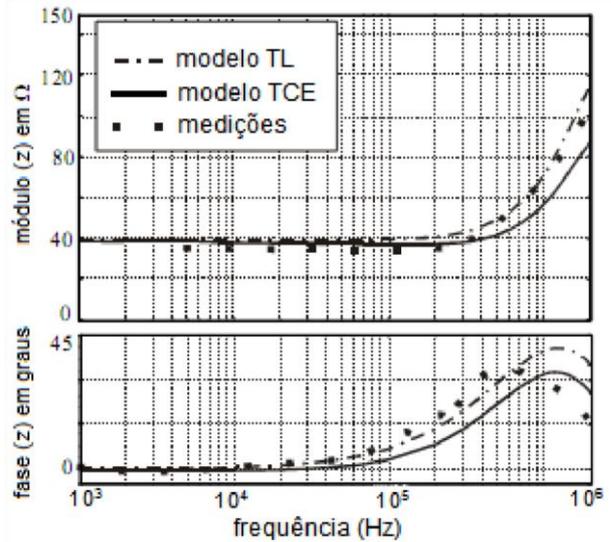


Figura 13 - Módulo e ângulo da impedância de aterramento, simulada e medida.

Fonte: Retirado [15].

Conclusivamente, os trabalhos analisados neste capítulo mostram que quanto maior a resistividade do solo melhor a concordância dos resultados obtidos por meio do modelo desenvolvido a partir da teoria de linhas comparativamente ao modelo que tem por base a teoria campos. Também foi verificada boa concordância de resultados com as medições feitas pela EDF. Desta forma, considerando sua relativa simplicidade e boa precisão, o modelo com aproximação por teoria de linhas mostra-se bastante adequado para análises nos casos em que a resistividade do solo é elevada. Tal aspecto é de grande relevância, devido aos solos com esta característica corresponderem à maioria dos casos práticos encontrados no Brasil e, particularmente, em Minas Gerais que tem valores medianos de resistividade do solo de 2400 Ωm [16,17].

4 TEORIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO APLICADA A ELETRODOS DE ATERRAMENTOS

4.1 DESENVOLVIMENTOS

Para sinais de baixa frequência os usos de modelos com parâmetros concentrados apresentam resultados com boa precisão. Uma vantagem que apresentam é a

sua facilidade de entendimento. Entretanto, à medida que a frequência dos sinais elétricos vai aumentando, esses modelos tornam-se inadequados, pois surgem efeitos não cobertos devido às simplificações adotadas [18,19]. Nesta situação, os modelos com parâmetros distribuídos são mais indicados. Nesses modelos um condutor, na verdade, é representado por uma linha de transmissão ao longo do eixo z , sendo dividido em diversos segmentos de comprimento Δz . Cada um dos segmentos é modelado por um circuito elétrico formado por dois elementos em série (uma resistência por metro, R' , e uma indutância por metro, L') e dois elementos em paralelo (uma condutância por metro, G' , e uma capacitância por metro, C') [18,19], como mostra a Figura 14.

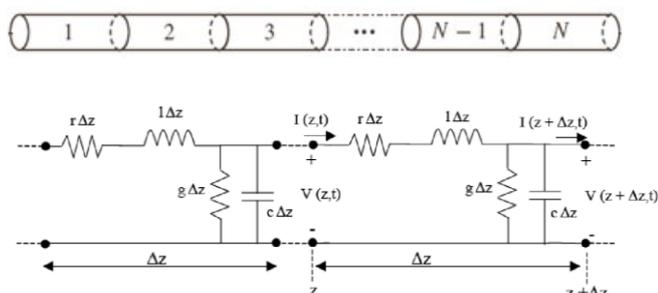


Figura 14 - Eletrodo de aterramento segmentado e sua representação através de um circuito RLCG.

Fonte: [2]

As ondas de corrente e de tensão, à medida que propagam ao longo da linha, apresentam modificações. A Figura 15 equivale a um segmento do eletrodo de aterramento no solo. Nela, observa-se que a corrente injetada se divide em uma corrente transversal, associada à dispersão de cargas para o solo, e uma corrente longitudinal, sendo está associada a efeitos de natureza resistiva e indutiva devido ao campo magnético que surge fora do condutor.

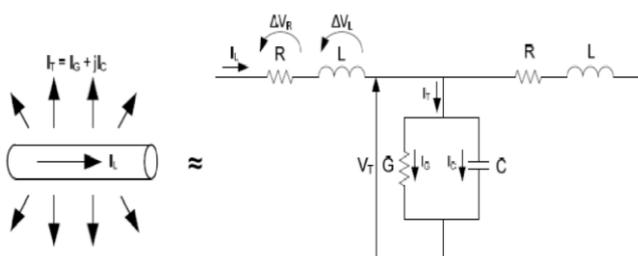


Figura 15 - Componentes de corrente no solo e circuito equivalente do aterramento.

Fonte: [2]

Analisando o modelo concentrado acima, as equações que descrevem a propagação das ondas de tensão e de corrente são deduzidas, sendo [18], [20]:

$$-\frac{\partial v}{\partial z} = Ri(z, t) + L \frac{\partial i(z, t)}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i(z, t)}{\partial z} = Gv(z, t) + C \frac{\partial v(z, t)}{\partial t}$$

Onde, R' é a resistência por metro [Ω/m]; G' é a condutância por metro [S/m]; L' é a indutância por metro [H/m] e C' é a capacitância por metro [F/m].

Para um sinal de excitação harmônico, as equações podem ser escritas em termos dos fasores de tensão e de corrente, $\hat{V}(z)$ e $\hat{I}(z)$, sendo [18], [20]:

$$-\frac{d\hat{V}}{dz} = (R + j\omega L)\hat{I}(z)$$

$$-\frac{d\hat{I}(z)}{dz} = (G + j\omega C)\hat{V}(z)$$

Diferenciando uma das equações em relação à z e substituindo na outra, as equações desacopladas fasoriais são definidas. Assim,

$$-\frac{d^2\hat{V}(z)}{dz^2} = \frac{(R + j\omega L)(G + j\omega C)\hat{V}(z)}{\gamma^2}$$

$$-\frac{d^2\hat{I}(z)}{dz^2} = \frac{(R + j\omega L)(G + j\omega C)\hat{I}(z)}{\gamma^2}$$

Onde, γ é a constante de propagação, sendo a parcela real e a imaginária correspondentes às constantes de atenuação, α , e de fase, β , respectivamente. Deve-se ressaltar que, apesar desta designação, α e β não são necessariamente constantes devido à sua dependência em relação à frequência. É importante neste ponto, mencionar que no caso em que a teoria de linhas é aplicada em eletrodos de aterramentos a resistência em série normalmente é desprezada devido a boa

condutividade dos materiais usados. Assim, a constante de propagação é deduzida, sendo:

$$\gamma = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)}$$

As soluções das equações diferenciais de segunda ordem e para a tensão e a corrente são bem conhecidas, sendo [18], [19]:

$$\hat{V}(z) = \hat{V}^+e^{-\gamma z} + \hat{V}^-e^{\gamma z}$$

$$\hat{I}(z) = \hat{I}^+e^{-\gamma z} + \hat{I}^-e^{\gamma z}$$

Onde, o superescrito positivo indica uma onda propagando no sentido crescente de z e o negativo uma onda propagando no sentido decrescente.

