Desempenho de Linhas de Transmissão Considerando as Correlações Estatísticas de Descargas Atmosféricas e a Modelagem do Aterramento

Allison Altieris de Oliveira * **Gabriel Carlos P. Silva** *
João Nóbrega Neto * **Rodolfo Antônio R. Moura** *
Marco Aurélio O. Schroeder * **Fernando A. Assis** *
Antonio C. S. Lima **

* *Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, MG, (e-mails: allison_alti@yahoo.com.br, gabrielcarlospena8@aluno.ufsj.edu.br, joao_nobrega9@hotmail.com, moura@ufsj.edu.br, schroeder@ufsj.edu.br, fernandoassis@ufsj.edu.br).*
** *Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), RJ, (e-mail: acsl@coppe.ufrj.br).*

Abstract: This study presents a computational analysis of the behavior of transmission lines under lightning strikes, adopting a deterministic approach. For this purpose, the lightning current was simulated with predefined increments, aiming to identify the minimum value capable of causing system disruption. The employed model uses Heidler sources, with the possibility of considering or disregarding the statistical correlations between the parameters of the first negative return strokes recorded at the Morro do Cachimbo Station. Through simulations, backflashover rates were obtained for the 138 kV transmission system considering grounding modeling and the consideration or not of statistical correlations between discharge parameters as sensitivity analysis factors. The results illustrate significant sensitivity, impacting backflashover rates in high percentages.

Resumo: Este estudo apresenta uma análise computacional do comportamento de linhas de transmissão diante de descargas atmosféricas, adotando uma abordagem determinística. Para tal, a corrente de descarga atmosférica foi simulada com incrementos predefinidos, buscando identificar o valor mínimo capaz de provocar a disrupção do sistema. O modelo empregado utiliza fontes de Heidler, com a possibilidade de considerar ou desconsiderar as correlações estatísticas entre os parâmetros das primeiras descargas de retorno descendentes negativas registradas na Estação do Morro do Cachimbo. Através das simulações foram obtidos indicadores de desempenho para o sistema de transmissão de 138 kV considerando como fatores de análises de sensibilidade a modelagem do aterramento e a consideração ou não das correlações estatísticas entre os parâmetros de descarga. Os resultados ilustram uma significativa sensibilidade, impactando os indicadores de desempenho em percentuais elevados.

Keywords: Lightning; Transmission Lines; Alternative Transients Program; Lightning Performance; Vector Fitting; Grounding Modeling.

Palavras-chaves: Descargas atmosféricas; Linhas de transmissão; Alternative Transients Program; Desempenho de linhas; Vector Fitting; Modelagem de aterramento.

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento confiável e seguro de energia elétrica é imprescindível para a sustentação e a conservação das atividades socioeconômicas da região de abastecimento. As linhas de transmissão (LTs), responsáveis por transportar energia, são consideradas componentes críticos, contudo, sua operação contínua pode ser afetada por falhas, erros humanos e, principalmente, descargas atmosféricas (DAs). E consequentemente, uma vez ocorrida a interrupção, este fator reduz a confiabilidade na prevenção e detecção do sistema projetado pela concessionária perante aos surtos.

As DAs representam um grande perigo para as LTs, resultando em danos nos equipamentos, interrupções no fornecimento de energia e, em circunstâncias críticas, acidentes fatais. Estudar a disrupção causada por DAs é crucial para garantir a operação segura dos sistemas. Este estudo

⋆ Esta pesquisa foi apoiada em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) sob o auxílio 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob os auxílios 402923/2021-9 e 404068/2020-0, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) sob o auxílio APQ-03609-17, pelo Instituto Nacional de Energia Elétrica (INERGE) e pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

analisa o comportamento das LTs diante de perturbações de DAs, simulando a corrente de DA para identificar o ponto de disrupção, e obter indicadores de desempenho para sistemas reais, contribuindo para o desenvolvimento de medidas de proteção mais eficazes.

