

# Impacto da Resistência de Aterramento na Análise de Desligamentos por Tensões Induzidas Devido a Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição

João A. C. Almeida\* Rodolfo A. R. Moura\* Marco A. O. Schroeder\*  
Fernando A. Assis\*

\* Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), MG,  
(joaoalvar Almeida@gmail.com, moura@ufs.edu.br,  
schroeder@ufs.edu.br, fernandoassis@ufs.edu.br).

**Abstract:** The assessment of distribution systems performance is a key factor to guarantee the continuity of energy supply. Hence, understanding the impacts that lightning can generate in this type of system is a matter of relevant importance. Therefore, this work aims to investigate the impact of grounding resistance on the distribution line lightning performance considering induced overvoltages. The present work is based on the theory proposed by Sune Rusck and later extended by J. O. Paulino. For this analysis, the Monte Carlo Method was also used in a computational routine to estimate the number of expected shutdowns of a distribution line. Thus, simulations were carried out with different values of grounding resistance and the number of shutdowns was calculated as a function of these values. According to the results, the value of the grounding resistance significantly impacts the expected number of shutdowns for a given distribution line.

**Resumo:** A avaliação do desempenho de sistemas de distribuição é um fator primordial para garantir a continuidade do fornecimento de energia. Dessa maneira, compreender os impactos que as descargas atmosféricas podem gerar nesse tipo de sistema é um assunto de importância relevante. Diante disso, esse trabalho tem como objetivo investigar o impacto da resistência de aterramento no desempenho de linhas de distribuição frente as tensões induzidas. O presente trabalho é baseado na teoria proposta por Sune Rusck e que, posteriormente, estendeu-se por J. O. Paulino. Para tal análise, utilizou-se também o Método de Monte Carlo em uma rotina computacional para estimar o número de desligamentos de uma linha de distribuição. Desse modo, foram feitas simulações por meio de uma rotina computacional implementada na linguagem de programação Julia com diversos valores de resistência de aterramento e calculado o número de desligamentos em função desses valores. Segundo os resultados, o valor da resistência de aterramento impacta de maneira sensível no número esperado de desligamentos de uma determinada linha de distribuição.

*Keywords:* Lightning; distribution lines; induced overvoltages; Monte Carlo method.

*Palavras-chaves:* Descargas atmosféricas; linhas de distribuição; sobretensões induzidas; método de Monte Carlo.

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico de potência (SEP) é constantemente danificado por descargas atmosféricas, seja pela incidência de descargas diretamente no sistema ou pela incidência de descargas atmosféricas nas proximidades do sistema, como por exemplo, no solo, edificações, vegetação etc. Ademais, sabe-se que a incidência direta no SEP é mais danosa para o sistema que as incidências indiretas. Contudo, as incidências indiretas são mais frequentes, ou seja, tem uma maior frequência de ocorrência. Sabe-se ainda que, em linhas com *Critical FlashOver voltage*<sup>1</sup> (CFO)

<sup>1</sup> Parâmetro obtido por meio de ensaios em laboratório de alta tensão. Essa informação caracteriza a capacidade de um isolador suportar uma determinada tensão. O CFO é o valor da crista de

superior a 300 kV, as sobretensões induzidas (causadas por descargas indiretas), usualmente, não são capazes de tirar essas linhas de operação. Segundo Paulino (2019), essa informação é verdadeira, salvo os casos de solos com condutividade pobre, isto é, com resistividades acima de  $2000 \Omega.m$ .

Segundo Boaventura et al. (2018), no caso de incidência direta, o desempenho melhora conforme os valores de resistência de aterramento. Para o caso de tensões induzidas, o desempenho melhora com o aumento dos valores da resistência de aterramento Boaventura et al. (2018).

um impulso de sobretensão padrão para qual o isolamento exibe 50% de probabilidade de falha.

