



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ANÁLISE DE TOPOLOGIAS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO UTILIZADAS EM REGIÕES COM RESTRIÇÕES AMBIENTAIS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS DAS LINHAS DE TRANSMISSÃO

VITOR ROCHA DE ALMEIDA REGO LIMA(1); ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA(2)
MARTE ENGENHARIA LTDA(1); COPPE/UFRJ(2)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise sobre a influência de diferentes topologias de sistemas de aterramento no desempenho frente a descargas atmosféricas das linhas de transmissão. Para alcançar este objetivo, são realizadas simulações de interesse prático do desempenho de uma linha de transmissão típica utilizando topologias não convencionais de sistemas de aterramento, instaladas em áreas que possuem restrições ambientais para a sua utilização. As simulações são realizadas no domínio da frequência, utilizando uma ferramenta computacional que foi desenvolvida para simular as sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores das estruturas e apresentar o número de desligamentos por Backflashover estimado, na ocasião de uma descarga atmosférica.

PALAVRAS-CHAVE

Linhas de transmissão, descargas atmosféricas, sistemas de aterramento.

1.0 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma nação é diretamente proporcional ao seu consumo de energia elétrica, portanto, para países em desenvolvimento, há a constante necessidade de se expandir o seu sistema elétrico, porém preservando a confiabilidade do mesmo. Como as descargas atmosféricas representam o principal fator responsável pelos desligamentos não programados das linhas de transmissão, a avaliação do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas é fundamental e representa, portanto, uma área de pesquisa de grande relevância para o sistema elétrico.

A principal medida utilizada para adequar o desempenho de uma linha de transmissão é atuar em seu sistema de aterramento. Isto pode ser feito das seguintes maneiras: Aumentando os comprimentos dos cabos contrapesos utilizados; aumentando a quantidade de ramais de cabos contrapesos; ou uma combinação de ambas destas medidas. Todavia, embargos ambientais são cada vez mais comuns atualmente, fazendo com que seja necessária a disposição dos cabos contrapesos em áreas cada vez mais limitadas. Isto faz com que os cabos contrapesos fiquem dispostos mais próximos um dos outros, em arranjos que não são comuns, podendo assim, prejudicar a eficiência do sistema de aterramento e, por consequência, o desempenho da linha.

O desempenho de uma linha de transmissão pode ser mensurado através do número de interrupções no fornecimento de energia elétrica, ou seja, através da quantificação do número de desligamentos devido à incidência de descargas atmosféricas. O fenômeno de maior ocorrência é o desligamento ocasionado pela descarga disruptiva de retorno, frequentemente denominada como *Backflashover*, sendo assim, objeto da maioria dos trabalhos e pesquisas realizados sobre o desempenho de linhas. Entretanto, este é um trabalho complexo que envolve diversos temas que estão, de certa maneira, interligados como, por exemplo, a forma de onda das correntes de descargas, resistividade do solo, modelagem do sistema de aterramento, geometria das estruturas, entre outros. Devido à complexidade e a atuação simultânea de diversos elementos do sistema, as ferramentas tradicionalmente utilizadas para mensurar o desempenho de uma linha de transmissão apresentam aproximações e limitações que podem desviar os resultados do fenômeno real.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta simulações de topologias convencionais e não convencionais de sistemas de aterramento, que vem sendo adotadas na construção de linhas de transmissão, que passam por regiões que apresentam restrições ambientais para a instalação dos cabos contrapesos do sistema de aterramento. As simulações serão realizadas utilizando uma ferramenta computacional capaz de simular as sobretensões

obtidas na ocasião de uma descarga atmosférica em uma estrutura e apresentar o número de desligamentos estimado por *Backflashover* para uma linha de transmissão, utilizando uma modelagem no domínio da frequência de todo o sistema.

2.0 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem adotada utilizou a metodologia apresentada em [1]. Os principais pontos são apresentados nos itens a seguir.

2.1 Configuração adotada

De maneira a contemplar o efeito de propagação das ondas e suas reflexões, o sistema é composto por cinco estruturas autoportantes e quatro vãos de 450 metros entre elas. Os vãos das extremidades são adotados como sendo suficientemente longos para não haver reflexões. Considera-se que a descarga atmosférica atinge o topo da terceira estrutura e, portanto, a análise das sobretensões nas cadeias de isoladores também é realizada nesta estrutura [2] [3]. A configuração do sistema adotado é apresentada na Figura 1.