Diversas investigações acerca dos métodos de estimativa do desempenho de LTs frente às DAs foram realizadas, visando conhecer melhor o fenômeno e, consequentemente, reduzir o índice de desligamentos não programados. Este trabalho encontra-se neste contexto, com objetivo de realizar análises de sensibilidade em relação à necessidade da inclusão das relações de correlação estatística entre os parâmetros de ondas de corrente de descargas nas estimativas de desempenho, especialmente para o solo de Minas Gerais, cuja resistividade elétrica pode variar deste 60 Ωm até 20000 Ωm (Alipio, 2013).

Inicialmente, é apresentada, na Seção 2, a modelagem utilizada no *Alternative Transients Program* (ATP) para representar o sistema de transmissão de 138 kV com o enfoque na inclusão das correlações estatísticas entre os parâmetros das ondas de corrente e a modelagem do aterramento. Na Seção 3, é enfatizada a utilização do método determinístico para estimar o *backflashover rate* através de simulações computacionais a partir de um tratamento alternativo para as variáveis aleatórias pertinentes ao desempenho da linha. A Seção 4 visa compartilhar os resultados obtidos mais relevantes e proeminentes do estudo por meio das simulações projetadas em tabelas. Por fim, na Seção 5, são apresentadas as principais conclusões acerca do estudo realizado.

2. MODELAGEM

2.1 Considerações Iniciais

O estudo apresenta uma análise computacional do comportamento de LTs diante de DAs, adotando uma abordagem determinística. Para isso, foram desenvolvidos módulos no *software* ATP para representar os diferentes componentes da linha, bem como, as fontes envolvidas e, assim, ser capaz de realizar os cálculos de parâmetros necessários para estudo. Os módulos desenvolvidos incluem a representação do trecho da linha, do modelo das torres, do modelo das fontes de tensão (com determinação da frequência de operação), do modelo de aterramento e, também, do modelo da própria corrente da DA (Velasco and Aranda, 2002).

O modelo de linha aérea é obtido pelas rotinas auxiliares do ATP. A fonte de alimentação é representada por um modelo trifásico com três fontes de tensão controladas e defasadas entre si. A impedância de aterramento é representada por uma impedância cujo valor depende da intensidade da corrente à terra e que no ATP é representado por um bloco a partir do objeto *Library*. As DAs são representadas por uma fonte de corrente a partir do modelo de Heidler, com parâmetros previamente tabelados (Heidler et al., 1999).

2.2 Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas

As DAs são um dos principais fenômenos modelados no estudo de desempenho de LTs. A modelagem adequada das formas de onda deve considerar principalmente a forma côncava da frente de onda, a derivada máxima próximo ao valor de pico e o decaimento da onda (Working Group 33.01, 1991). Dada sua importância, trabalhos dedicaram-se a investigar os parâmetros das formas de onda de descarga, via torres instrumentadas, como apresentado por Berger et al. (1975) e Visacro et al. (2004).

Analisando várias medições de ondas de corrente de DAs em Berger et al. (1975); Visacro et al. (2004), nota-se que as ondas típicas das primeiras descargas de retorno exibem dois picos de corrente, o primeiro (I_{P1}) e o segundo pico (I_{P2}). Além disso, observa-se uma correlação linear significativa entre os parâmetros I_{P1} e I_{P2}. Segundo as medições, pode-se perceber também que existe uma correlação entre os tempos de frente das DAs e os picos de corrente. Tempo de frente esse que pode ser estimado pelo parâmetro T_{30} (intervalo de tempo entre amplitudes em que ocorre pela primeira vez 30% e 90% do valor máximo de corrente).

Por meio das análises de regressão apresentadas por Visacro et al. (2004), são obtidas expressões de correlação estatística, como representam (1) e (2).

$$I_{P2} = 1,06{I_{P1}}^{1,01} \tag{1}$$

$$T_{30} = 0,12{I_{P1}}^{0,87} \tag{2}$$

Neste estudo, a forma de onda da corrente de descarga é descrita como um somatório de sete funções de Heidler (Heidler et al., 1999). Essa abordagem modela de forma precisa a concavidade da frente de onda, a derivada máxima próxima ao valor máximo e o decaimento da onda. A inclusão das correlações estatísticas dos parâmetros de descarga no somatório de funções de Heidler é realizada utilizando a metodologia proposta por Oliveira et al. (2017). Dessa forma, a construção das ondas de corrente de descarga seguem os seguintes passos:

i) Cálculo de I_{P2} utilizando (1);
ii) Cálculo de T_{30} utilizando (2);
iii) Ajuste da forma de onda de corrente via metodologia de Oliveira et al. (2017) [1] .

