



GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO - GLT

USO DE CONDUTORES VERTICAIS PROFUNDOS COMO ALTERNATIVA DE ATERRAMENTO: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E APLICAÇÃO PRÁTICA

**HUDSON BONIFÁCIO DOS SANTOS(1); AMANDA BOTELHO AMARAL(1); CARLOS ERMÍDIO FERREIRA
CAETANO(1); JOSE OSVALDO PAULINO(1)
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS(1)**

RESUMO

O presente trabalho realiza um estudo experimental e teórico de arranjos de aterramento utilizando eletrodos verticais inseridos em solos multicamadas. Os resultados obtidos por meio das medições e simulações realizadas indicaram vantagens do uso de eletrodos verticais, quando comparado aos eletrodos horizontais nas condições avaliadas neste trabalho, onde a segunda camada do solo possui menor valor de resistividade elétrica. Essa conclusão, bastante conhecida para o caso da resistência de aterramento, é estendida, dentro das condições de avaliação deste trabalho, para o comportamento transitório do eletrodo, através da determinação experimental e teórica da impedância transitória de eletrodos verticais profundos.

PALAVRAS-CHAVE

Impedância de aterramento, Resistência de aterramento, Medição, Projeto de malhas.

1.0 - INTRODUÇÃO

No Brasil, as descargas atmosféricas são responsáveis por 70% dos desligamentos no sistema de transmissão de energia (1). Em solos com resistividades elevadas, onde, geralmente, os sistemas de aterramento possuem piores desempenhos, os efeitos danosos são ainda mais severos. Sendo assim, o sistema de aterramento constitui um fator relevante na investigação dos efeitos causados pela incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão. Neste contexto, o estudo mais aprofundado sobre sistemas de aterramento, para maior confiabilidade do sistema de transmissão assume caráter estratégico, visto que a interrupção do fornecimento de energia aos consumidores pode resultar em grandes prejuízos no setor industrial e de serviços, além de impactar diretamente na qualidade de vida da população e afetar setores vulneráveis, como segurança e saúde.

O Estado de Minas Gerais está localizado em uma região cujo solos superficiais são compostos majoritariamente de formações antigas, principalmente do período Pré-Cambriano. Em razão disso, a resistividade elétrica desses solos é geralmente bastante elevada, com um valor médio de resistividade próximo a 2500 Ωm (2). Portanto, projetar e construir malhas de aterramento que assegurem a confiabilidade do sistema constituem uma laboriosa tarefa.

Neste cenário, a utilização de eletrodos verticais profundos surge como uma alternativa. Alguns estudos recentes mostram que, com este tipo de arranjo, é possível se obter menores valores de impedância impulsiva de aterramento a custos relativamente baixos (3). Diversos trabalhos a respeito de configurações de aterramento com baixa impedância usando eletrodos horizontais são encontrados na literatura (4-6), mas não é comum encontrar estudos analisando o uso do eletrodo vertical profundo (7-9). Atualmente, verifica-se diferentes e avançadas tecnologias para realizar a perfuração do solo com custos reduzidos, portanto, torna-se viável considerar a implementação de eletrodos verticais profundos com um comprimento superior a 20 metros nos casos de solo estratificado em duas camadas ou mais.

O aprimoramento das técnicas de perfuração somado à diminuição dos custos de sua execução torna possível explorar uma nova configuração para o aterramento de torres, sobretudo nas condições em que a segunda camada do solo possui menor valor de resistividade. O presente trabalho apresenta um estudo do uso de eletrodos verticais como alternativa de aterramento para torres em condições de solos estratificados e que possuam a segunda camada com menor valor de resistividade elétrica. A metodologia de projeto da malha é validada por meio da comparação de simulações com resultados de medições. Uma vez validada, a técnica é aplicada ao estudo do comportamento transitório dos eletrodos verticais frente a ondas de corrente típicas de descargas atmosféricas.

Os resultados alcançados sugerem a viabilidade da utilização de eletrodos verticais como boa alternativa ao uso de cabos contrapeso convencionais nas condições em que a resistividade elétrica da segunda camada do solo for inferior à da primeira. A viabilidade do emprego de eletrodos verticais como configuração de aterramento para torres é uma contribuição de interesse para as concessionárias brasileiras.

O artigo foi organizado da seguinte forma, a Seção 1 introduz os conceitos e metodologias aplicados no estudo do uso de eletrodos verticais em arranjos de aterramentos elétricos. A Seção 2 apresenta a avaliação da resposta transitória de arranjos de aterramento utilizando eletrodos verticais, a Seção 3 apresenta estudos de casos. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 4.

2.0 - AVALIAÇÃO DA RESPOSTA TRANSITÓRIA DE UM ELETRODO VERTICAL

A avaliação da resposta de arranjos de aterramento, seja esta por meio de medições, seja por meio de simulações computacionais, é importante prática para nortear o projeto dos sistemas e circuitos elétricos de interesse, incluindo projetos de proteção, coordenação de isolamento, de verificação do estado dos ativos etc. Nesse sentido, diversas técnicas de medição (15, 16, 19) e de simulação (1, 11, 18) podem ser utilizadas, desde que se compreenda os limites de aplicação de cada uma destas técnicas dentro da caracterização da resposta pretendida. Neste trabalho se optou por utilizar, nas medições, a técnica descrita em (15), que permite avaliar o comportamento do arranjo de aterramento por meio de uma curva denominada impedância transitória. Para a realização das simulações computacionais, foi utilizado o programa computacional descrito em (7), que tem como base a teoria de linha de transmissão, cujos parâmetros são obtidos a partir do trabalho de Sunde (9).