A linha de transmissão utilizada é do tipo circuito duplo com um cabo por fase e dois para-raios. As características dos cabos utilizados são apresentadas abaixo.

Tabela 1 – Características dos cabos utilizados

Cabo	Diâmetro (m)	Resistência (ohm/km)
Condutor	0,02653	0,080
Para-raios	0,00914	4,190

As estruturas são modeladas como uma conexão série de quatro seções de linhas de transmissão monofásicas [3], conforme Figura 2. Foram adotados os valores de 130, 240, 240 e 290 ohms para as impedâncias Z_1 a Z_4 , respectivamente [2]. A velocidade de propagação nas estruturas metálicas foi adotada como sendo de 80% da velocidade da luz [4].

A modelagem das linhas de transmissão adotou um modelo dependente da frequência com parâmetros distribuídos, definido pela matriz de admitância nodal [5].

2.2 Descarga atmosférica

A forma de onda da corrente utilizada para as descargas atmosféricas é obtida através do somatório de funções de Heidler, conforme equação abaixo [6]:

$$\begin{cases} i(t) = \sum_{k=1}^m I_0 \frac{\left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}}{\eta_k \left[1 + \left(\frac{t}{\tau_{1k}}\right)^{n_k}\right]} e^{-\frac{t}{\tau_{2k}}} \\ \eta_k = e^{(-\tau_{1k}/\tau_{2k})(n_k \tau_{1k}/\tau_{2k})^{1/n_k}} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo I_0 , τ_1 , τ_2 e n_k coeficientes obtidos a partir de medições realizadas em torres instrumentadas, conforme apresentado em [7]. A forma de onda da corrente considerada neste trabalho é apresentada na Figura 3.