Para análises de sensibilidade, formas de ondas de corrente de descarga desconsiderando as relações de correlação estatística também são construídas. Neste caso, os parâmetros de tempo de frente e cauda são mantidos fixos nos valores medianos, e apenas o valor do pico de corrente é alterado (Oliveira et al., 2017).

No ATP, a forma de onda da corrente de descarga é modelada por sete fontes *Heidler type 15*. Para considerar as perdas no canal de descarga, um resistor é inserido em paralelo com a fonte de corrente. A resistência do canal de descarga assumida é de 1500 Ω, valor este usualmente utilizado na literatura (Leon Colqui et al., 2023). Ademais, somente a primeira descarga de retorno é considerada nos estudos de desempenho de LTs deste trabalho, visto que possuem a maior amplitude e maior duração comparadas com as descargas subsequentes (Hileman, 1999).

[1] O instante de tempo na cauda relativo ao valor de 50% do pico de corrente (T_{50}) foi adotado como o valor mediano (50%) das medições realizadas por Visacro et al. (2004). Esta escolha se deve ao fato de que esse tempo tem um impacto reduzido no desempenho das LTs.

Tabela 1. Parâmetros do sistema de transmissão de 138 kV.

nº de condutores/fase	1	nº de cabos PR	1
Código das fases	Penguin	Código do cabo PR	5/16" HS
Altura da fase A	22,15 m	Altura do cabo PR	26,55 m
Altura da fase B	20,35 m	Flecha do cabo PR	8,57 m
Altura da fase C	18,55 m	Distância horizontal entre os cabos fase	5,5 m
Flecha das fases	11,54 m		

2.3 Cabos Aéreos

Neste trabalho, os cabos aéreos são modelados através do modelo de Marti (1982). Este é adequado para estudos que envolvem transitórios eletromagnéticos, pois considera os parâmetros distribuídos das linhas. No ATP, o modelo de Marti (1982) é facilmente acessado via rotina *Line Constant Cables* (LCC). Os parâmetros geométricos de entrada na rotina LCC do ATP são implementados conforme mostrado a Tabela 1.

As extremidades das LTs são modeladas assumindo um comprimento suficientemente elevado tal que o intervalo de tempo para que as reflexões alcancem a torre central seja maior que o tempo de simulação. Para tanto, considera-se um comprimento das LTs nas extremidades de 5 km.

2.4 Modelo das Torres

O estudo de De Conti et al. (2006) propõe uma versão aprimorada da fórmula de Jordan para calcular a impedância de surto em torres, tornando-a mais eficaz em cenários reais com múltiplos condutores. A fórmula aprimorada é validada através de medições, utilizando como referência o *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) (Visacro and Soares, 2005) e simulações com o ATP. Os resultados demonstram que ambas as abordagens são boas aproximações para emular o comportamento de torres através da impedância, fornecendo uma ferramenta valiosa para análise e projeto de estruturas sob DAs.

Inicialmente, a torre de transmissão central é seccionada em quatro impedâncias de surto. Tais partições correspondem a um segmento de interesse da torre e que podem ser modeladas por linhas sem perdas no ATP. Dessa forma, é possível obter as sobretensões nas cadeias de isoladores. Assume-se que a velocidade de propagação das ondas nas torres é 80% da velocidade da luz no vácuo, a fim de compensar os possíveis atrasos na propagação ao longo da torre.

Vale ressaltar que, como não há o interesse em avaliar as tensões nas cadeias de isoladores nas demais torres, estas são modeladas apenas como uma impedância de surto conectada diretamente com o modelo de aterramento implementado.

2.5 Aterramento das Torres

No contexto da interação direta de DAs em LTs, o sistema de aterramento emerge como um dos principais fatores para a ocorrência ou prevenção de disrupções na cadeia de isoladores. As sucessivas reflexões ocorridas na interseção entre a torre e o aterramento influenciam diretamente nas sobretensões ao longo da torre (IEEE Std 1243, 1997; Hileman, 1999). Assim, uma representação adequada do sistema de aterramento torna-se um aspecto crucial nos estudos de desempenho diante das DAs.