A relação entre a tensão e a corrente é chamada impedância característica da linha, sendo definida por [18]:

$$\hat{Z}^0 = \frac{\hat{V}^+}{\hat{I}^+} = \frac{\hat{V}^-}{\hat{I}^-} = \sqrt{\frac{j\omega L}{G + j\omega C}}$$

É importante ressaltar que para uma linha de comprimento “infinito” somente existirá propagação no sentido positivo de z . O mesmo acontece em linhas de comprimento finito, mas que tenham o valor da impedância característica igual ao valor da impedância da carga. Neste caso, há o casamento de impedância entre os dois meios (linha e carga). Quando a linha não está casada com a carga haverá reflexão de parte da onda incidente. A parcela da onda que é refletida de volta, é definida pelo coeficiente de reflexão, onde Γ_L , e:

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Sendo, o coeficiente de reflexão na carga, a impedância da carga e a impedância característica da linha.

Numa análise geral, a impedância de entrada da linha em uma posição qualquer é definida pela relação entre a tensão, $\hat{V}(z)$, e a corrente, $\hat{I}(z)$, na posição de interesse. Uma posição de particular interesse, no caso

de um eletrodo de aterramento ser modelado pela teoria de linhas, é justamente a posição $z = 0$, como mostra a Figura 16. Neste caso, a impedância de entrada da linha no ponto onde a corrente é injetada, também define a impedância do aterramento.

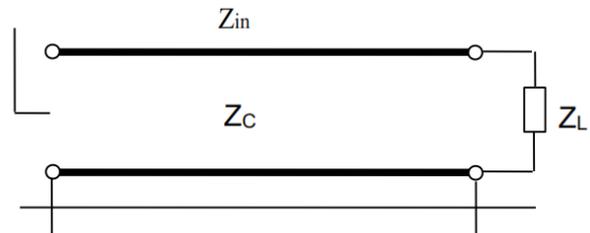


Figura 16 - Impedância de entrada em uma linha de transmissão com uma carga qualquer Z_L .

Fonte: [12]

Partindo das equações de linha de transmissão, a solução geral para a impedância de entrada é deduzida para a situação onde se tem uma carga qualquer Z_L , sendo:

$$Z_{in} = Z_0 \left(\frac{Z_L + Z_0 \tan \gamma}{Z_0 + Z_L \tan \gamma} \right)$$

Onde, a impedância de entrada, a impedância de saída, a impedância da carga, γ é a constante de propagação e o comprimento da linha de transmissão.

Entretanto, no caso de um eletrodo de aterramento, devido ao descasamento no final linha, na região de fronteira entre o eletrodo e a própria terra (solo), considera-se a linha como estando aberta (carga de alta impedância). Neste caso, a impedância de entrada passa a ser definida por:

$$Z_{in} = Z_0 \cot(\gamma)$$

É importante ressaltar que a equação Z_{in} , define a impedância de um aterramento constituído por um único eletrodo. Aterramentos constituídos por mais de um eletrodo devem incluir também os efeitos mútuos entre as partes que compõem o sistema, quando for caso [12,21].

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo, são feitas análises da resposta de um aterramento a uma corrente impulsiva com características de uma descarga atmosférica. Com base no que foi apresentado no capítulo 3, optou-se pelo uso da teoria de Linhas de transmissão para modelar os eletrodos de aterramento e produzir os resultados. A escolha deste método deve-se a sua relativa simplicidade e a possibilidade de uso de ferramenta computacional comum para simular o comportamento deste aterramento. Toda a implementação foi feita no software Mathcad, por permitir a escrita de expressões matemáticas de forma bem mais simples que em outros ambientes computacionais como o Matlab, por exemplo. Os desenvolvimentos são feitos, basicamente, a partir da teoria de linhas de transmissão e da transformada de Fourier direta e inversa. São feitas análises no domínio do tempo e no domínio da frequência considerando a variação de parâmetros como o comprimento do eletrodo e a resistividade do solo. É importante ressaltar que nas análises a seguir as correntes são relativamente baixas, não sendo considerada a ionização do solo. Além disso, o solo é considerado homogêneo. Análises que considerem tanto a ionização do solo como a sua estratificação ficam como sugestão para trabalhos futuros.

5.2 MODELAGEM E CARACTERÍSTICAS DO ATERRAMENTO

O aterramento estudado neste trabalho apresenta características de um aterramento usado em linhas de transmissão, como mostra a Figura 17. A malha é composta por quatro eletrodos (contrapesos) tipo aço-cobre 4 AWG (5,2 mm de diâmetro) que estão enterrados a 0,5 m de profundidade e que estão interconectados pela estrutura da torre. A fundação da torre não é considerada.

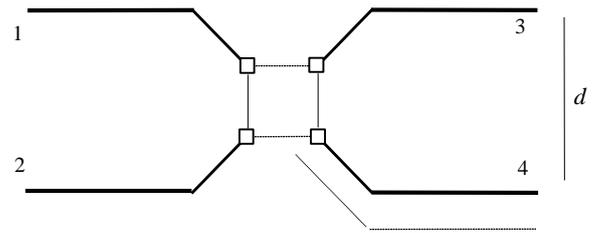


Figura 17 - Configuração de malha de aterramento analisada.

Fonte: [22]

Para garantir confiabilidade aos resultados é necessário que o modelo computacional do arranjo seja devidamente validado. Nesse sentido, será usado o modelo já validado apresentado em [22]. Este modelo também foi usado em [23,24,25]. A modelagem é feita usando a teoria de linhas de transmissão, sendo apresentada sucintamente a seguir.

Na Figura 18 é apresentado a modelagem de um par de eletrodos paralelos, o que equivale aos contrapesos 3 e 4 da Figura 17.