Para o estudo experimental, foi utilizado um arranjo de medição em escala real, desenvolvido especialmente para esta pesquisa. O arranjo é composto por três diferentes trechos de cordoalha cobreada, com área de seção de 50 mm^2 . O primeiro trecho possui 18 m de comprimento e disposição vertical. O segundo trecho possui 10 metros de comprimento, disposição horizontal, e foi enterrado a 0,2 m de profundidade. A função do segundo trecho é fazer a interligação do eletrodo vertical com o terceiro trecho de eletrodo. O terceiro trecho também possui 18 m de comprimento, mas, nesse caso, foi disposto horizontalmente, enterrado a 0,2 m de profundidade. A Figura 1 – (a) apresenta maiores detalhes deste arranjo.

Para a realização do estudo experimental apresentado neste trabalho, foram feitas medições em duas épocas distintas do ano. Na primeira etapa de medições, foi realizada a caracterização do perfil de resistividade do solo e da resposta do eletrodo vertical de aterramento (18 m de comprimento). As medições desta etapa foram realizadas imediatamente após o período chuvoso, i.e., época na qual a resistividade do solo apresenta menores valores. A Figura 1 – (b) exibe o perfil da resistividade aparente do solo, obtido com a aplicação do método clássico de Frank-Wenner (17) na mesma época da primeira etapa de medições. A segunda etapa de medições foi realizada no período sem chuvas, i.e., no período do ano em que os valores de resistividade do solo são mais elevados e, portanto, resultam numa caracterização de desempenho de pior caso para o aterramento.

Como pode ser observado ao se analisar a Figura 1 – (b), o solo onde foram realizadas as medições apresenta um perfil típico de estratificação em duas camadas, em que a camada mais interna do solo possui menor resistividade elétrica. Para o caso das medições da primeira etapa, o modelo em duas camadas obtido para o solo foi: $\rho_1 = 150 \text{ } \Omega\text{m}$ e $\rho_2 = 78 \text{ } \Omega\text{m}$, as resistividades da primeira e segunda camada, respectivamente, e $h = 6 \text{ m}$, a profundidade da primeira camada do solo.

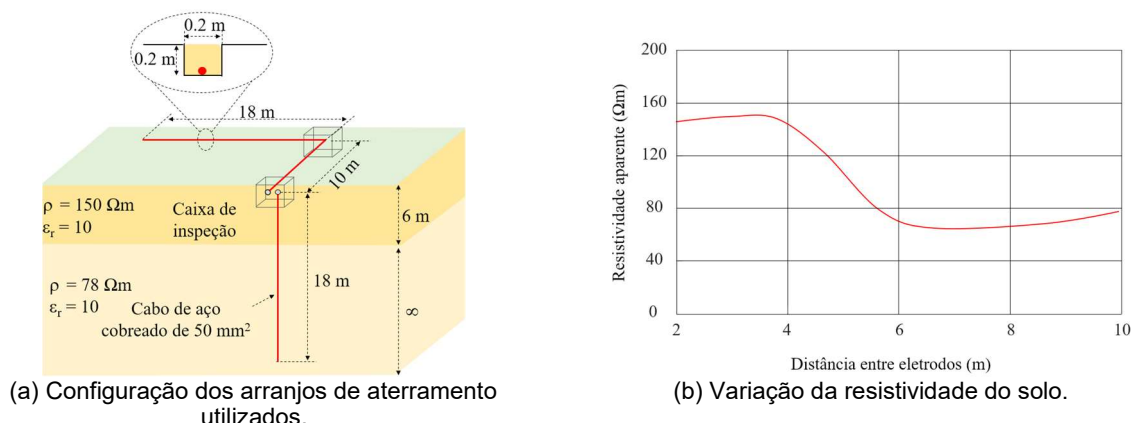


Figura 1 - Arranjos de aterramento utilizados e o perfil da resistividade do solo na região de medição.

2.2 – Resposta dinâmica de um eletrodo vertical (malha real) – Estudo experimental

A caracterização de um arranjo de aterramento sofre influência de diversos fatores, dentre eles se destacam o tipo de fenômeno solicitante, os parâmetros elétricos do solo e os parâmetros geométricos do aterramento. Desta forma, para que seja possível obter uma boa estimativa da resposta de um arranjo de aterramento real, por meio de simulação, esses fatores devem ser conhecidos com segurança. Além disso, é também fundamental se verificar a adequação do modelo de cálculo escolhido para a representação do arranjo e dos fenômenos de interesse. Esta verificação é feita, em geral, por meio de comparação dos valores obtidos por meio de cálculo com aqueles obtidos por meio de medição.

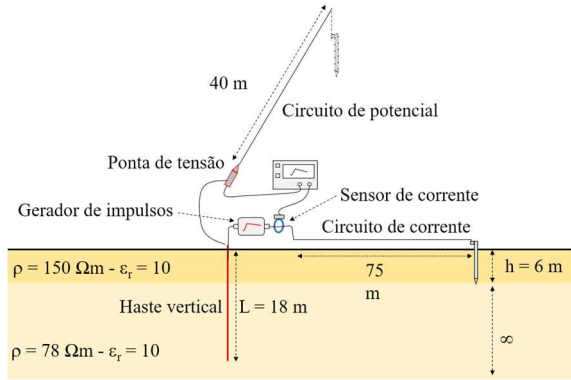
2.2.1 – Primeira etapa de medições – Período chuvoso

A primeira etapa de medições apresentada neste trabalho teve por finalidade verificar, por meio de comparação das curvas medidas com as obtidas pelo modelo de cálculo, a validade do modelo de simulação escolhido. Como mencionado anteriormente, o modelo de cálculo escolhido foi baseado na teoria de linhas de transmissão. Esse modelo tem sido adotado com boa precisão na representação de aterramentos horizontais, como mostram os trabalhos (3,7,15). Mais recentemente foram propostas adaptações (3) para que o modelo de linha pudesse ser aplicado na representação de eletrodos verticais.