Tabela 2. L_{ef}, R_{LF} e Z_P em função de ρ.

ρ (Ωm)	L_{ef} (m)	R_{LF} (Ω)	Z_P (Ω)
300	36	4,9650	4,3966
1000	70	9,7870	7,9301
2500	113	16,5925	11,5748
10000	227	36,5335	18,3020

Neste trabalho, são propostas três modelagens para a representação do aterramento: resistência de baixas frequências (R_{LF}), impedância impulsiva[2] (Z_P) e impedância harmônica ($Z(\omega)$). R_{LF} refere-se à resistência da configuração de aterramento para uma excitação de baixas frequências. Z_P é definida como a razão entre os valores de pico da elevação de potencial no ponto de injeção e da corrente impulsiva injetada. $Z(\omega)$, por sua vez, é definida como a razão entre os fasores de elevação de potencial no ponto de injeção e a corrente injetada, assumindo a corrente como 1 pu.

Entretanto, é fundamental introduzir inicialmente o conceito de comprimento efetivo (L_{ef}). Quando o sistema de aterramento é sujeito a correntes impulsivas, a corrente dispersa para o solo através do aterramento e apresenta uma distribuição não uniforme, devido ao fenômeno de atenuação. Assim, o comprimento efetivo corresponde ao ponto em que a atenuação se torna tão significativa que a corrente dispersada para o solo se torna desprezível. Portanto, aumentos no comprimento além de L_{ef} não resultam em reduções de Z_P.

A Tabela 2 apresenta os valores de L_{ef}, R_{LF} e Z_P para diferentes resistividades do solo[3] (ρ), sendo estas 300, 1000, 2500 e 10000 Ωm. A Figura 1 ilustra os módulos e as fases de $Z(\omega)$ para os mesmos valores de ρ. Os dados da Tabela 2 e da Figura 1 foram calculados utilizando o HEM (Visacro and Soares, 2005), que tem sido amplamente empregado em diversas aplicações de engenharia, incluindo modelagem de aterramentos, como por Visacro et al. (2015). As simulações foram realizadas considerando o L_{ef} para os diferentes valores de ρ, e a corrente de primeira descarga de retorno registrada no Morro do Cachimbo (Visacro et al., 2004), conforme as formulações apresentadas por Moura et al. (2023). Para todas as formulações, foi levada em conta a dependência da frequência dos parâmetros do solo, conforme descrito por Visacro and Alipio (2012).

No ATP, R_{LF} e Z_P são representados por uma resistência linear, enquanto $Z(\omega)$ é representado por uma função racional ajustada através do método *Vector Fitting* (Gustavsen and Semlyen, 1999). A inclusão dessa função no ATP é realizada por meio de uma *Library*, que representa a função racional como um circuito elétrico sintetizado (Gustavsen, 2010).

[2] Embora seja denominada "impedância", Z_P é uma grandeza definida no domínio do tempo, não no domínio da frequência.
[3] A permissividade elétrica relativa do solo é igual à 10 para todos os casos.

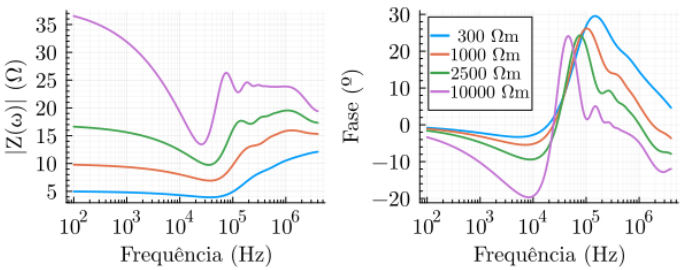

Figura 1. Módulos e fases de $Z(\omega)$ em função de ρ.

2.6 Cadeia de Isoladores

O processo disruptivo sobre a cadeia de isoladores é representado por uma curva tensão *versus* tempo ($v \times t$), cuja expressão é dada em (3).

$$V = \left(400 + \frac{710}{t^{0,75}}\right) d \tag{3}$$

onde V é o valor de pico da tensão de suportabilidade (em kV), d é o comprimento da cadeia de isoladores (em m) e t é o tempo de ocorrência da disrupção (em μs).