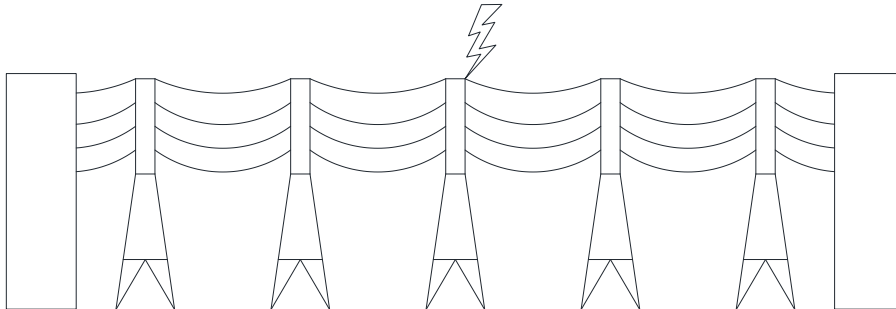


Figura 1 – Configuração do sistema adotado

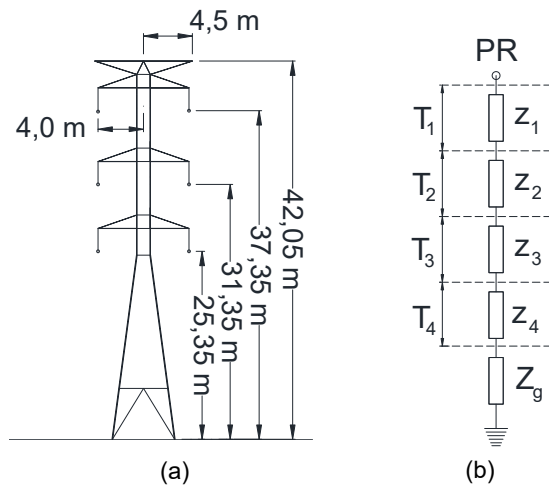


Figura 2 – Dados das estruturas

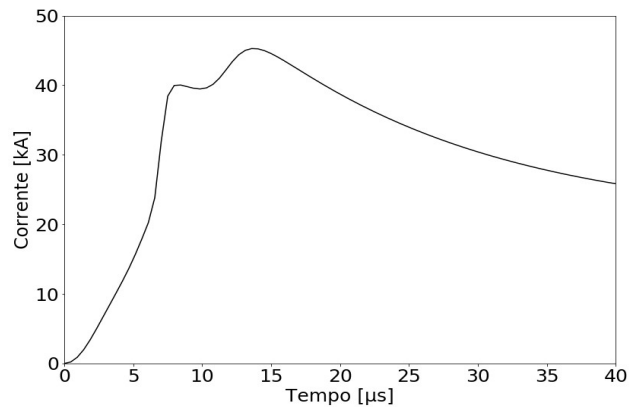


Figura 3 – Representação da forma de onda da corrente de descarga

2.3 Sistemas de aterramento

Foi adotada a modelagem do sistema de aterramento desenvolvida em [8], que é resultado da evolução de diversos trabalhos baseados na teoria de campos eletromagnéticos no domínio da frequência, que foram elaborados com o objetivo de modelar a impedância de aterramento do solo [9] [10], combinado com o melhor desempenho no tempo de processamento dos cálculos necessários. Este modelo é uma aproximação do *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) [11] e seus autores o denominaram de *Modified-HEM* (MHEM). Os parâmetros do solo condutividade elétrica σ , permissividade elétrica ϵ e permeabilidade magnética μ foram modelados como dependentes da frequência, conforme apresentado em [12]. Foram desconsiderados os efeitos não lineares de uma possível ionização do solo. É importante ressaltar que esta consideração faz com que sejam obtidos valores conservativos para a impedância de aterramento calculada [13].

Os sistemas de aterramento adotados utilizam cabos contrapesos, com diâmetro de 9,14 mm e enterrados a 0,8 metros no solo, dispostos ao longo da faixa de servidão ou ao longo da faixa de serviço. É importante ressaltar que, para linhas de transmissão com nível de tensão de 230 kV, as larguras das faixas de servidão e de serviço são de, aproximadamente, 40 metros e 5 metros, respectivamente. Neste trabalho serão simuladas três diferentes topologias de sistema de aterramento, denominadas de topologia 1, 2 e 3, conforme apresentadas na Figura 4. Para cada uma das três topologias consideradas, será adotado também que os comprimentos totais dos cabos contrapesos são iguais a 120, 240 e 360 metros. Maiores detalhes são apresentados nos itens a seguir.

2.3.1 Topologia 1 – Arranjo convencional

A topologia 1 é constituída do arranjo convencional de cabos contrapesos frequentemente utilizados em sistemas de aterramento de linhas de transmissão. Nesta configuração há necessidade de liberar uma área extensa ao longo da faixa de servidão, além da área da praça de montagem das torres.

2.3.2 Topologia 2 – Arranjo convencional para área com restrições ambientais

Em virtude da topologia 1 apresentar grande impacto ambiental e da possibilidade de embargos ambientais para a construção de linhas de transmissão em áreas de preservação ambiental, diferentes topologias de sistemas de aterramento podem ser utilizadas, com o objetivo de diminuir a área afetada pela instalação dos cabos contrapesos e, portanto, diminuir a necessidade de desmatamento das áreas afetadas. A topologia 2 apresenta a alternativa que é usualmente utilizada em sistemas de aterramento instalados em áreas com restrições ambientais. Nesta configuração, além da área necessária para a montagem das torres, é necessário apenas liberar a área ao longo da faixa de serviço para acomodar dois cabos contrapesos que seguem paralelos.

2.3.3 Topologia 3 – Arranjo não convencional para área com restrições ambientais

A topologia 3 representa uma alternativa não convencional para a instalação de cabos contrapesos em áreas com restrições ambientais. Assim como na topologia 2, nesta configuração também há a necessidade de liberar a área

de montagem das torres e a área ao longo da faixa de serviço para acomodar os cabos contrapesos, porém apenas um cabo contrapeso segue dentro da faixa de serviço.