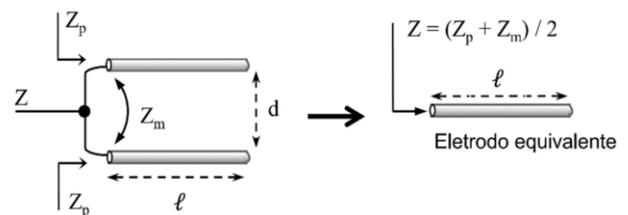


Figura 18 - Impedância de aterramento, Z , constituído por dois eletrodos e o seu equivalente.

Fonte: [22]

O modelo mostra que um par de cabos contrapeso pode ser avaliado a partir de um único eletrodo equivalente, sendo a sua impedância, Z , definida por:

$$Z = \frac{(Z_p + Z_m)}{2}$$

Onde, Z é a impedância do aterramento, Z_p é a impedância própria de um eletrodo e Z_m é a impedância mútua entre o par de eletrodos.

A impedância própria, a impedância característica e a constante de propagação são calculadas a partir das

equações abaixo. Os parâmetros elétricos da linha, por unidade de comprimento, são calculados a partir das equações clássicas propostas por Sunde [26], onde:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2\pi}{r} \right) - 1 \right] [H/m]$$

$$G' = \frac{\pi}{\rho \cdot \left[\ln \left(\frac{2}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]} [S/m]$$

$$C' = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{2}{\sqrt{2rh}} \right) - 1} [F/m]$$

Sendo, L' o comprimento do eletrodo (m), r o raio do eletrodo (m), h a profundidade na qual o eletrodo é enterrado (m), μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo (H/m), ϵ_0 a permissividade elétrica no vácuo (F/m), ϵ_r a permissividade elétrica relativa.

Para o cálculo da impedância mútua o procedimento é o mesmo anterior, sendo feita uma única alteração. Nas equações, e o raio do eletrodo é substituído pela distância entre os eletrodos. Então, a impedância mútua, a impedância característica e a constante de propagação são calculadas, também, a partir das equações, G' e C' , respectivamente. A impedância de aterramento da LT considerando os eletrodos 1, 2, 3 4 é, então, definida por:

$$Z = \frac{(Z_p + Z_m)}{4}$$

Já que os pares de eletrodos 1-2 e 3-4 estão, do ponto de vista da análise de circuitos elétricos, em paralelo, como mostra a Figura 19. Portanto, a impedância de aterramento do arranjo apresentado na Figura 17 é calculada a partir da equação anterior.

Figura 19 - Arranjo para a definição da impedância de aterramento do arranjo apresentado.

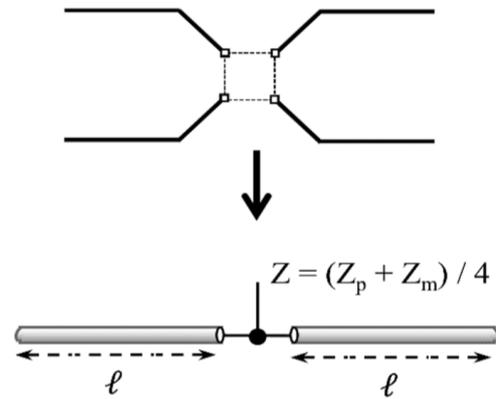


Figura 19 - Arranjo para a definição da impedância de aterramento do arranjo apresentado.

Fonte: [22]

5.3 CARACTERÍSTICAS DA ONDA DE CORRENTE APLICADA NA MALHA DE ATERRAMENTO

Na seção anterior foi apresentado o modelo para o cálculo da impedância do aterramento estudado. É importante observar que a impedância é calculada para cada frequência de interesse. Portanto, é fundamental definir qual é essa faixa de frequências. Obviamente, esses valores estão associados às componentes de frequências existentes na onda de corrente que será aplicada no aterramento. Neste trabalho, a corrente será modelada por uma função dupla exponencial devido a sua boa representatividade para a onda real de uma descarga atmosférica, sendo:

$$i(t) = I_0(e^{\alpha t} - e^{\beta t})$$

Onde, t , α e β são parâmetros ajustados para que a onda dupla exponencial tenha amplitude, tempo de frente e tempo de cauda desejados. A seguir é feita uma análise de duas ondas. As ondas escolhidas têm tempo de frente de 1,2 μs e 3 μs por serem consideradas representativas para, respectivamente, a primeira descarga de retorno e para as descargas subsequentes. Descargas com essas características foram medidas na Estação do Morro do Cachimbo, em Belo Horizonte/MG [17]. O tempo de cauda da onda tem pouca influência na resposta transitória do aterramento, sendo definido um valor de 20 μs para

essa característica [17]. A amplitude das ondas será de 1 kA. As formas de onda são apresentadas na Figura 20.

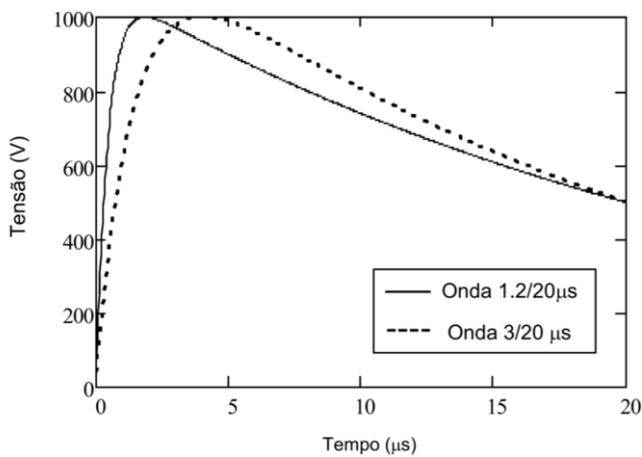


Figura 20 - Formas de ondas de correntes.
Fonte: Elaborada pelos autores.

O conteúdo espectral é definido aplicando a transformada de Fourier nas ondas. O resultado é apresentado na Figura 21, onde se verifica que as componentes de frequência chegam ao máximo de 1 MHz para o caso da onda mais rápida de 1,2/20 µs. Como a impedância é dependente da frequência, neste trabalho será usada a onda mais rápida por ela conter um maior espectro de frequências.