Segundo IEEE Std 1243 (1997), a Equação (3) é obtida via ensaios com formas de ondas de impulso padronizadas e é valida somente para uma faixa de valores empíricos. Entretanto, o modelo curva $v \times t$ é utilizado neste trabalho devido a facilidade de implementação, visto que é necessário conhecer apenas os picos das formas de ondas das sobretensões nos isoladores e os instantes de tempo que ocorrem para determinar a disrupção.

3. METODOLOGIA

3.1 Interação entre Descargas Atmosféricas e Linhas de Transmissão

A incidência direta de DAs no sistema de transmissão pode resultar em desligamentos devido a dois fenômenos: *flashover* e *backflashover*. O *flashover* ocorre quando há falha na blindagem dos cabos para-raios, levando a uma corrente direta no cabo fase. Se o campo elétrico for suficientemente intenso, a rigidez dielétrica da cadeia de isoladores pode ser ultrapassada, formando um arco elétrico, ou seja, um curto-circuito. Já o *backflashover* acontece quando a descarga incide nos cabos para-raios ou no topo da torre. Se os campos elétricos sobre as cadeias de isoladores, causados pela descarga, ultrapassarem sua capacidade de suportabilidade, um arco elétrico se forma.

A modelagem da incidência de DAs em estruturas consiste em um tema bastante complexo. No contexto de desempenho de LTs, essas modelagens têm como objetivo calcular o número total de descargas que atingem uma estrutura (N_{LT}). O modelo mais amplamente indicado em normas técnicas é o modelo eletrogeométrico (MEG) (IEEE Std 1243, 1997). Entretanto, neste trabalho é utilizada uma versão simplificada do MEG (Alvarez, 2011). Basicamente, a estimativa do N_{LT} é determinada pela área de atração equivalente multiplicada pela densidade de DAs para a terra[4] (N_G), como apresentado em (4).

$$N_{LT} = 0,1 N_G (b + 28H^{0,6}) \tag{4}$$

[4] Neste trabalho, para determinar N_{LT} utiliza-se N_G unitário.

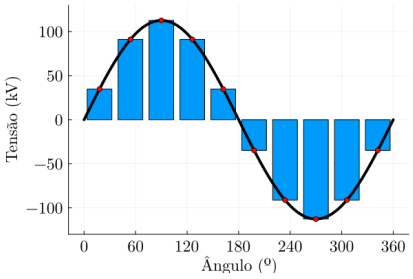

Figura 2. Discretização da curva de tensão de fase.

onde H é a altura média dos condutores mais expostos em relação ao solo (em m) e b é a distância horizontal entre os condutores mais expostos (em m).

3.2 Cálculo da Taxa de Backflashover

Os métodos de desempenho de LTs frente às DAs tem como objetivo estimar a taxa de desligamentos, usualmente em disrupções por 100 km de linha por ano. Como o problema envolve diversas variáveis aleatórias, sendo a principal delas as DAs, métodos probabilísticos como o Monte Carlo são extensivamente utilizados (Martinez and Castro-Aranda, 2005; Velasco et al., 2018).

Neste trabalho, as taxas de desempenho da linha são calculadas sob uma perspectiva determinística. Ou seja, os valores de taxas de desempenho são calculados via método iterativo, e as variáveis aleatórias recebem um tratamento alternativo. Ademais, neste trabalho são estimadas apenas *backflashover rate* (BFOR), enquanto *shielding failure flashover rate* (SFFOR) é desconsiderada. Como o objetivo principal do trabalho é analisar o impacto das correlações das correntes das descargas em conjunto com o modelo do aterramento, essa desconsideração é justificada, visto que o aterramento não entra na estimativa das SSFFOR.

Entre os fatores pertinentes para determinar as taxas de desempenho de LTs, a tensão de operação do sistema deve ser computada. Basicamente, devido a defasagem de 120° entre os fasores de tensão nas fases A, B e C, a máxima tensão sobre as cadeias de isoladores ocorre em instantes de tempo alternados (Hileman, 1999). E durante um transitório proveniente da interação da LT com DAs, a tensão de operação pode ser um fator que facilita ou dificulta a formação de um arco elétrico no ar circunvizinho do isoladores.