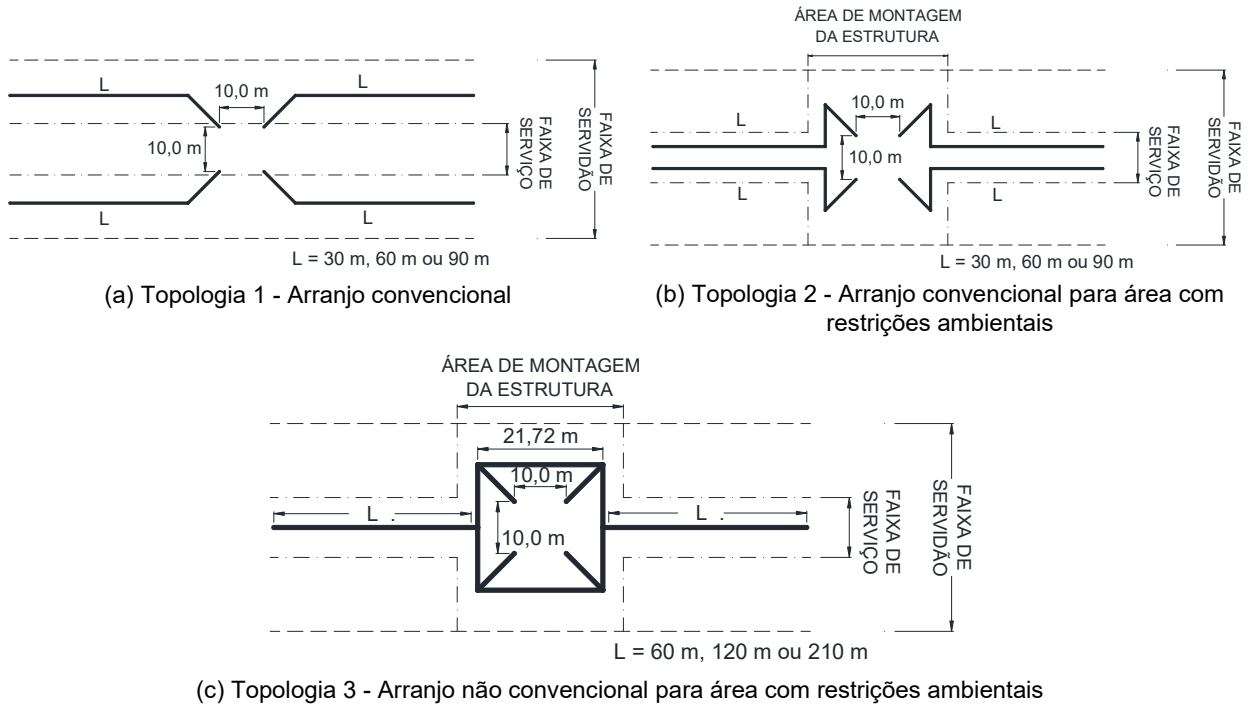


Figura 4 – Topologias de sistemas de aterramento

2.4 Ruptura do isolamento e taxa estimada de desligamentos

Neste trabalho a possível ruptura do isolamento e a taxa de desligamento anual estimada, por *Backflashover*, são obtidas utilizando o método de integração *DE* (*Destructive Effective*).

A Figura 5 apresenta um resumo do método *DE*. Este método é baseado no fato que há uma tensão mínima, e_0 , que deve ser excedida antes de haver o início do processo de ruptura do isolamento e, além disso, é necessário também que a tensão aplicada, $e(t)$, permaneça acima desta tensão mínima por algum tempo [14]. A ruptura ocorre quando $DE \geq DE_B$. O valor da constante K_d é igual a 1,36 e os valores de DE_B e de e_0 podem ser definidos a partir da tensão crítica (*CFO – Critical Flashover Voltage*), conforme [15].

$$DE_B = 1,1506(CFO)^{K_d} \quad (2)$$

$$e_0 = 0,77CFO \quad (3)$$

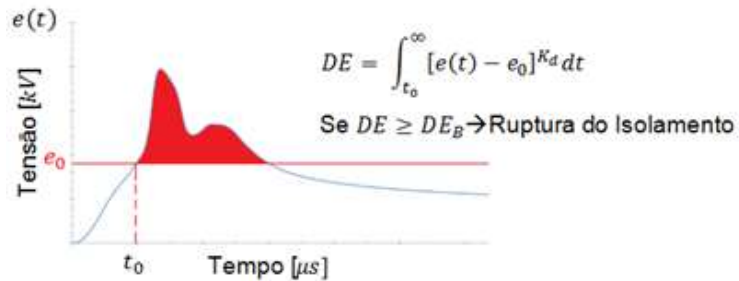


Figura 5 – Método de integração *DE*

A taxa estimada de desligamentos anual, T_{anual} , é então obtida considerando a incidência média de descargas atmosféricas em uma linha de transmissão, N_L , e a probabilidade P_I de ocorrer uma corrente de descarga atmosférica I com magnitude suficiente para que ocorra a ruptura do isolamento, com base na função de distribuição acumulada dos picos de correntes, conforme [16] [17]:

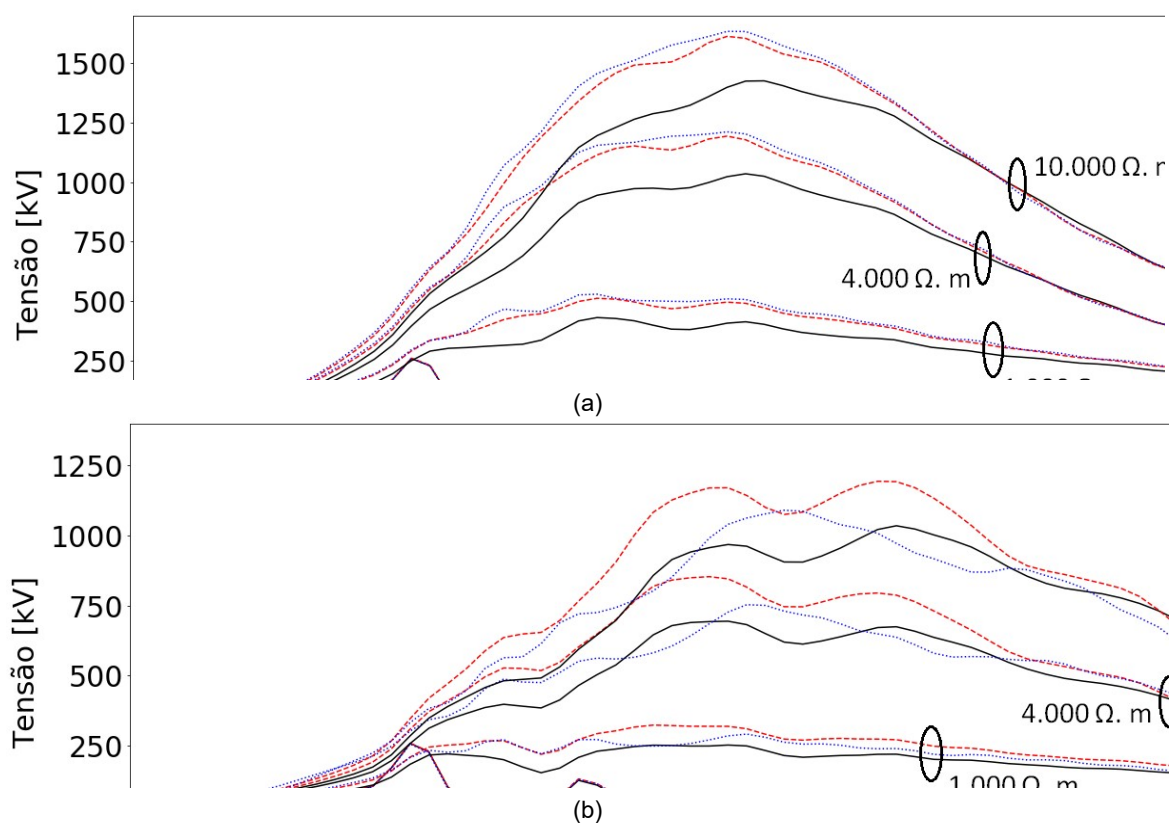
$$T_{anual} = 0,6 N_L P_I = 0,6 N_L \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{I}{43,3} \right)^{3,8}} \right] \quad (4)$$

3.0 RESULTADOS E ANÁLISES

Após apresentada a modelagem do sistema, neste item é apresentada uma investigação acerca do desempenho da linha de transmissão frente a descargas atmosféricas considerando as alternativas de topologias de sistema de aterramento apresentadas.

Para o cálculo da taxa de desligamentos estimada adotou-se que a incidência média de descargas atmosféricas para o solo é igual a 9 descargas/km²/ano, sendo este um valor tipicamente encontrado em diversas regiões do Brasil. O *CFO* adotado foi de 1160 kV. Foram avaliadas as sobretensões e a taxa de desligamentos estimada em todas as cadeias de isoladores. Os resultados obtidos apresentam o caso mais severo, ou seja, a curva de sobretensão na cadeia de isoladores que resultou no pior desempenho.

De maneira a ser possível avaliar o comportamento do sistema para solos de diferentes regiões, serão considerados solos com resistividades distintas de 100, 1.000, 4.000 e 10.000 Ω.m. As curvas das sobretensões obtidas nas cadeias de isoladores são apresentadas na Figura 6. As Tabelas 2 a 5 apresentam os picos de sobretensões obtidos e as taxas de desligamento estimadas para os casos simulados. Os valores percentuais apresentados representam a diferença das topologias 2 e 3 em relação a topologia convencional (topologia 1).