Para a medição, foi considerado o sistema apresentado na Figura 2, instalado em um solo de duas camadas no campo de teste do Laboratório de Extra Alta Tensão da UFMG (LEAT/UFMG). O solo estratificado possui resistividades variando entre 50 Ωm e 250 Ωm . A forma escolhida para caracterizar, no domínio do tempo, a resposta do aterramento frente a correntes impulsivas foi a impedância transitória. Este parâmetro é definido pela razão entre a tensão e a corrente medidas, no domínio do tempo, conforme mostrado na Equação 1.

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

onde $v(t)$ e $i(t)$ correspondem à tensão e a corrente, respectivamente, medidas na malha de aterramento.



(a) Arranjo utilizado para medição.

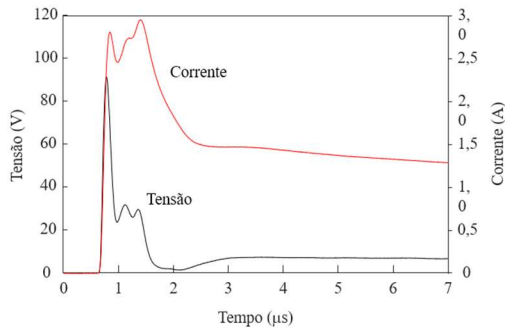


(b) Fotografia da medição de impedância.

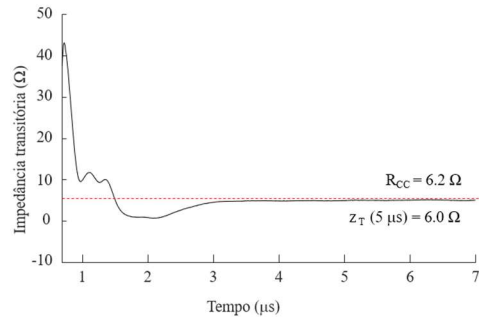
Figura 2 - Medição da impedância de um eletrodo vertical profundo.

As curvas de tensão e corrente medidas, assim como as curvas de impedâncias, medida e simuladas, são apresentadas na Figura 3. As simulações foram realizadas utilizando duas configurações distintas para o perfil de solo. Numa das configurações o solo foi considerado estratificado em duas camadas, assim como mostrado na Figura 2 – (a), e na outra configuração foi utilizada a resistividade aparente do solo, i.e., a condição onde o perfil estratificado de solo é reduzido a um perfil de solo homogêneo, em cuja resistividade assume o valor percebido pelo aterramento. Na Figura 3 – (b) está representado, também, o valor medido para a resistência de aterramento do eletrodo vertical (6,2 Ω). É possível observar que o valor da impedância transitória converge para o valor de resistência para tempos longos, i.e., neste caso, tempos a partir de 3 μs . Antes deste tempo, a resposta do aterramento apresenta dinâmica própria de sua geometria e excitação.

A boa correlação obtida entre as ondas medida e simuladas indicam que a metodologia de cálculo é adequada para o estudo do comportamento transitório de eletrodos verticais profundos. É importante ressaltar que a validação da metodologia de cálculo em solo de baixa resistividade é uma vantagem, pois, conforme (11), o modelo de linha de transmissão utilizado para representar o sistema de aterramento apresenta maiores erros em solos de baixas resistividades e apresenta melhores resultados em solos de alta resistividade.



(a) Tensão e corrente medidas.



(b) Impedância transitória e resistência medidas.

Figura 3 – Curvas de medição da tensão, corrente e impedância transitória de um eletrodo vertical profundo.

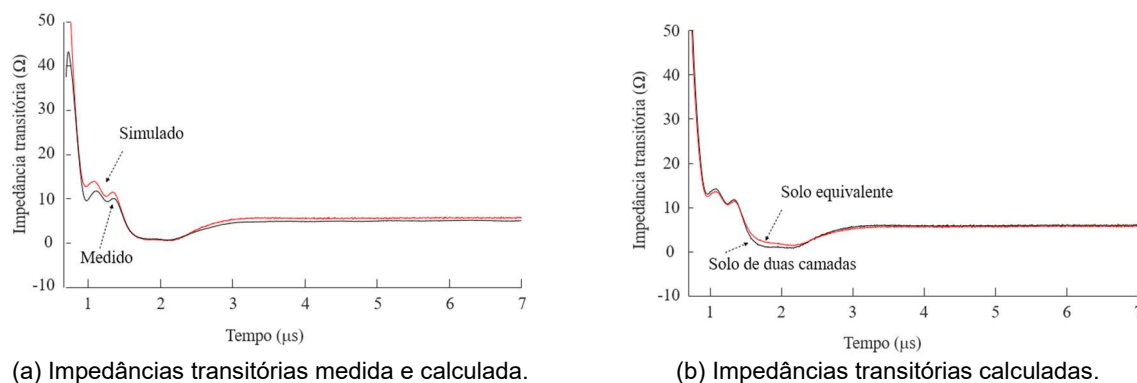


Figura 4 – Comparação entre as curvas de impedância transitória medida e calculadas para um eletrodo vertical profundo.

2.2.2 – Segunda etapa de medições - Período sem chuvas

Considerando a variação sazonal dos parâmetros elétricos do solo, o período sem chuvas é, para as condições comuns no Brasil, aquele que resulta em um pior desempenho dos arranjos de aterramento. Isso se deve à elevação da resistividade elétrica do solo no período citado. Por esta razão, é prática recomendada a caracterização do solo e dos arranjos de aterramento para esta condição sazonal. Visando isto, a segunda etapa de medições apresentada neste trabalho foi realizada durante o período sem chuvas.