Segundo Paulino (1994), existe um consenso na metodologia para o cálculo de sobretensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas. No que se diz respeito a tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas a teoria proposta por Rusck (1957) foi considerada em Paulino (1994) a mais consistente e completa. Vale ressaltar que em Paulino (1994) existe uma comparação feita entre as principais metodologias propostas até então.

O presente trabalho visa, com base da teoria proposta por Rusck (1957), estendida por Paulino (1994) e através das equações de pico de tensão induzida apresentadas em Paulino (2019), analisar o impacto do aterramento elétrico no desempenho de linhas de distribuição frente a descargas indiretas. É utilizada como abordagem para estimar a tensão induzida a proposta de Paulino (2019) que, além de ser de simples implementação e atualizada, tem demonstrado boa precisão (para solos com resistividade até 1.000  $\Omega.m$ ) e excelente desempenho computacional (tempo computacional reduzido) quando comparada com modelos mais robustos como o FDTD Rizk et al. (2017).

Além da presente seção introdutória, este artigo é composto de mais seis seções principais. Na segunda seção, é brevemente apresentada a teoria proposta por Sune Rusck, utilizada como base para o desenvolvimento do presente trabalho. A seguir, é descrito o modelo apresentado por Paulino (2019) para o cálculo de pico das tensões induzidas que, na Seção 4, estende-se para ocasiões onde o cabo está multiaterrado. Na Seção 5, é detalhado como foi realizada a simulação computacional através do Método de Monte Carlo. Já na seção 6 são expostos os resultados obtidos através da implementação das equações propostas por Paulino (2019) em rotinas computacionais. Por fim, na Seção 7, são sintetizadas as principais conclusões do estudo.

## 2. TEORIA DE RUSCK

Assumindo o solo como condutor perfeito, i.e., de condutividade infinita, Rusck (1957) parte do clássico método das imagens para calcular o módulo do campo elétrico induzido associado à descarga atmosférica. Conforme indicado por (1), o campo elétrico induzido ( $E_i$ ) é composto de duas parcelas, sendo uma associada ao gradiente do potencial elétrico ( $\nabla V_i$ ) e uma devido à derivada temporal do potencial magnético ( $\partial A_i/\partial t$ ).

$$E_i = -\nabla V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (1)$$

No trabalho de Rusck são calculados o gradiente do potencial elétrico induzido ( $\nabla V_i$ ) e a derivada no tempo do vetor potencial magnético induzido ( $\partial A_i/\partial t$ ):

$$\nabla V_i = \frac{q_o}{4\pi\epsilon_o} \left( \frac{1}{\sqrt{(L-z)^2 + r_o^2}} + \frac{1}{\sqrt{(L+z)^2 + r_o^2}} - \frac{1}{\sqrt{(vt-z)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right] r_o^2}} - \frac{1}{\sqrt{(vt+z)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right] r_o^2}} \right) \quad (2)$$

onde  $q_o$  é a carga que segue distribuição uniforme ao longo do canal da descarga atmosférica;  $L$  é o comprimento do canal de descarga;  $r_o$  corresponde à menor distância entre o ponto de incidência da descarga atmosférica e o ponto onde deseja-se calcular os parâmetros  $V_i$  e  $A_i$ ;  $v_o$  é a velocidade da descarga atmosférica;  $\epsilon_o$  é a permissividade elétrica do vácuo.

$$\frac{\partial A_i}{\partial t} = \frac{\mu_o I_o}{4\pi} v \left( \frac{1}{\sqrt{(vt-z)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right] r_o^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt+z)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right] r_o^2}} \right) \quad (3)$$

Em (3)  $\mu_o$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $I_o$  é a corrente da descarga atmosférica. Se  $z = 0$  em (2) e (3), conforme evidenciado em Rusck (1957), obtém-se a parcela associada ao campo elétrico devido ao gradiente do potencial elétrico ( $E_v$ ) e à parcela referente a derivada temporal do vetor potencial (chamada de  $E_A$  no presente trabalho), respectivamente.