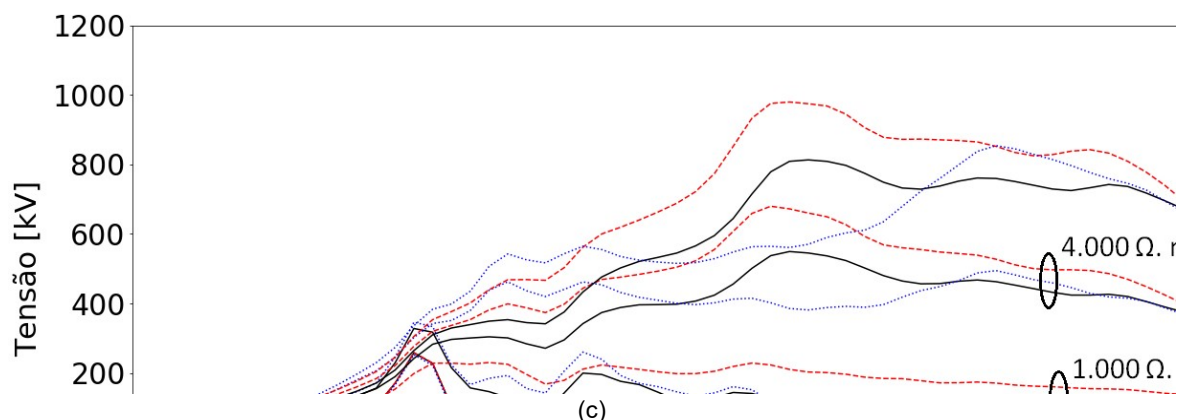


Figura 6 – Curvas de sobretensões nas cadeias de isoladores para as diferentes topologias. Comprimento total de contrapesos igual a 120 metros (a), 240 metros (b) e 360 metros (c).

É possível observar que nos resultados obtidos para solos com resistividades de $100 \Omega.m$, não foram obtidas diferenças significativas no valor do pico da sobretensão, nem para as taxas de desligamentos estimadas, para os casos considerando as diferentes topologias de aterramento.

Para os casos simulados com solo com resistividade de $1.000 \Omega.m$ é possível observar perda considerável no desempenho da linha nas topologias 2 e 3 quando comparados com os valores obtidos com a topologia 1, demonstrado pelo aumento percentual significativo no número de desligamento estimado. O pior caso foi obtido com a topologia 2, com número de desligamentos estimados 141,64% maior do que o valor encontrado com a topologia 1 com comprimento total de cabos contrapeso igual a 240 metros.

Para os casos simulados considerando os solos com resistividade de $4.000 \Omega.m$, as curvas de sobretensões mais severas obtidas nas cadeias de isoladores apresentaram comportamentos bastante distintos, em especial para o caso considerando comprimento total dos cabos contrapesos igual a 360 metros. Em função disso, nestas simulações a topologia 3 apresentou desempenho melhor do que as topologias 1 e 2, obtendo número de desligamentos estimado 14,71% menor do que a topologia 1 para o cenário com comprimento total de cabos contrapeso igual a 360 metros. Situação semelhante ocorreu para os casos simulados considerando a resistividade do solo com $10.000 \Omega.m$, tendo a topologia 3 obtido desempenho superior as topologias 1 e 2 para os casos considerando o comprimento total de cabos contrapesos de 360 metros.

Tabela 2 - Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = $100 \Omega.m$

Comprimento Total de Cabos Contrapeso (m)	Topologia	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	258,68	-	0,022	-
	2	260,43	0,68%	0,025	13,64%
	3	258,66	-0,01%	0,024	9,09%
240	1	257,77	-	0,021	-
	2	258,58	0,31%	0,022	4,76%
	3	255,53	-0,87%	0,020	-4,76%
360	1	257,77	-	0,021	-
	2	258,57	0,31%	0,022	4,76%
	3	252,58	-2,02%	0,019	-9,52%

Tabela 3 - Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = $1.000 \Omega.m$

Comprimento Total de Cabos Contrapeso (m)	Topologia	Pico da Sobretensão (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	430,91	-	2,031	-
	2	511,84	18,78%	4,134	103,55%
	3	528,98	22,76%	4,744	133,58%
240	1	251,70	-	0,305	-
	2	322,94	28,30%	0,737	141,64%
	3	290,70	15,50%	0,493	61,64%
360	1	327,86	-	0,140	-
	2	229,97	-29,86%	0,230	64,29%
	3	345,68	5,43%	0,228	62,86%