Para a segunda etapa de medições, os dados coletados foram usados para comparar o desempenho de dois arranjos de aterramento distintos, o eletrodo horizontal de 18 m de comprimento e o eletrodo vertical de 18 m de comprimento. Com estes dados foi possível verificar, experimentalmente, a característica de resposta de cada um desses arranjos. Foram também realizadas medições de um caso adicional, onde ambos os arranjos, horizontal e vertical, estão conectados a outros sistemas. Nesse sentido, se denominou o Caso 1 como sendo um arranjo composto por um eletrodo horizontal com 18 m de comprimento conectado a um eletrodo de ligação de 10 m de comprimento, também horizontal, e este, por sua vez, foi conectado ao eletrodo vertical de 18 m de comprimento, ver Figura 1 - (a).

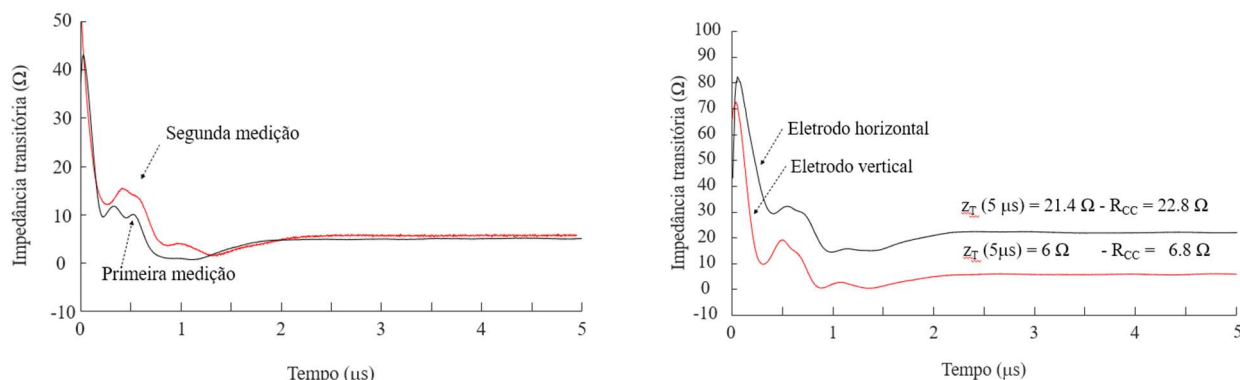
As comparações da resposta de cada condição medida foram feitas de duas formas; *i* - por meio do valor da resistência de cada arranjo, medida com o método da queda de potencial, *ii* - por meio da comparação das curvas de impedância transitória. Os valores de resistência são mostrados na Tabela 1, enquanto as curvas de impedância são comparadas nas Figuras 5 e 6. Usando os valores de resistência medidos, foram calculadas as resistividades aparentes percebidas pelo eletrodo horizontal e pelo eletrodo vertical. Os valores obtidos foram, respectivamente, 230 Ωm e 84 Ωm .

Tabela 1 – Valores de resistência medidos.

Arranjo de Aterramento	Resistência
Eletrodo Horizontal (18 m)	22,8 Ω
Eletrodo Vertical (18 m)	6,8 Ω
Caso 1	5,4 Ω

Ao compararmos os valores de resistência medidos para os eletrodos horizontal e vertical, fica evidente que o comportamento do eletrodo vertical é bastante superior para baixas frequências. Já é bastante conhecido na literatura que eletrodos horizontais possuem valor de resistência aproximadamente o dobro do valor encontrado em um arranjo vertical equivalente, para a condição de solo homogêneo. O valor obtido na comparação dos arranjos, entretanto, apresenta uma relação de resistência aproximadamente 3,4 vezes maior para o eletrodo horizontal. Isso se deve ao perfil de resistividade do solo na região de interesse, que apresenta estratificação onde a camada mais interna do solo é de menor resistividade. Como o eletrodo vertical acessa diretamente as camadas mais internas do solo, o desempenho deste arranjo em baixas frequências se mostra ainda mais superior que na condição equivalente horizontal. Essa constatação é reforçada por meio dos valores obtidos para a resistividade aparente de cada arranjo de eletrodos.

A Figura 5 apresenta as curvas de impedância transitória medidas para os eletrodos vertical e horizontal. Na Figura 5 – (a) é feita uma comparação entre as curvas de impedância transitória medidas em diferentes épocas do ano para o eletrodo vertical, sendo a curva identificada como *primeira medição* correspondente ao período chuvoso, enquanto a curva identificada como *segunda medição* corresponde ao período sem chuvas. É interessante observar que, mesmo correspondendo a épocas muito distintas do ano, onde a resistividade elétrica superficial do solo varia consideravelmente, a resposta transitória da malha de aterramento não apresentou variações significativas. Isso se deve, principalmente, à grande influência das camadas mais internas do solo na resposta do aterramento vertical. Como esperado, as camadas mais internas do solo possuem menor variação dos parâmetros elétricos em função da sazonalidade do clima.



(a) Curvas de impedância transitória para um eletrodo vertical com 18 m, curvas medidas em diferentes épocas do ano.

(b) Curvas de impedância transitória e resistência medidas para os eletrodos vertical e horizontal.

Figura 5 - Curvas de impedância transitória medidas para os eletrodos vertical e horizontal de 18 m.

A Figura 5 – (b) compara as curvas de impedância transitória medidas para os eletrodos de aterramento vertical e horizontal, ambos com 18 m de comprimento. As curvas foram obtidas no período sem chuvas, i.e., na condição mais crítica para a caracterização do aterramento. É possível perceber que o aterramento composto pelo eletrodo vertical apresenta menores valores de impedância transitória em toda a faixa de tempo avaliada. Em tempos longos, isto é, quando a impedância transitória converge para o valor de resistência da malha (tempos acima de 2 μs, neste caso), o arranjo vertical apresentou um valor de impedância transitória de 6 Ω, enquanto o arranjo horizontal apresentou uma impedância transitória de 21,4 Ω. Isso corresponde a uma diferença de aproximadamente 3,6 vezes no valor de impedância transitória entre as malhas avaliadas, reforçando a característica de melhor desempenho para a malha vertical, nas condições deste estudo.