$$E_v = 60I_o \frac{v_o}{v} \left( \frac{1}{\sqrt{r_o^2 + \left(\frac{v}{v_o}\right)^2 [(v_o t)^2 - r_o^2]}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + r_o^2}} \right) \quad (4)$$

$$E_A = -60I_o \frac{v}{v_o} \frac{1}{\sqrt{r_o^2 + \left(\frac{v}{v_o}\right)^2 [(v_o t)^2 - r_o^2]}} \quad (5)$$

Segundo Paulino (1994), multiplicando-se (4) pela altura da linha aérea ( $h$ ), tem-se a expressão para o potencial escalar induzido ( $V_i$ ):

$$V_i = 60I_o h \frac{v_o}{v} \left( \frac{1}{\sqrt{L^2 + r_o^2}} - \frac{1}{\sqrt{(vt)^2 + \left[1 - \left(\frac{v}{v_o}\right)^2\right] r_o^2}} \right) \quad (6)$$

Contudo, a teoria de Rusck (1957) apresenta algumas limitações. Rusck considera apenas os efeitos da corrente de retorno, ignorando a influência da resistividade do solo na tensão induzida. Além disso, Rusck considera a linha infinita e sem pontos de descontinuidade (como pontos de aterramento, por exemplo). Em Paulino (1994), como mencionado anteriormente, é apresentada uma metodologia para esse cálculo, fundamentada na teoria de Rusck (1957), que considera linhas com pontos de descontinuidade. Em seguida, Paulino (2019) e Boaventura et al.

(2018) avaliam os efeitos da influência da resistividade do solo na atenuação da tensão induzida.

### 3. CÁLCULO DO VALOR DE PICO DAS TENSÕES INDUZIDAS

As formulações tradicionais de Rusck não são capazes de considerar descontinuidades e nem a condutividade finita do solo. Com intuito de contornar tal problema, Paulino (2019) propõem um método para calcular os valores de pico de tensão induzida ( $V_p$ ) em linhas aéreas, levando em conta a resistividade do solo, bem como a possibilidade de considerar a conexão da linha de distribuição com aterramentos elétricos. Segundo Paulino (2019), essa tensão induzida pode ser calculada por meio de (7).

$$V_P = k [V_R + V_S + V_{HRS}] \quad (7)$$

Em (7)  $V_R$  corresponde à parcela proposta por Rusck (1957) que considera o solo ideal,  $V_S$  tem como objetivo computar os efeitos da resistividade finita do solo para solos de resistividade até  $1.000 \Omega.m$  e o último termo da Equação (7),  $V_{HRS}$ , permite estender a fórmula para solos com maiores valores de resistividade, até  $10.000 \Omega.m$ . Cada termo é expresso pelas seguintes equações:

$$V_R = 0.0568 I_0 h \ln \left\{ \frac{1 + (\sqrt{1 + \theta^2} + \theta)^2}{1 + (\sqrt{1 + \theta^2} - \theta)^2} \right\} \quad (8)$$

$$V_S = 1.28 I_0 \sqrt{\frac{\rho}{y}} \quad (9)$$

$$V_{HRS} = \frac{18 I_0 \rho}{\pi y (y + 36)} \quad (10)$$

onde  $\theta = 337,8/y$ ;  $\rho$  é a resistividade do solo;  $I_0$  é o valor de pico de corrente da descarga atmosférica;  $k = 0,94$  é um fator responsável por compensar as defasagens entre as três componentes de (7);  $h$  é a altura da linha;  $y$  é a menor distância entre o ponto de incidência da descarga e a linha.

Vale ressaltar que este método foi usado para o desenvolvimento do presente trabalho. Tal escolha justifica-se pela redução de gastos computacionais, uma vez que o uso somente dos valores de pico de tensão induzida torna a implementação computacional mais simples e aumenta o desempenho computacional.