Tabela 4 - Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 4.000 $\Omega.m$

Comprimento Total de Cabos Contrapeso (m)	Topologia	Pico da Sobretenção (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	1034,74	-	44,369	-
	2	1192,90	15,28%	62,193	40,17%
	3	1210,92	17,03%	65,676	48,02%
240	1	693,81	-	13,325	-
	2	852,75	22,91%	24,657	85,04%
	3	752,73	8,49%	14,224	6,75%
360	1	549,26	-	4,787	-
	2	679,53	23,72%	9,512	98,70%
	3	494,41	-9,98%	4,083	-14,71%

Tabela 5 - Resultados das Simulações para as diferentes Topologias de Aterramento - Resistividade do Solo = 10.000 $\Omega.m$

Comprimento Total de Cabos Contrapeso (m)	Topologia	Pico da Sobretenção (kV)	Variação (%)	Desligamentos/100km/ano	Variação (%)
120	1	1425,07	-	88,411	-
	2	1611,82	13,10%	103,015	16,52%
	3	1632,81	14,58%	105,429	19,25%
240	1	1034,50	-	45,697	-
	2	1193,43	15,36%	65,752	43,89%
	3	1152,84	11,44%	55,206	20,81%
360	1	812,92	-	23,892	-
	2	979,48	20,49%	38,323	60,40%
	3	853,82	5,03%	21,584	-9,66%

O melhor desempenho obtido para o caso considerando a topologia 3, com comprimento total de cabos contrapesos igual a 360 metros e para os solos com resistividades elevadas, se justifica pelo fato de que a impedância de aterramento é definida no domínio da frequência e varia em função da geometria do aterramento e das características do solo como, por exemplo, a resistividade e a permissividade do solo. Com o objetivo de melhor ilustrar este fenômeno, a Figura 7 apresenta o módulo da impedância harmônica para as topologias analisadas com comprimento total de cabos contrapesos de 360 metros, para solos com resistividade de 1.000 e 4.000 $\Omega.m$. É possível observar redução mais acentuada no módulo da impedância harmônica na faixa de altas frequências para o solo com resistividade de 4.000 $\Omega.m$ para a topologia 3, em comparação com a topologia 1, justificando assim o melhor desempenho obtido da topologia 3 para os cenários com solos com resistividades elevadas.

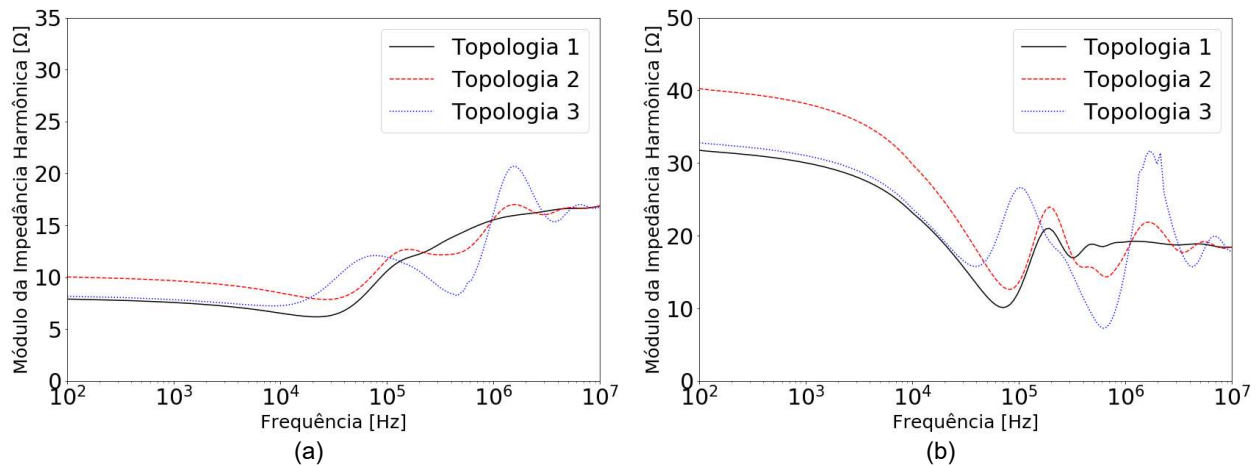


Figura 7 – Impedância harmônica dos sistemas de aterramento com comprimento total de cabos contrapesos igual a 360 metros instalados em solos com resistividade de 1.000 (a) e 4.000 $\Omega.m$ (b)

4.0 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise acerca do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, considerando diferentes topologias de sistemas de aterramento que são utilizadas atualmente. Os resultados obtidos permitem observar que para solos com resistividades favoráveis, ou seja, que apresentem baixos valores de resistividade do solo, independente da topologia utilizada, os resultados obtidos são bastante similares. Em contrapartida, para solos com valores elevados de resistividade do solo, a disposição dos cabos contrapesos no solo passa a exercer influência significativa nos resultados obtidos e topologias não convencionais podem obter desempenho superior, quando comparadas às topologias comumente utilizadas.