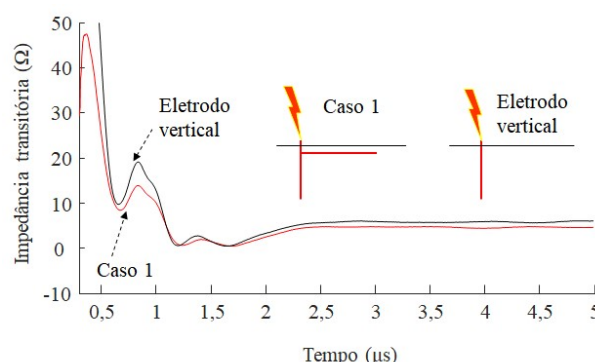


Figura 6 - Curvas de impedância transitória medidas para os arranjos do Caso 1 e do eletrodo vertical.

A Figura 6 apresenta as curvas de impedância transitória medidas para o Caso 1 e para o eletrodo vertical de 18 m. A comparação entre as curvas evidencia uma resposta dominante do eletrodo vertical, mesmo quando este é ligado a outros arranjos horizontais, aumentando consideravelmente a quantidade de condutor utilizado na malha sob estudo. Essa comparação, mais uma vez, evidencia o melhor desempenho do eletrodo vertical como alternativa de aterramento, para as condições do estudo de caso deste trabalho.

É importante destacar que as medições apresentadas nesta seção possuem características bastante particulares. Foi utilizado um gerador de corrente de baixa magnitude e uma onda de corrente com frente rápida. Em geral, estudos transitórios de aterramento possuem como foco o comportamento destes frente a solicitações típicas de descargas atmosféricas, cuja forma de onda é mais lenta e a amplitude da corrente é diversas vezes maior que as adotadas nas medições. Todavia, no trabalho (15) é provado que a resposta do aterramento para uma excitação rápida é capaz de carregar informação deste sistema para que a resposta a outras solicitações, como as descargas atmosféricas, por exemplo, possa ser plenamente conhecida. Desta forma, as conclusões obtidas nas medições apresentadas podem ser estendidas a correntes típicas de descargas, desde que os efeitos destas mantenham a resposta do aterramento na região de linearidade, i.e., desde que não ocorra ionização do solo.

3.0 ESTUDOS DE CASOS REAIS

Em todas as simulações cujos resultados serão apresentados o cálculo da elevação de potencial do solo (GPR) na entrada da malha foi realizado através da resposta a uma onda de corrente típica de descarga atmosférica, proposta em (14) e mostrada na Figura 7. Essa representação foi normalizada para que a amplitude máxima da corrente possua valor igual a 1 A.

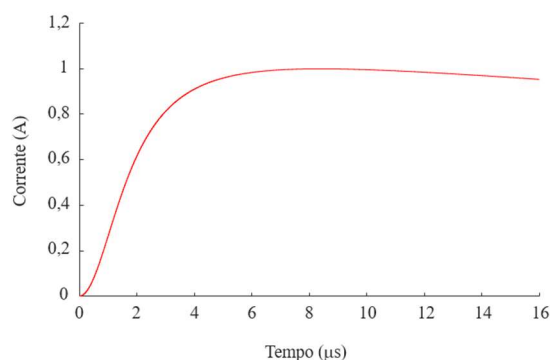


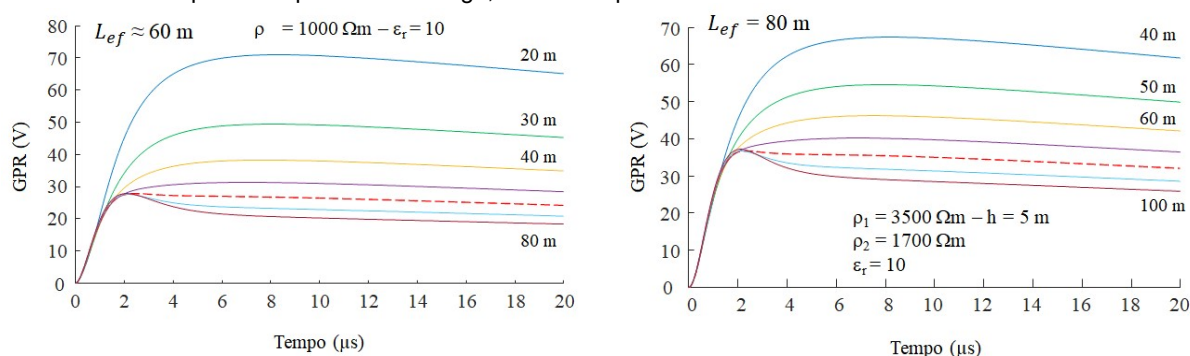
Figura 7 – Forma de onda representativa de uma primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica (14).

3.1 Comprimento efetivo de um eletrodo vertical profundo

Foram realizadas várias simulações considerando um eletrodo de aterramento vertical de 50 mm² de área e comprimento L variando de 20 a 250 m, enterrado em solos com resistividade variando de 100 a 10.000 Ωm e também em solo estratificado em duas camadas com $\rho_1 = 3500 \Omega\text{m}$, $\rho_2 = 1700 \Omega\text{m}$, profundidade da primeira camada igual a 5 m, que caracteriza o solo típico do estado de Minas Gerais.