### 4. CÁLCULO DO VALOR DE PICO DAS TENSÕES INDUZIDAS CONSIDERANDO CABO MULTIATERRADO

Em Paulino (2019), também é apresentada uma extensão para o cálculo de valor de pico das tensões induzidas. Trata-se de analisar os impactos de múltiplos pontos de aterramento na redução do valor de pico da tensão induzida. Em Paulino (2019), é argumentado que, considerando pontos de aterramento distantes entre si ( $d \geq 200m$ ), os valores de pico de tensão induzida são praticamente independente das reflexões. Desse modo, obtém-se equações relativamente simples para adaptar as equações de pico, apresentadas na seção anterior, para equações que

calculam os valores de pico de tensão induzida do cabo para-raios para a terra ( $V_{CPTTR}$ ), da fase para a terra ( $V_{FT}$ ) e da fase para o cabo para-raios ( $V_{FCPR}$ ).

$$V_{CPTTR} = U_{CPR} \frac{2R}{(Z_{CPR} + 2R)} \quad (11)$$

$$V_{FT} = U_F - U_{CPR} \frac{Z_{FCPR}}{(Z_{CPR} + 2R)} \quad (12)$$

$$V_{FCPR} = V_{FT} - V_{CPTTR} \quad (13)$$

onde  $U_{CPR}$  é o valor de pico da tensão do cabo para raios em relação a terra e  $U_F$  corresponde ao valor de pico da tensão do cabo fase em relação a terra. Tais valores são obtidos utilizando (7).  $R$  é a resistência de aterramento,  $Z_{CPR}$  é a impedância de surto própria do cabo para-raios e  $Z_{FCPR}$  é a impedância mútua de surto entre os cabos fase e para-raios. Para calcular estes parâmetros é necessário o uso das Equações (14) e (15):

$$Z_{CPR} = 60 \ln \left( \frac{2h_{CPR}}{r} \right) \quad (14)$$

$$Z_{FCPR} = 60 \ln \left( \frac{h_F + h_{CPR}}{|h_F - h_{CPR}|} \right) \quad (15)$$

onde  $h_{CPR}$  e  $h_F$  são as alturas do cabo para-raios e cabo fase, respectivamente e  $r$  é o raio do cabo para-raios.

### 5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL VIA MÉTODO DE MONTE CARLO

Para realizar a simulação computacional, devido à natureza probabilística do fenômeno “descarga atmosférica”, optou-se por utilizar o método de Monte Carlo. Uma aplicação deste método para estimar o desempenho de uma linha de transmissão frente a incidência direta de descargas atmosféricas pode ser encontrada em Martinez (2005). Neste trabalho, busca-se estimar o número de desligamentos esperado de uma linha quando há a incidência direta de descargas atmosféricas e o método de Monte Carlo auxilia consideração dos parâmetros aleatórios, como por exemplo: intensidade e tempo de frente da descarga atmosférica, tensão da linha no momento da ocorrência do fenômeno e torre em que houve a incidência. O método de Monte Carlo é uma ferramenta estatística usualmente empregada para obter estimativas consistentes de fenômenos probabilísticos por meio de amostragem aleatória. Para estimar o valor de pico da corrente ( $I_0$ ), foram utilizados dados da estação de medição de San Salvatore, que, segundo Schroeder (2001), segue distribuição de probabilidade Log-Normal, com média  $31kA$  e desvio padrão  $0,484 kA$ . O ponto de incidência da descarga atmosférica é sorteado e, para distinguir as descargas atmosféricas indiretas e diretas, foi utilizado o modelo eletrogeométrico<sup>2</sup>.

Com o auxílio das equações apresentadas em Paulino (2019), foram calculados os valores de pico de tensão induzida. Se o valor de pico da tensão calculado for maior que o CFO, é computado um desligamento. Vale ressaltar

<sup>2</sup> Mais detalhes sobre o modelo eletromagnético podem ser encontrados em Meireles (2015).

Tabela 1. Resistência de aterramento considerando a configuração da linha de distribuição em cada uma das resistividades de solo.