As curvas de sobretensões, obtidas nas cadeias de isoladores, apresentaram comportamentos distintos que, por consequência, culminaram em diferenças significativas no desempenho da linha de transmissão, dependendo da resistividade do solo e da topologia do sistema de aterramento. Portanto, para o correto dimensionamento, é necessária a avaliação de cada cenário e suas características para ser possível simular com precisão satisfatória o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

5.0 AGRADECIMENTOS

Esse trabalho recebeu um apoio parcial das seguintes instituições: CAPES (Coordenação de aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Código 001), INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), e FAPERJ (Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro).

6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. R. A. R. Lima, *Dissertação de Mestrado. Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Ferramenta Computacional e Análise de Medidas Mitigatórias não convencionais em Regiões com Restrições Ambientais*, Rio de Janeiro, 2020.
- [2] A. C. S. Lima, R. F. S. Dias e K. O. Salim, "An Open Framework for Lightning Performance of Overhead Transmission Lines," *XIV SIPDA*, 6 Outubro 2017.
- [3] A. Ametani e T. Kawamura, "A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan Using EMTP," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 867-875, 2005.
- [4] IEEE Working Group Report, "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, pp. 1254-1267, 1993.
- [5] A. C. S. Lima e C. Portela, "Inclusion of Frequency Dependent Soil Parameters in Transmission Line Modeling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 492-498, Janeiro 2007.
- [6] F. Heidler, J. M. Cvetié e B. V. Stanié, "Calculation of Lightning Current Parameters," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n. 2, pp. 399-404, 1999.
- [7] A. D. Conti e S. Visacro, "Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, n. 2, pp. 448-451, 2007.
- [8] A. C. S. Lima, R. A. R. Moura, P. H. N. Vieira, M. A. O. Schroeder e M. T. C. Barros, "A Computational Improvement in Grounding Systems Transient Analysis," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019.
- [9] E. D. Sunde, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, New York: Dover Publications, 1949.
- [10] R. S. Alípio, *Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e Frequência*, Belo Horizonte, 2008.
- [11] S. Visacro e S. J. A., "HEM: A Model for Simulation of Lightning-related Engineering Problems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, pp. 1206-1208, 2005.
- [12] S. Visacro e R. Alípio, "Frequency Dependence of Soil Parameters Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 927-935, 2012.
- [13] L. Grcev, "Impulse Efficiency of Ground Electrodes," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 441-451, Janeiro 2009.
- [14] R. O. Caldwell e M. D. Darveniza, "Experimental and Analytical Studies of the Effect of Non-Standard Waveshapes on the Impulse Strength of External Insulation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 92, pp. 1420-1428, 1973.

- [15] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Press, 1999.
- [16] F. H. Silveira e S. Visacro, "Lightning Parameters of a Tropical Region for Engineering Application: Statistics of 51 Flashes Measured at Morro do Cachimbo and Expressions for Peak Current Distributions," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibilty*, vol. 62, pp. 1186-1191, 2020.
- [17] CIGRE Working Group 01 (Lightning), "Brochure 63 - Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines," 1991.

DADOS BIOGRÁFICOS



Nasceu no Rio de Janeiro-RJ, em fevereiro de 1990. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UERJ (2013), Tecnologia da Computação pela UFF (2018) e mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/UFRJ (2020). Desde 2013 atua como engenheiro eletricitista de projetos eletromecânicos de linhas de transmissão na Marte Engenharia. Principais áreas de interesse são sistemas de aterramento e desempenho de linhas de transmissão.

(2) ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA

Antonio C. S. Lima recebeu o título de engenheiro eletricitista pela UFRJ em fevereiro de 1995, o título de mestre e doutor em ciências pela COPPE/UFRJ em 1997 e 1999, respectivamente. Durante o ano de 1998, foi Visiting Scholar no Department of Electrical and Computer Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada. De 2000 até 2002, atuou no Operador Nacional do Sistema, ONS, e a desde 2002 transferiu-se para a UFRJ como professor da Escola Politécnica e da COPPE/UFRJ. Atualmente é professor titular da UFRJ, Senior Member do IEEE e coordenador do PEE, COPPE/UFRJ.