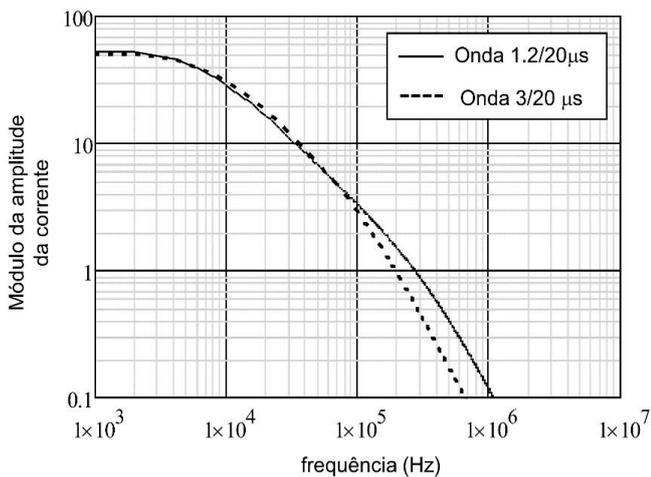
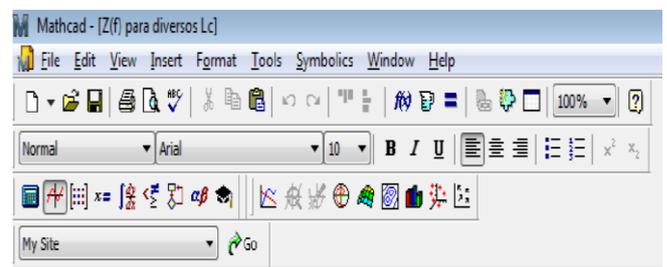


Figura 21 - Conteúdo espectral das ondas de corrente.
Fonte: Elaborada pelos autores

5.4 IMPEDÂNCIA NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Para o cálculo da impedância no domínio da frequência, inicialmente são calculados os parâmetros

indutância, capacitância e condutância, por unidade de comprimento, utilizando as equações apresentadas na seção 5.2. Com a definição destes parâmetros, a impedância característica e a constante de propagação também podem ser calculadas. Conhecendo-se as características do aterramento, a impedância de aterramento finalmente pode ser calculada para cada uma das frequências de interesse. Na seção 5.3 ficou definido que essas frequências chegam a 1 MHz. Nas análises seguintes será, portanto, considerada a faixa entre 100 Hz a 1 MHz. A Figura 22, mostra de forma ilustrativa um print da tela do programa utilizado para simulações, Mathcad.



$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \times 10^{-7} \quad \epsilon_0 := 8.85418781761 \times 10^{-12}$$

$$L_h(Lc, r) := \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln\left(\frac{2Lc}{r}\right) - 1 \right)$$

$$G_h(Lc, r, h, \rho) := \frac{\pi}{\rho \left(\ln\left(\frac{2Lc}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}}\right) - 1 \right)}$$

$$C_h(Lc, r, h, \epsilon r) := \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon r}{\left(\ln\left(\frac{2Lc}{\sqrt{2 \cdot r \cdot h}}\right) - 1 \right)}$$

$$Z_{02}(Lpuc, Gpuc, Cpuc, f) := \sqrt{\frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Lpuc}{Gpuc + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Cpuc}}$$

$$\gamma_2(Lpuc, Gpuc, Cpuc, f) := \sqrt{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Lpuc \cdot (Gpuc + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Cpuc)}$$

$$Z_2(Lpuc, Gpuc, Cpuc, f, Lc) := Z_{02}(Lpuc, Gpuc, Cpuc, f) \cdot \coth(\gamma_2(Lpuc, Gpuc, Cpuc, f) \cdot Lc)$$

$$f := 100, 200 \dots 1 \cdot 10^6$$

Figura 22 - Tela da simulação da impedância no domínio da frequência no Mathcad
 Fonte: Elaborada pelos autores.

5.4.1 INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DE ELETRODO

Os gráficos da impedância no domínio da frequência são muito importantes por evidenciarem de forma clara as características condutivas e reativas (capacitivas e indutivas) do aterramento. A faixa de frequência considerada é aquela representativa para uma descarga atmosférica, como visto na seção 5.3. Neste caso são considerados diversos comprimentos de contrapesos para uma única resistividade do solo fixada em 2100 Ω.m.

A Figura 23 mostra a resposta em frequência (módulo e ângulo) do aterramento, onde se pode notar a existência de uma região onde ocorre a transição da resposta de baixas frequências para altas frequências. Essa transição ocorre, aproximadamente, na frequência de 10 kHz, onde a resposta deixa de ser puramente resistiva e passa a apresentar características indutivas e capacitivas.

Na região das baixas frequências, observa-se que o módulo da impedância é constante e o ângulo de fase predomina próximo de zero, características essas de uma resistência. Considerando essa análise fica evidente que em baixas frequências o aterramento é caracterizado apenas pela resistência de aterramento. Observa-se também que, quanto maior o contrapeso (comprimento do eletrodo) menor é o módulo da impedância, conseqüentemente, menor a resistência de aterramento. Contudo, fica clara, também, a existência de um comprimento acima do qual essa redução passa a não ser mais significativa.

Na região das frequências mais altas, observa-se que o aterramento apresenta características capacitivas e indutivas devido ao ângulo da impedância assumir valores ora positivos e ora negativos. Neste caso, quanto menor o comprimento do eletrodo, maiores são

as características capacitivas. À medida que esse comprimento aumenta, as características indutivas passam a ser predominantes.

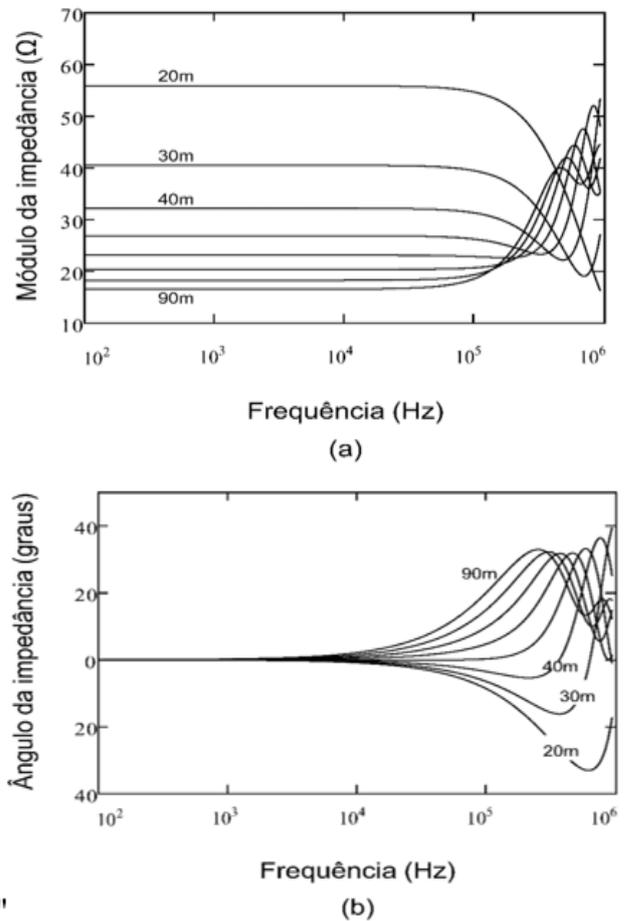


Figura 23 – Impedância de aterramento, (a) módulo e (b) ângulo, no domínio da frequência variando o comprimento do eletrodo para um solo com resistividade fixa em 2100 Ω.m.