Resistividade ( $\rho$ ) [ $\Omega.m$ ]	Resistência [ $\Omega$ ]
100	11,8
200	23,6
500	59
1000	118

que no presente trabalho considerou-se que se a incidência fosse direta, um desligamento seria computado. Por fim, para calcular o número total de desligamentos, o número de simulações cuja tensão induzida é maior que o CFO da linha e que, através do modelo eletrogeométrico, a descarga é considerada direta, é multiplicado por um fator de correção, que vale 0,2, pela densidade de descargas atmosféricas e dividido pelo número total de simulações (no presente trabalho foram realizadas 100 milhões de simulações para cada caso).

## 6. RESULTADOS

### 6.1 CASO BASE

Para a implementação das equações propostas por Paulino (2019), foram utilizados os mesmos parâmetros de linha utilizados em seu trabalho. Seguindo as características de linhas típicas do estado de Minas Gerais, a linha opera com tensão de 13,8 kV, os cabos fase e neutro tem altura de 10 m e 8 m, respectivamente; o raio do condutor vale 3,97 mm e a distância entre os condutores fase é de 2 metros.

O sistema de aterramento é composto por um eletrodo horizontal, de 6 m com três hastes verticais (uma em cada ponta e uma no meio do eletrodo horizontal). Mais detalhes sobre a configuração de aterramento podem ser encontrados em Mestriner et al. (2021). Para verificar o impacto do aterramento elétrico, quatro resistividades de solos ( $\rho$ ) foram consideradas (100, 200, 500 e 1000  $\Omega.m$ ). A Tabela 1 mostra as resistências elétricas obtidas, considerando o método do potencial constante, para cada resistividade.

Conforme comentado anteriormente, o Método de Monte Carlo foi utilizado no trabalho para fazer o cômputo do número de disrupções. Para garantir a convergência, para cada caso (CFO do isolador e configuração) foram considerados 100 milhões de sorteios.

### 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada nesse artigo. São analisados os impactos da resistência de aterramento no número de desligamentos de uma determinada linha de distribuição. A Fig. 1 ilustra o número de desligamentos esperados considerando um solo com resistividade igual a 100  $\Omega.m$ , quando há ou não a conexão com a resistência de aterramento, com o valor da resistência variando de 10  $\Omega$  até 150  $\Omega$ . Na Fig. 2 esse resultado é analisado para um solo com resistividade de 1000  $\Omega.m$ . Segundo os resultados, pode-se perceber que o pior caso acontece quando não há conexão com o aterramento elétrico, principalmente

para o caso onde o solo tem valor de resistividade igual a 1000  $\Omega.m$ , onde fica evidente a influência do valor da resistividade do solo na tensão induzida e, conseqüentemente, na taxa de desligamentos. Esse resultado é esperado, pois a tensão induzida concentra-se totalmente no cabo fase.

Adicionalmente, pode-se também perceber na Fig. 1 que quanto maior a resistência de aterramento, menor é o número de desligamentos. Isso ocorre pois, a tensão induzida entre o aterramento elétrico e a linha concentrará mais no aterramento quanto maior for o valor dessa resistência elétrica. Assim, torna-se maior o impacto da tensão induzida na cadeia de isoladores com a redução da resistência de aterramento. Outro ponto de destaque, é a diferença do número de disrupções entre a linha sem aterramento e com resistência de aterramento de 150  $\Omega$ . Para explicar tal diferença, associamos o problema à teoria de circuitos e pode-se fazer uma analogia da tensão induzida na linha como um divisor de tensão. Ou seja, para maiores valores de resistência de aterramento, a tensão induzida na linha é menor e, naturalmente, o número de disrupções também é menor.