A finalidade destas simulações está na necessidade de se determinar os valores do comprimento efetivo (L_{ef}) de eletrodos verticais profundos, de forma a subsidiar a escolha de malhas que estejam dentro da faixa de comprimento de interesse. O comprimento efetivo é um parâmetro alvo em muitos projetos de aterramento, pois representa o limiar de efetividade do arranjo a ser projetado, definindo o comprimento máximo de condutor a se usar no projeto. A Figura 8 apresenta estrato das simulações realizada para um solo uniforme de 1000 Ωm e para um solo estratificado em duas camadas, considerando os valores médios do solo de Minas Gerais (2).

Ao se analisar a Figura 8, é possível perceber que, para as características típicas de solos que demandam a utilização da técnica de poço profundo, isto é, em solos com resistividade elétrica acima de 1000 Ωm (considerando aqui um solo homogêneo), o comprimento de eletrodo a ser utilizado poderá ter até 60 m, sem que os efeitos do comprimento efetivo, descritos em (5), ocorram. As simulações realizadas nos permitem prever que o comprimento efetivo, grande limitador de projeto de malhas de aterramento, não é um problema para projetos de eletrodos profundos, desde que estes se limitem a valores de até cerca de 50 metros. É importante ressaltar também que estes valores pressupõem solicitações típicas de primeira corrente de descarga. Caso a forma de onda da corrente de solicitação possua tempos de frente menores que os de primeira descarga, esses comprimentos serão menores.



(a) Solo homogêneo, resistividade igual a 1000 Ωm .

(b) Solo estratificado, solo com valores médios de Minas Gerais.

Figura 8 - Formas de onda das tensões desenvolvidas no aterramento (GPR) e determinação do comprimento efetivo (L_{ef}).

3.2 – Estudo de caso da linha Irapé-Araçuaí 2

A linha de transmissão Irapé-Araçuaí 2 é uma linha de 230 kV, com aproximadamente 60 km de comprimento. A linha atravessa uma região de solos com elevado valor de resistividade elétrica (16). Para o estudo escolheu-se 4 torres onde os valores da resistividade do solo eram conhecidos. Nestas torres foi determinada a curva de tensão (GPR) para uma corrente com forma de onda típica de uma primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica. A onda foi normalizada para possuir valor de pico de 1 A. Para este valor de corrente, o valor de pico da GPR é igual ao valor da impedância impulsiva da malha de aterramento.

As torres escolhidas estão instaladas em solos estratificados em duas camadas e apresentam valores de resistividade da segunda camada inferiores aos valores da primeira camada. Utilizando a modelagem baseada na teoria de linha de transmissão, já validada neste trabalho, foram projetadas malhas de aterramento para cada uma das torres selecionadas. Os casos analisados neste estudo são constituídos de quatro eletrodos verticais, cujos comprimentos variam entre 15 m e 50 m. Os arranjos são interligados por quatro eletrodos horizontais. A condição imposta ao projeto é que as malhas de aterramento deveriam apresentar valores de impedância impulsiva inferiores a 30Ω . Um esboço das malhas projetadas é apresentado na Figura 9. A variação dos parâmetros do solo com a frequência foi considerada para os casos estudados. A Tabela 2 apresenta os dados das torres escolhidas. Analisando os casos A e B, foi verificado que ambos possuem um baixo valor para a resistividade da segunda camada de solo, isto é, valores da ordem de $1000 \Omega\text{m}$ ou menores. Nesse cenário, mesmo para solos com primeira camada possuindo elevado valor de resistividade, como o Caso B, por exemplo, a resistividade da segunda camada do solo se torna predominante na resposta do aterramento, levando ao atendimento de critérios de projeto, como os estabelecidos neste estudo de caso, com eletrodos verticais de até 25 m de comprimento. Ainda com relação aos casos A e B, as curvas de GPR simuladas evidenciam que a utilização do modelo de cálculo onde os parâmetros elétricos do solo são invariantes com a frequência levam a valores mais conservativos para a impedância impulsiva. Nesse cenário, todos os casos simulados resultaram em valores de impedância impulsiva menores que 30Ω . Ao se considerar a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, os valores para a impedância impulsiva dos arranjos resultam num valor limite inferior a 25Ω , como mostram as Figuras 10 – (a) e 10 – (b).

Tabela 2 - Casos analisados para eletrodos variando de 15 m a 50 m de comprimento.

Caso	Torre	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	h_1 (m)	L_v (m)	Z_{Impulso} (Ω)
A	2	3069	860	2.9	15	25
B	17	33000	166	13.7	25	5.5
C	82	12551	2839	4.6	50	26
D	27	15674	4838	3.1	50	30