Neste trabalho, as tensões de operação são discretizadas, considerando o ângulo de operação, como apresenta a Figura 2. Ressalta-se que é suficiente discretizar as tensões de uma das fases, pois as tensões de operação das demais fases estão defasadas de 120° em relação a primeira. Desta forma, é possível determinar a BFOR para valores discretos de tensão de operação. O BFOR da LT é determinado pela média dos valores de BFOR de cada valor discreto de tensão de operação. Pode-se simplesmente utilizar a média, pois a distribuição de probabilidade das tensões de operação é uniforme, isto é, cada valor discreto tem a mesma probabilidade de ocorrência.

Outros fatores pertinentes são os parâmetros de DA. Para tal, é utilizado o desenvolvimento supracitado na seção 2. A metodologia utilizada para a inclusão das correlações

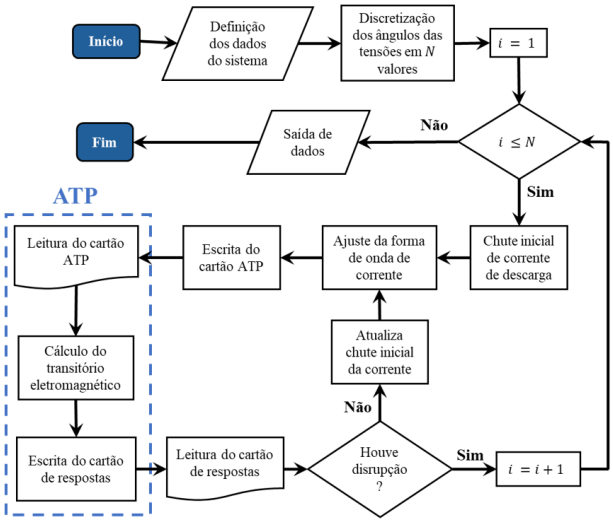

Figura 3. Fluxograma da metodologia utilizada para cálculo de BFOR.

estatísticas entre os parâmetros da corrente de descarga é descrita a seguir:

i) Escolhe-se um valor para o parâmetros I_{P1};
ii) Calcula-se I_{P2} e T_{30} utilizando (1) e (2);
iii) Ajusta-se a forma de onda de descarga utilizando a métodologia proposta em Oliveira et al. (2017);
iv) Simula-se o transitório eletromagnético no ATP;
v) Calculam-se as sobretensões nas cadeias de isoladores concentrando-se nas que estão associadas com disrupções, utilizando a curva $v \times t$.

Este processo iterativo é repetido até que o mínimo valor de pico de corrente de descarga que provoca disrupção em uma das cadeias de isoladores seja encontrado, este é denominado corrente crítica (I_{CR}). Para desconsiderar as relações de correlações estatísticas, basta computar apenas o ajuste do valor de pico de corrente no passo iii).

Finalmente, a metodologia para estimar a BFOR é a seguinte: determina-se a estimativa de N_{LT} através de (4). Em seguida, determina-se a probabilidade na qual o valor de pico de corrente é maior ou igual a I_{CR}, utilizando (5) (IEEE Std 1243, 1997). O valor de BFOR é calculado pelo produto entre N_{LT} e a probabilidade de ocorrência de I_{CR}.

$$P\left(I \geq I_P\right) = \frac{1}{1 + \left({}^{I_P}/_{45}\right)^{4,7}} \tag{5}$$

Para executar o processo descrito, foi implementada uma rotina computacional para a automatização das sucessivas simulações no *software* ATP. A Figura 3 mostra o fluxograma da rotina implementada. Ressalta-se que os passos são os mesmos do processo descrito, exceto pelos passos adicionais de comunicação entre rotina computacional e ATP, via arquivos (ou cartões) atp e txt.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

O sistema de transmissão base para os estudos de desempenho corresponde a uma linha da CEMIG com nível de tensão de 138 kV e comprimento médio dos vãos de 333 m. O sistema simulado compreende sete torres transmissão e o aterramento de cada torre é composto por quatro cabos contrapeso, enterrados a 0,5 m de profundidade.