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.4.2 INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Para as análises dos gráficos da Figura 24, foi fixado um eletrodo de comprimento de 30 m, sendo variado os valores das resistividades do solo entre 800Ω.m e 10.000Ω.m. As curvas mostram características semelhantes aquelas apresentadas na seção anterior, onde fica evidente a existência de duas regiões bem distintas, sendo uma menor que 10 kHz (baixas frequências) e outra acima de 10 kHz (altas frequências).

Nesse caso, como os parâmetros comprimento, raio e profundidade são fixos, não há variação da capacitância por metro do eletrodo independentemente do valor da resistividade. Isso já acontece com o parâmetro condutividade por metro, que varia à medida que a resistividade varia. Portanto, a variação do parâmetro resistividade do solo leva a alterações apenas no valor da corrente de condução (condutância), mas não na corrente de deslocamento (capacitiva). Entretanto, claro, a resposta também depende da frequência. De modo geral, as curvas mostram que, para um mesmo comprimento de eletrodo, quanto maior a resistividade do solo, maior é a resistência de aterramento ($f < 10$ kHz). Entretanto, se considerado a impedância, o valor irá depender da frequência, pois na região de altas frequências o módulo da impedância ora é menor, ora é maior que o valor da resistência.

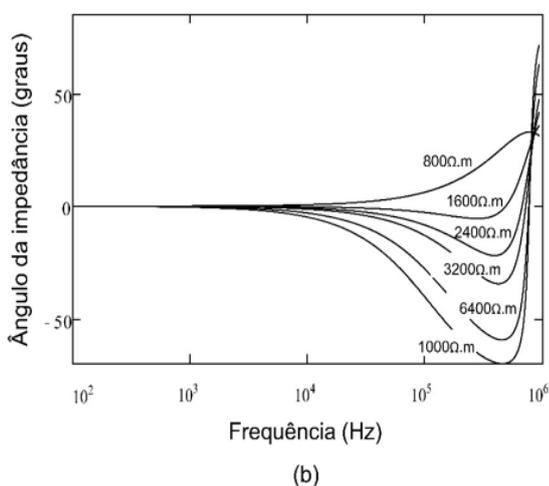
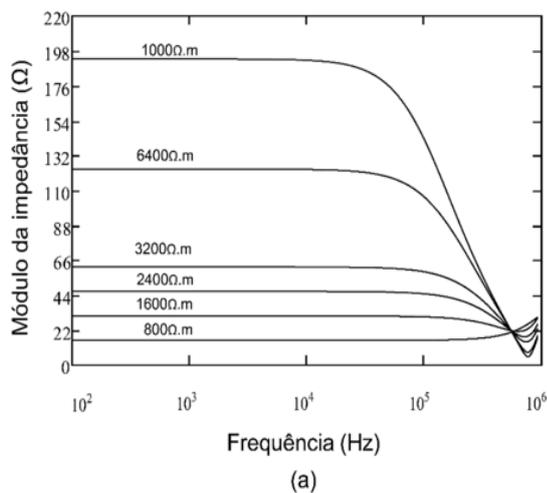


Figura 24 - Impedância de aterramento em módulo (a) e ângulo (b) no domínio da frequência variando a resistividade do solo para um eletrodo de 30m. Fonte: Elaborada pelos autores.

5.5 TENSÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO

A tensão no domínio do tempo é definida usando a Transformada de Fourier. Inicialmente é feita a Transformada da onda de corrente, sendo definidas as suas componentes de frequência, ω . A impedância de aterramento é calculada para cada frequência, Z , tal como foi feito na seção anterior. O produto entre a impedância e a corrente define, então, uma tensão no domínio da frequência, onde:

$$V_{(\omega)} = Z_{(\omega)} \cdot I_{(\omega)}$$

Onde, Z é a impedância no domínio da frequência e I é a corrente no domínio da frequência. A tensão no domínio do tempo pode então, finalmente, ser definida pela Transformada Inversa de Fourier, sendo:

$$v_{(t)} = \mathfrak{F}^{-1}[\mathfrak{F}(i) \cdot Z(\omega)]$$

Onde, \mathfrak{F} é a transformada de Fourier da corrente e Z é a impedância no domínio da frequência. A imagem abaixo ilustra o procedimento, sendo apresentado parte dos vetores $Z1$, $I1$ e $V1$.

$Z_1 =$

	0
0	$21.291 \cdot 10^0 + 254.097j \cdot 10^{-6}$
1	$21.291 \cdot 10^0 + 2.541j \cdot 10^{-3}$
2	$21.291 \cdot 10^0 + 5.082j \cdot 10^{-3}$
3	$21.291 \cdot 10^0 + 7.623j \cdot 10^{-3}$
4	$21.291 \cdot 10^0 + 10.164j \cdot 10^{-3}$
5	$21.291 \cdot 10^0 + 12.706j \cdot 10^{-3}$
6	$21.291 \cdot 10^0 + 15.247j \cdot 10^{-3}$
7	$21.291 \cdot 10^0 + 17.789j \cdot 10^{-3}$
8	$21.291 \cdot 10^0 + 20.332j \cdot 10^{-3}$
9	$21.29 \cdot 10^0 + 22.874j \cdot 10^{-3}$
10	$21.29 \cdot 10^0 + 25.417j \cdot 10^{-3}$
11	$21.29 \cdot 10^0 + 27.961j \cdot 10^{-3}$
12	$21.29 \cdot 10^0 + 30.505j \cdot 10^{-3}$
13	$21.29 \cdot 10^0 + 33.049j \cdot 10^{-3}$
14	$21.29 \cdot 10^0 + 35.594j \cdot 10^{-3}$
15	...