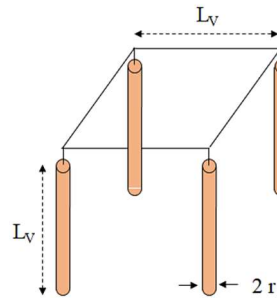
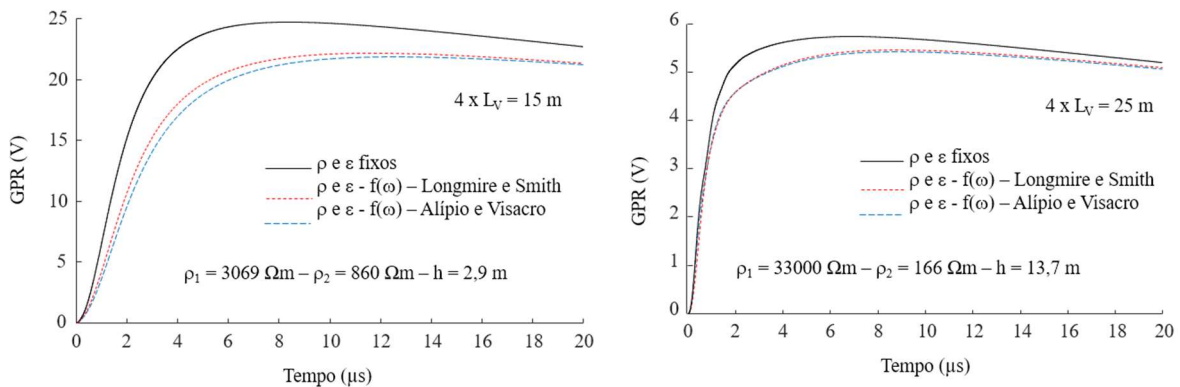
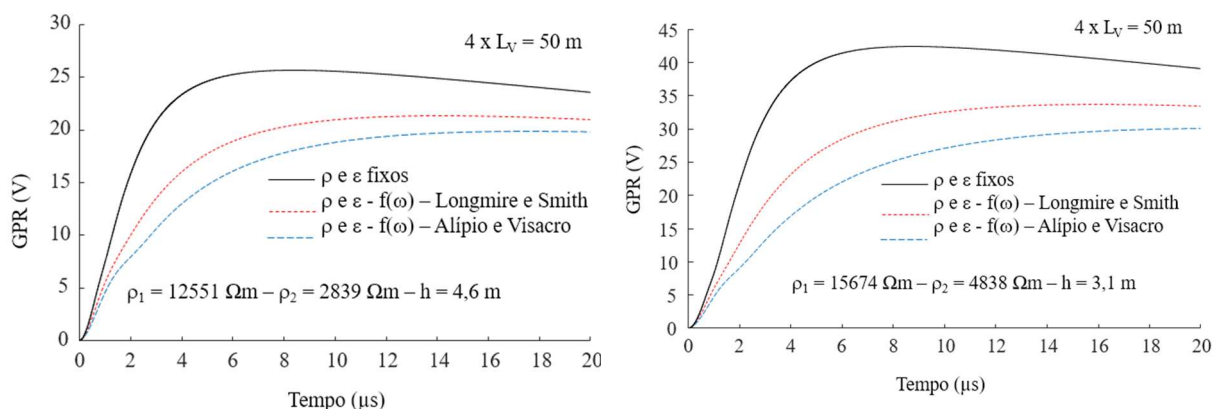


Figura 7 - Malha constituída de 04 eletrodos verticais de 15, 25 ou 50 m de comprimento cada e de quatro eletrodos horizontais para interligação dos eletrodos verticais.



(a) Formas de onda da GPR para o Caso A.

(b) Formas de onda da GPR para o Caso B.



(c) Formas de onda da GPR para o Caso C.

(d) Formas de onda da GPR para o Caso D.

Figura 8 - Formas de onda da tensão desenvolvida no aterramento (GPR).

Com relação ao Caso C, foi selecionada uma torre instalada em um solo que possuía resistividades da segunda camada com valor próximo a 3000 Ωm . Para esse caso, eletrodos verticais com comprimentos de até 25 metros, como nos casos A e B já não eram capazes de atender ao critério de 30 Ω estabelecido no estudo. Assim, definiu-se como critério de projeto o uso de malhas de aterramento com eletrodos verticais de 50 metros de comprimento. As curvas de GPR da Figura 10 – (c) apresentam os resultados obtidos para o arranjo de aterramento proposto para o Caso C. Considerando a variação dos parâmetros do solo com a frequência, o Caso C apresenta impedância impulsiva de 20 Ω , atendendo ao critério de 30 Ω estabelecido neste estudo.

Para o Caso D, foi selecionado um dos casos mais críticos das torres presentes na linha Irapé-Araçuaí 2, que apresenta valores elevados de resistividade, tanto para a primeira camada quanto para a segunda camada do solo. Nesse cenário, a aplicação da malha com eletrodos verticais com 50 metros de comprimento já não é capaz de atingir o critério de 30 Ω quando o modelo de cálculo mais conservativo (parâmetros elétricos fixos) é adotado. Entretanto, se modelarmos os parâmetros do solo como dependentes da frequência, o arranjo é capaz de atender ao critério limite de 30 Ω . As curvas de GPR apresentadas na Figura 10 – (d) evidenciam o atendimento ao critério de projeto estabelecido.

Por fim, é importante destacar a influência das características do solo nas simulações realizadas, principalmente no que se refere a profundidade da primeira camada. A técnica apresentada, e, portanto, os casos selecionados para este estudo, pressupõe que o solo da segunda camada possua resistividade elétrica menor que a resistividade da primeira camada de solo. Além disso, é pressuposto que o comprimento do eletrodo vertical utilizado seja tal que a camada mais profunda do solo seja suficientemente penetrada por este eletrodo.

4.0 – CONCLUSÕES

Um eletrodo vertical possui uma resistência de aterramento igual à metade do valor da resistência de um eletrodo horizontal de mesmo comprimento, quando inserido em um solo uniforme. No caso de solos estratificados, onde a segunda camada tem valor de resistividade inferior ao da primeira, essa redução é ainda maior. Essa afirmação, conhecida há muito tempo, foi estendida, nas condições avaliadas neste trabalho, para o comportamento transitório do aterramento, ou seja, além da resistência foi também verificado que o valor da impedância transitória do eletrodo vertical é também inferior ao de um eletrodo horizontal equivalente.

Este trabalho apresentou um estudo com foco na avaliação do uso de eletrodos verticais como arranjo de aterramento alternativo para torres de linha de transmissão, em situações onde a resistividade elétrica da primeira camada (ρ_1) é superior à da segunda (ρ_2). A partir das análises realizadas foi verificado que os casos medidos e simulados por meio da teoria de linhas apresentaram boa concordância na determinação da impedância de aterramento utilizando eletrodos verticais enterrados em solos multicamadas. Apesar de não se poder afirmar que essa constatação é válida para qualquer arranjo de aterramento ou para diferentes composições de solo, nas condições deste estudo o modelo de cálculo escolhido pôde ser validado.