Na Fig. 2, tem-se também a resistência de aterramento variando de 10 $\Omega$  a 150 $\Omega$ , mas o valor da resistividade do solo é alterado para 1000  $\rho.m$ . Nesse caso, como pode ser visto, há um aumento substancial no número de desligamentos, fazendo a consideração da conexão do aterramento ter um impacto ainda mais importante para a melhoria do desempenho da linha de distribuição e ilustrando o impacto da resistividade elétrica do solo no fenômeno de tensão induzida. Observa-se que mesmo para altos valores de CFO, o número de desligamentos continua alto, principalmente para baixos valores de resistência de aterramento e sem aterramento. Esse resultado chama a atenção para regiões com alta resistividade do solo, tornando locais de baixa resistividade do solo inviável para fins de referência.

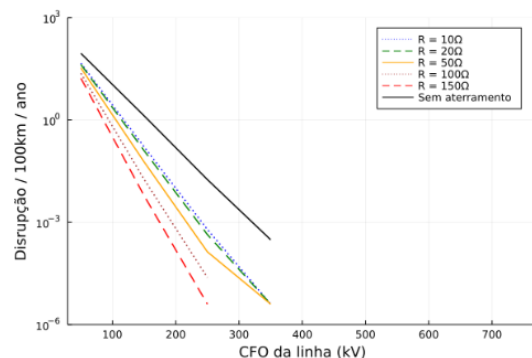


Figura 1. Número de disrupções considerando um solo com resistividade igual a 100  $\Omega.m$ , para diversas resistências de aterramento, em função do CFO da cadeia de isoladores.

Ademais, se considerada uma configuração de aterramento típico para todas as linhas de distribuição, o aterramento elétrico é função da resistividade do solo onde ele encontra-se inserido. Dessa maneira, para verificar o impacto da resistividade do solo, considerando uma mesma configuração de aterramento, a Fig. 3 ilustra o número de disrupções esperadas em uma linha de distribuição para solos variando de 100  $\Omega.m$  até 1000  $\Omega.m$ ; as resistências de

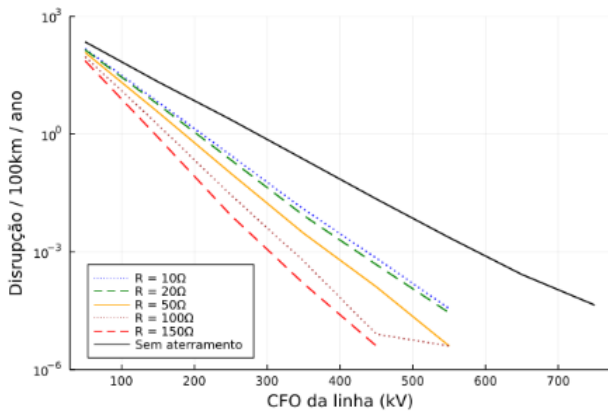


Figura 2. Número de disrupções considerando um solo com resistividade igual a  $1000 \Omega.m$ , para diversas resistências de aterramento, em função do CFO da cadeia de isoladores.

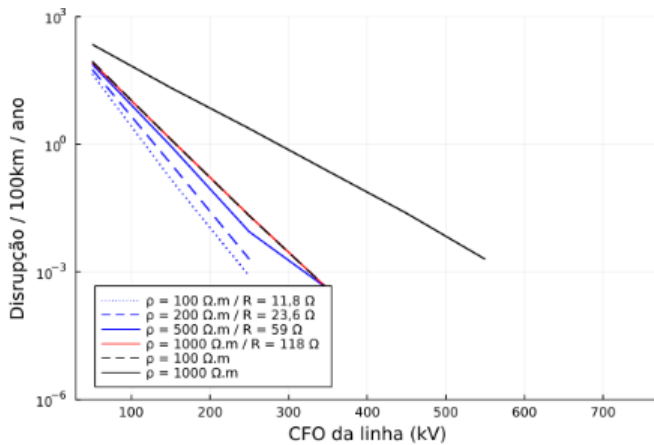


Figura 3. Número de disrupções para cada configuração, em função do CFO da cadeia de isoladores.