$I_1 =$

	0
0	$27.456 \cdot 10^0$
1	$26.754 \cdot 10^0 - 4.372j \cdot 10^0$
2	$24.845 \cdot 10^0 - 8.13j \cdot 10^0$
3	$22.195 \cdot 10^0 - 10.92j \cdot 10^0$
4	$19.298 \cdot 10^0 - 12.7j \cdot 10^0$
5	$16.508 \cdot 10^0 - 13.634j \cdot 10^0$
6	$14.008 \cdot 10^0 - 13.954j \cdot 10^0$
7	$11.862 \cdot 10^0 - 13.869j \cdot 10^0$
8	$10.06 \cdot 10^0 - 13.536j \cdot 10^0$
9	$8.563 \cdot 10^0 - 13.065j \cdot 10^0$
10	$7.324 \cdot 10^0 - 12.528j \cdot 10^0$
11	$6.298 \cdot 10^0 - 11.968j \cdot 10^0$
12	$5.444 \cdot 10^0 - 11.411j \cdot 10^0$
13	$4.73 \cdot 10^0 - 10.873j \cdot 10^0$
14	$4.13 \cdot 10^0 - 10.361j \cdot 10^0$
15	...

$V_1 =$

	0
0	$584.56 \cdot 10^0 + 6.976j \cdot 10^{-3}$
1	$569.626 \cdot 10^0 - 93.008j \cdot 10^0$
2	$529.01 \cdot 10^0 - 172.977j \cdot 10^0$
3	$472.643 \cdot 10^0 - 232.322j \cdot 10^0$
4	$411.007 \cdot 10^0 - 270.187j \cdot 10^0$
5	$351.631 \cdot 10^0 - 290.079j \cdot 10^0$
6	$298.462 \cdot 10^0 - 296.886j \cdot 10^0$
7	$252.8 \cdot 10^0 - 295.059j \cdot 10^0$
8	$214.462 \cdot 10^0 - 287.978j \cdot 10^0$
9	$182.618 \cdot 10^0 - 277.969j \cdot 10^0$
10	$156.258 \cdot 10^0 - 266.539j \cdot 10^0$
11	$134.416 \cdot 10^0 - 254.624j \cdot 10^0$
12	$116.252 \cdot 10^0 - 242.781j \cdot 10^0$
13	$101.07 \cdot 10^0 - 231.326j \cdot 10^0$
14	$88.304 \cdot 10^0 - 220.428j \cdot 10^0$
15	...

Figura 25 - Tensão gerada pelo produto da impedância e da corrente no domínio da frequência.
 Fonte: Elaborada pelos autores.

As análises das tensões que se desenvolvem nas entradas dos aterramentos são importantes, uma vez que evidenciam o que pode ser gerado por uma descarga atmosférica. A tensão desenvolvida é um fator determinante que pode afetar, por exemplo, o bom desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Na Figura 26, são apresentadas curvas de tensões quando o aterramento é submetido a uma onda de corrente impulsiva (1,2/20 μ s). Considerando eletrodos com comprimentos que são bem representativos para muitas linhas de transmissão de diversas companhias de energia, foi feita uma verificação da influência deste parâmetro (comprimento) na resposta do aterramento. Nesta análise constata-se que o aumento do comprimento do eletrodo leva a uma diminuição da tensão desenvolvida. Isto sempre irá ocorrer qualquer que seja o valor da resistividade do solo. Contudo, existe um comprimento máximo a partir do qual o seu aumento não mais leva a uma diminuição no valor de pico da tensão desenvolvida. Nos casos estudados, esses valores são de, aproximadamente, 35 m, 45 m e 55 m para solos de 800 Ω .m, 1600 Ω .m, 2100 Ω .m, respectivamente. Verifica-se, também, para um mesmo comprimento de eletrodo, a tensão será cada vez maior à medida que a resistividade do solo aumenta.

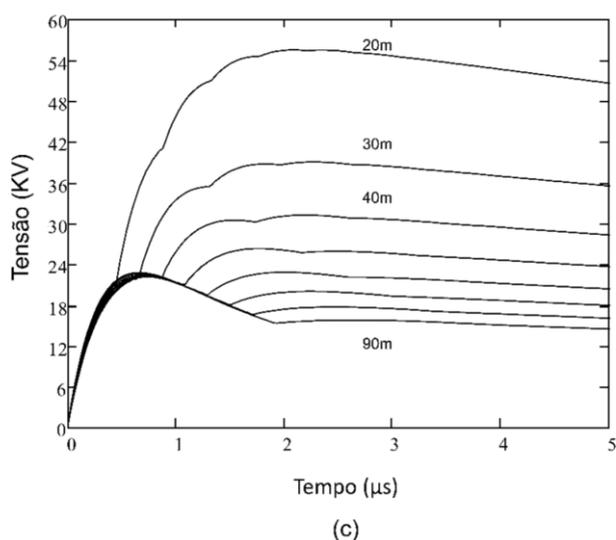
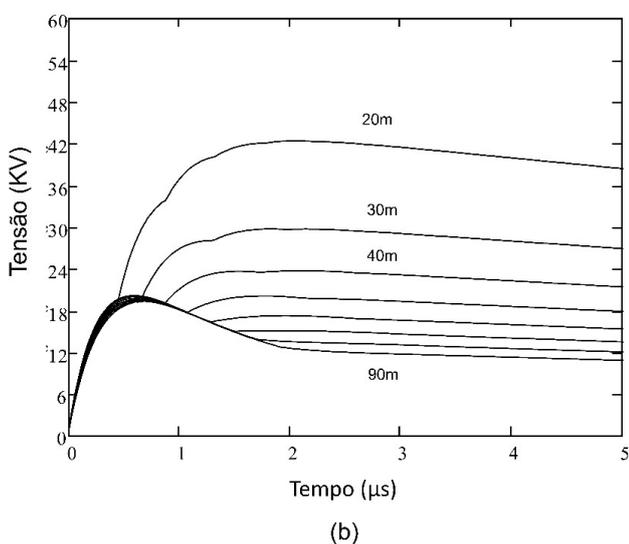
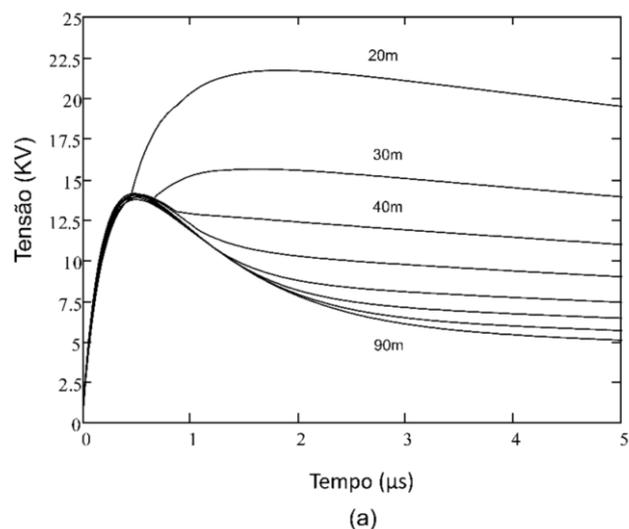


Figura 26 – Resultado da tensão no ponto de entrada do aterramento quando submetido a uma onda rápida de corrente de 1,2/20μs, com resistividades de (a) 800Ω.m, (b) 1600 Ω.m e (c) 2100 Ω.m.