O estudo de caso baseado nas torres da linha Irapé-Araçuaí 2 evidenciou que o projeto alternativo de malhas usando eletrodos verticais pode ser uma solução interessante, permitindo atender os critérios estabelecidos, geralmente restritivos, mesmo em solos muito desfavoráveis como aqueles dos casos C e D avaliados. Além disso, com os recentes avanços nas tecnologias de perfuração, o uso de eletrodos verticais profundos pode ser uma alternativa economicamente viável, reduzindo a complexidade das malhas e, eventualmente, reduzindo o comprimento dos condutores necessários para compor a malha.

5.0 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da empresa TBE (Transmissoras Brasileiras de Energia), , CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e também a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) M.F. Guimarães, J.O.S. Paulino, W. C. Boaventura, A. B. Lima, “Sistema para medição da impedância de malhas de aterramento de linhas de transmissão utilizando ondas impulsivas,” Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL – P&D ANEEL, no. 6, agosto de 2015, ISSN 1981-9803.
- (2) Resistividade média dos solos de Minas Gerais. 02.118-COPDEN-0346, no 21233176. CEMIG, 1994.
- (3) BATISTA, R. B. L. Análise de malhas de aterramento compostas por eletrodos verticais profundos em torres de linhas de transmissão [recurso eletrônico] / Raphael Batista Borges Louro. - 2020. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- (4) GRCEV, L. and DAWALIBI, F. (1990). An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, no4, pp. 1773-1781.
- (5) GERI, A. (1999). Behavior of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: The Model and its Validation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, no3, pp. 1008-1017.
- (6) VISACRO, S., PINTO, W. L. F., ALMEIDA, F. S., MURTA, M. H. and ROSADO, G. (2008). Experimental evaluation of soil parameter behavior in the frequency range associated to lightning currents. *Proc. 29th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2008)*, Sweden, paper 5c-2.
- (7) CAETANO, C. E. F. et al. A simplified method for calculating the impedance of vertical grounding electrodes buried in a horizontally stratified multilayer ground. In: 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP). IEEE, 2018. p. 1-7.
- (9) SUNDE, E.D. Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Dover, New York, 1968.
- (10) A.B. Lima, J.O.S. Paulino, W.C. Boaventura, I.J.S. Lopes, M.F. Guimarães, W.A. Chisholm, B. Jamal, F. Bologna, Transient grounding impedance and transient resistivity measurements using a very short current lead, *Electric Power Systems Research*, v. 118, p. 69-75, 2014. doi.org/10.1016/j.epsr.2014.05.014.
- (11) GRCEV, L. “Modeling of grounding electrodes under lightning currents,” *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 559-571, 2009.
- (12) ALÍPIO, R. and VISACRO, S. “Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, no. 1, pp. 132–139, 2013.
- (13) CAETANO, CARLOS ERMÍDIO FERREIRA; Paulino, José Osvaldo Saldanha; Barbosa, Celio Fonseca; Boaventura, Wallace do Couto. Earthing system characterization from its measured impulse response. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, v. 187, p. 106517, 2020.
- (14) F. Rachidi et al., “Current and electromagnetic field associated with lightning-return strokes to tall towers,” *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 43, no. 3, pp. 356–367, Aug. 2001.
- (15) CAETANO, C. E. F. Caracterização de arranjos de aterramento através de medições no domínio do tempo [recurso eletrônico] / Carlos Ermídio Ferreira Caetano. – 2019. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- (16) Estudos de desempenho de Linha de Transmissão Quanto a Surtos Atmosféricos e Avaliação de Risco à 60 Hz. LT 230 kV Irapé – Araçuaí 2. Relatório Técnico, 2007.
- (17) WENNER, Frank. A method of measuring earth resistivity. US Government Printing Office, 1916.
- (18) LIMA, A. B. Método para Cálculo da impedância de Malhas de Aterramento de Torres de Linhas de Transmissão [recurso eletrônico] / Alexander Barros Lima. – 2010. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.
- (19) LIMA, A. B. Medição de Impedância e da Resistência de Aterramento Utilizando Ondas Impulsivas e Cabos de Pequeno Comprimento nos Circuitos de Tensão e Corrente. [recurso eletrônico] / Alexander Barros Lima. – 2015. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

7.0 DADOS BIOGRÁFICOS



HUDSON BONIFÁCIO DOS SANTOS (*) possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal da Bahia (IFBA), Paulo Afonso, Brasil, em 2019. Atualmente é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da UFMG. Suas áreas de pesquisa

incluem aterramentos elétricos, alta tensão, descargas atmosféricas e compatibilidade eletromagnética.



CARLOS ERMÍDIO FERREIRA CAETANO (3) possui graduação em Eng. de Controle e Automação, mestrado e doutorado em Eng. Elétrica, pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 2015, 2017 e 2019, respectivamente. Suas áreas de pesquisa incluem

instrumentação, aterramentos elétricos, transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.



AMANDA BOTELHO AMARAL (2) possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de São João del Rei (UFSJ), São João del Rei, Brasil, em 2015 e 2017 respectivamente. Atualmente é aluna de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Eng. Elétrica da

UFMG. Suas áreas de pesquisa incluem aterramentos elétricos, transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.



JOSÉ OSVALDO SALDANHA PAULINO (4) possui graduação e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, em 1979 e 1985, respectivamente. Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Campinas,

Campinas, Brasil, em 1993. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG desde 1980. Suas áreas de pesquisa incluem compatibilidade eletromagnética, descargas atmosféricas e alta tensão.