aterramento podem ser encontradas na Tabela 1. Segundo os resultados, observa-se o quão nefasto é o impacto da resistividade do solo, principalmente na ausência do aterramento elétrico. Fica evidente a alta taxa de disrupções para  $\rho = 1000 \Omega.m$  e sem resistência de aterramento para o caso onde  $\rho = 100 \Omega.m$ , por exemplo. Observa-se também o impacto dos valores de resistência de aterramento na redução da taxa de desligamentos. Ainda nesse sentido, é destaque o caso de uma linha com aterramento elétrico conectado próximo a um solo de resistividade de  $1000 \rho.m$  e que apresenta aproximadamente o mesmo número de disrupções que uma linha desconectada do aterramento onde o solo tem  $100 \rho.m$ .

## 7. CONCLUSÕES

É característica do Brasil solos de altos valores de resistividade e, de acordo com os resultados apresentados no presente trabalho e nas referências, isso pode ser danoso ao sistema elétrico de potência. Segundo esses resultados, pode-se observar a influência da resistividade do solo no número de desligamentos de linhas de distribuição frente a descargas atmosféricas. Pode-se constatar que para maiores valores de resistividade do solo, há um aumento das disrupções.

Outra comparação que merece destaque é a redução do número de desligamentos na presença do aterramento elétrico, principalmente para maiores valores de resistência de aterramento. Por conseguinte, com o aumento da resistividade do solo, há também um aumento na resistência de aterramento (considerando uma configuração padrão) que auxilia na redução das sobretensões atmosféricas e, diretamente, no número de desligamentos.

Vale ressaltar que o solo apresenta uma característica dispersiva e, por isso, sua resistividade varia de acordo com a frequência. Estão presentes na literatura técnica modelos que consideram essa variação e, trabalhando com equações no domínio da frequência, modelam a resistividade do solo em função da frequência. Um exemplo de modelo que conta com esse procedimento é o modelo eletromagnético híbrido, que é ferramenta da continuação do presente trabalho. Tal consideração é fundamental para validar os resultados obtidos por equações no domínio do tempo e comparar com o resultado obtido com o modelo eletromagnético híbrido, que trabalha no domínio da frequência. Desse modo, pode-se obter resultados mais consistentes.

## 8. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), código 001.

## REFERÊNCIAS

- Boaventura, W.d.C., Paulino, J.O.S., Barbosa, C.F., Lopes, I.J.d.S., Guimarães, M.F., and Cardoso, E.N. (2018). Avaliação do desempenho frente a descargas atmosféricas de linhas aéreas de 69 e 138 kV construídas em solos de alta resistividade e considerando as tensões induzidas. *XXV Snpptee Seminário Nacional De Produção E Transmissão De Energia Elétrica*, 53(9), 1689–1699.
- Martinez, J.A. Castro-Aranda, F. (2005). Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the empt. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3), 2200–2210. doi:10.1109/TPWRD.2005.848454.
- Meireles, Í.A.J.W.S. (2015). *Plataforma computacional em C++ e visual Basic integrado com o ATP para levantamento de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas*. Master's thesis, Universidade Federal de São João del-Rei - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
- Mestriner, D., Moura, R.A.R., Procopio, R., and Schroeder, M.A.O. (2021). Impact of grounding modeling on lightning-induced voltages evaluation in distribution lines. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(7).
- Paulino, J.O.S. (1994). *Uma contribuição ao estudo da proteção de redes elétricas contra tensões induzidas por descargas atmosféricas*. Ph.D. thesis, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica.
- Paulino, J.O.S.B.C.F. (2019). Effect of high-resistivity ground on the lightning performance of overhead lines. *Electric Power Systems Research*, 172(March), 253–259.
- Rizk, M.E., Mahmood, F., Lehtonen, M., Badran, E.A., and Abdel-Rahman, M.H. (2017). Computation of peak lightning-induced voltages due to the typical first subsequent strokes considering high ground resistivity.

*IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(4), 1861–1871.

Rusck, S. (1957). *Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks*. Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology.

Schroeder, M.A.O. (2001). *Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do morro do cachimbo*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.