Fonte: Elaborada pelos autores.

5.6 IMPEDÂNCIA IMPULSIVA E COMPRIMENTO EFETIVO

A Figura 27 mostra as curvas da impedância impulsiva para diversos comprimentos de eletrodo enterrados em solos de diferentes resistividades. Os valores das resistividades foram escolhidos de forma que fossem representativos para as condições dos solos encontrados no Brasil. Em todos os casos avaliados verifica-se que o valor da impedância impulsiva diminui à medida que o comprimento do eletrodo aumenta, até certo limite. A partir deste valor limite de comprimento a impedância é praticamente constante. Cita-se como exemplo a situação em que a resistividade do solo é de 1600 Ωm. Neste caso, o comprimento limite é de aproximadamente 50 m, como indicado na curva. Tais características estão associadas ao chamado comprimento efetivo do eletrodo. Este representa o comprimento máximo a partir do qual não há mais diminuição no valor da impedância impulsiva. Os resultados mostram, portanto, que o uso de eletrodos maiores que o comprimento efetivo representa desperdícios quando no aterramento incide uma onda de corrente é impulsiva. Outra característica observada é o aumento do comprimento efetivo à medida que a resistividade do solo também aumenta. Isto é facilmente entendido, já que com o aumento da resistividade do solo a corrente precisa percorrer um comprimento maior de eletrodo para ser totalmente dissipada no solo. De modo contrário, a diminuição da resistividade favorece a dispersão de cargas no solo de forma que aquela corrente que entra e propaga no eletrodo rapidamente será atenuada.

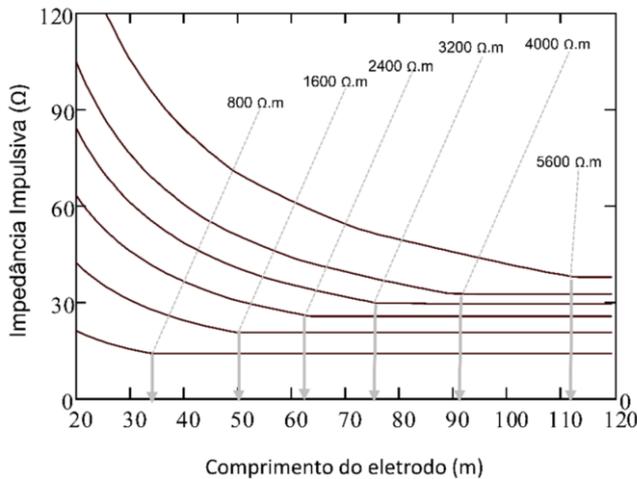


Figura 27 - Impedância impulsiva x Comprimento do eletrodo.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Apesar da natureza impulsiva da onda de corrente, muitos projetos de proteção contra descargas atmosféricas são baseados em medições da resistência de aterramento com equipamentos que fazem uso de sinais de frequência relativamente baixos. Para evidenciar as diferenças existentes entre a resposta do aterramento a uma corrente impulsiva e a uma corrente de baixa frequência, também foi gerado o gráfico Resistência versus Comprimento do eletrodo, como mostra a Figura 28. O cálculo da resistência de aterramento para a configuração de eletrodos estudada é baseado em informações também apresentadas em [22], onde:

$$R_g = \frac{(R_p + R_m)}{4}$$

Sendo, R_p a resistência própria de um eletrodo e R_m a resistência mútua entre um par de eletrodos paralelos. Os procedimentos para o cálculo da resistência são similares aos apresentados para o cálculo da impedância de aterramento. Neste caso, contudo, a resistência para um eletrodo horizontal (contrapeso) é definido por:

$$R = \frac{\rho}{\pi^2} \left[\ln \left(\frac{2\ell}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]$$

Onde, ρ é a resistividade do solo, ℓ é o comprimento do eletrodo, r é o seu raio e h a profundidade na qual foi enterrado.

No gráfico da Figura 28, de imediato, verifica-se uma diferença fundamental se comparada à resposta do aterramento a uma corrente impulsiva: aumentando-se o comprimento do eletrodo, o comprimento efetivo não é alcançado. O valor da resistência sempre diminui à medida que o comprimento aumenta. É importante observar, contudo, que a diminuição da resistência acontece em proporções cada vez menores de forma que a efetividade do aumento do comprimento é cada vez menor. Como exemplo, cita-se o caso em que a resistividade do solo é 2400 Ωm. Para o comprimento de 20 m, a resistência é de 64 Ω. Dobrando o comprimento (40 m), a resistência cai para 37 Ω (redução de 42%). Aumentado o eletrodo para 60 m (triplicando o comprimento), a resistência cai para 27 Ω (redução de 27% em relação ao comprimento de 40 m). Para 80 m, a resistência é de 25,7 Ω, indicando que a redução já é muito pequena. Portanto, o aumento do comprimento do eletrodo, mesmo em frequências mais baixas, requer critério.

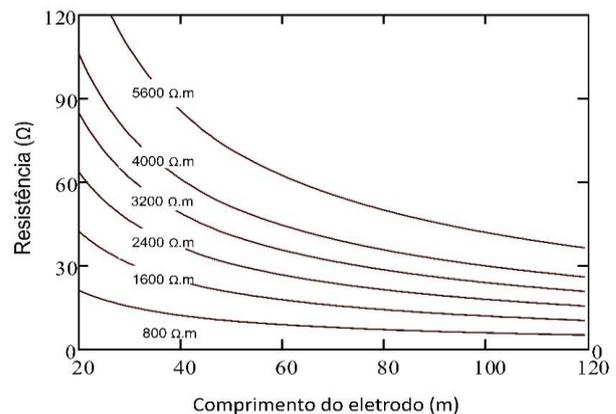


Figura 29 – Gráfico da Impedância e Resistência considerando diversas resistividades do solo e diferentes comprimentos de eletrodos

Fonte: Elaborada pelos autores.

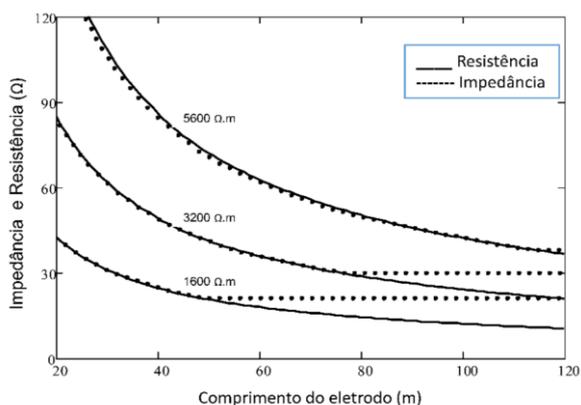


Figura 30 - Gráfico da Impedância e Resistência considerando diversas resistividades do solo e diferentes comprimentos de eletrodos

Fonte: Elaborada pelos autores.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi feita uma análise da resposta de um aterramento constituído por um arranjo de eletrodos muito usado em linhas de transmissão. As análises foram feitas nos domínios da frequência e do tempo, sendo considerados diversos valores de resistividades de solo e comprimentos de eletrodo. A modelagem feita usando a Teoria de Linhas de Transmissão mostrou-se relativamente simples de ser implementada e os recursos computacionais foram baixos, evidenciando a atratividade desta técnica em estudos semelhantes ao que foi desenvolvido neste trabalho.

De modo geral, os resultados mostraram que quando a corrente é de natureza impulsiva o aumento do comprimento do eletrodo leva a uma diminuição no valor da impedância impulsiva. Contudo, existe um limite a partir do qual o aumento desse comprimento é absolutamente inócua (comprimento efetivo), representando apenas desperdícios. Já em relação ao valor da resistência, o seu valor sempre diminui com o aumento do comprimento, contudo em proporções cada vez menores. Consequentemente, o uso da resistência como parâmetro também requer critérios.

Em projetos de proteção contra descargas atmosféricas, normalmente o valor da resistência de aterramento é usado para se ter uma expectativa do

desempenho do sistema aterrado. Os gráficos plotados no domínio da frequência mostraram que a resposta do aterramento a eventos de baixa frequência (resistência) podem ser bem distintos da resposta a um evento impulsivo (impedância). Entretanto, a análise no domínio de maior interesse aplicado, aquela que mostra as tensões desenvolvidas (domínio do tempo), mostrou que, na verdade, o valor da resistência e o da impedância impulsiva são muito próximos até que o comprimento efetivo seja atingido. Portanto, observando os limites aplicáveis, a resistência de aterramento parece ser uma boa representação da resposta do aterramento ainda que a corrente seja de natureza impulsiva. É muito importante, contudo, chamar a atenção para o fato de que algumas características do solo não foram consideradas neste trabalho, como a sua estratificação e a variação da permissividade elétrica com a frequência. Portanto, sugere-se que antes de inferir tal assertiva definitiva, estudos adicionais que incluam esses parâmetros sejam feitos para uma verificação adicional.

A resistividade é um importante parâmetro por estar diretamente relacionado com a capacidade de o solo dispersar cargas elétricas. Os resultados mostraram de forma bem clara que, para um mesmo comprimento de eletrodo, quanto maior a resistividade maior é a tensão desenvolvida no aterramento. Consequentemente, os eletrodos devem ser mais longos caso se deseje que a tensão desenvolvida seja menor.

Este trabalho foi elaborado sob as condições de homogeneidade do solo e permissividade elétrica constante. Foram consideradas também as tensões desenvolvidas apenas no ponto de entrada do aterramento. Assim, sugere-se que em trabalhos futuros sejam cobertos os seguintes aspectos:

- Analisar o comportamento da impedância considerando a variação da permissividade elétrica com a frequência
- Avaliar a influência do aterramento na tensão desenvolvida sobre a cadeia de isoladores por

ocorrência de uma descarga atmosférica incidente na linha

- Considerar a estratificação do solo

REFERÊNCIAS

1. 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.
2. 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.
3. DARVENIZA, M. Electrical Properties of Wood and Line Design. Queensland, Australia, University of Queensland Press. [S.l.]. 1980.
4. WHITEHEAD, J. T. The Lightning Performance of TVA's 500kV and 161kV Transmission Lines. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 102, n. 3, p. 752-768, mar. 1983.
5. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. 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.
6. VISACRO, S. Aterramentos Elétricos. São Paulo: Artliber, 2012. 11-12 p.
7. ALIPIO, R. S. Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. Dissertação de mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG. [S.l.]. 2008.
8. 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.
9. GRCEV, L. Modeling of grounding electrodes under lightning currents. IEEE Transactions on Electrocmagnetic Compatibility, v. 51, n. 3, p. 559-571, aug. 2009.
10. VISACRO, S. Resposta de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas. SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, 14-17 out. 2007.
11. GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse impedance of grounding grids. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-99, n. 6, p. 2357-2362, nov/dez. 1980.
12. VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, p. 381-386, jan. 2007.
13. GERI, A. Behaviour of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation. Power Delivery, IEEE Transactions on, v. 14, n. 3, p. 1008-1017, Jul. 1999.
14. ALIPIO, R. S.; OLIVEIRA, M. L. F.; SCHROEDER, M. A. O. A discussion of circuit equivalents of a vertical ground rod. Proceedings of International Conference on grounding and earthing and 3o International Conference on lighting physics and effects (GROUND'2008 and 3o LPE), Florianopolis, Brasil, nov. 2008.
15. GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI, V. Comparison between simulation and measurement of frequency dependent and transient characteristics of power transmission line grounding. Proceedings of 24th International Conference on Lightning protection (ICLP'98), Birmingham, U.K., set. 1998. v.1, p.524-529.
16. SOARES JUNIOR, A. Investigação do comportamento dos aterramentos típicos de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Dissertação de mestrado. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG). [S.l.]. Dez. 1996.
17. SCHROEDER, M. A. O. Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do morro do cachimbo. Tese de Doutorado. Centro de Pesquisa e

Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG). [S.I.]. Mar. 2001.

18. PAUL, C. R. Introduction to Electromagnetic Compatibility. 2a. ed. Hoboken: Woley, 2006.
19. SCHMITT, R. Electromagnetics Explained. 1a. ed. Burlington, MA: Newnes, 2002.
20. WADELL, B. C. Transmission Line Design Book. Boston: Artech House Publishers, 1991.
21. 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.
22. 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.I.]. 2010.
23. LIMA, A. B. et al. Modelo para Malhas de Aterramento de Torres de Linhas de 3. Transmissão Submetidas a Descargas Atmosféricas. IEEE Power and Energy Society - T&D 2010 Latin America, São Paulo, 8-10 Nov. 2010.
24. 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.
25. PAULINO, J. O. S. et al. Transient voltage response of ground electrodes in the timedomain. ICLP 2012 – 28th International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria.
26. SUNDE, E. D. Earth conduction effects in transmission systems. New York: Dover Publications, 1968.