Tabela 3. BFOR ($^{n^\circ BF}/_{km \cdot ano}$) e ΔBFOR (%), em função dos valores de ρ e modelos de torres - CC: Com Correlação e SC: Sem Correlação.

Modelos	ρ (Ωm)	BFOR ($^{n^\circ BF}/_{km \cdot ano}$)		ΔBFOR (%)
		CC	SC	
R_{LF}	300	0,0290	0,1523	-80,9340
	1000	0,2653	0,5297	-49,9101
	2500	1,5958	1,7704	-9,8613
	10000	9,8384	9,3169	5,5975
Z_P	300	0,0215	0,1266	-83,0091
	1000	0,1104	0,3340	-66,9601
	2500	0,4476	0,7196	-37,7970
	10000	1,8737	2,0337	-7,8715
$Z(\omega)$	300	0,0272	0,1805	-84,9379
	1000	0,1963	0,4988	-60,6394
	2500	0,7366	1,0736	-31,3924
	10000	2,6063	2,8561	-8,7476

Considerando as modelagens apresentadas na Seção 2 e as metodologias da Seção 3, nesta seção, são apresentadas as análises das simulações computacionais. A Tabela 3 apresenta os valores de BFOR (em número de *backflashover* por 100 km de linha por ano) para cada modelagem de aterramento e cada valor ρ, considerando ou não as correlações estatísticas entre os parâmetros de DAs. Ademais, a Tabela 3 apresenta também as diferenças percentuais (ΔBFOR), em %, para as simulações em que se consideram e desconsideram as correlações (CC e SC, respectivamente), tomando como referência os resultados SC.

Observando os resultados da Tabela 3, nota-se que à medida que ρ aumenta, a BFOR também aumenta em todos os casos. Este resultado é esperado, uma vez que, conforme ρ aumenta, a impedância de aterramento também aumenta, como mostrado na Tabela 2. A impedância de aterramento é um dos principais fatores determinantes das sobretensões nas cadeias de isoladores (IEEE Std 1243, 1997). Quando uma DA atinge a torre, estabelece-se um regime transitório. Uma onda de sobretensão viaja desde o topo da torre até o ponto de interseção entre a torre e o sistema de aterramento. Quando essa onda encontra essa descontinuidade, ocorre uma reflexão negativa de tensão, que reduz a sobretensão ao longo da torre, principalmente nas cadeias de isoladores. Dessa forma, o campo elétrico (associado ao efeito integral das sobretensões) não é capaz de romper a rigidez dielétrica do ar próximo ao isolador. Como resultado, a BFOR diminui.

Na Tabela 3, para cada modelagem de aterramento, à medida que ρ aumenta, BFOR de CC e SC tornam-se mais próximos. Entretanto, para os valores inferiores de ρ o sistema de aterramento tem bom desempenho na proteção do sistema, mesmo que ΔBFOR seja expressivo nestes casos. Logo, deve-se atentar para ΔBFOR para valores médios e grandes de ρ, pois diferenças pequenas de BFOR podem afetar sensivelmente o desempenho da LT.

Para a maioria dos casos analisados, a BFOR considerando as correlações estatísticas entre os parâmetros de descarga é inferior à BFOR estimada desconsiderando as correlações, para o mesmo modelo de aterramento e ρ. Isso ocorre porque as correlações estatísticas aumentam o tempo de

frente conforme o pico de corrente aumenta, ajustando formas de onda menos impulsivas para picos de corrente acima de seus valores medianos (Visacro et al., 2004). O que não ocorre quando as correlações são desconsideradas, gerando formas de onda de corrente mais impulsivas, e que causam disrupções mais facilmente.

Entretanto, quando I_{CR} é menor que o valor de pico da forma de onda de corrente de descarga mediana, a situação se inverte: a BFOR desconsiderando as correlações estatísticas é menor que a BFOR considerando as correlações. Isto implica que, para valores de ρ expressivamente grandes[5] associados a I_{CR} abaixo da corrente de pico mediana das medições (Visacro et al., 2004), desconsiderar as correlações estatísticas pode corresponder a subestimar a BFOR. Como exemplo, vide o resultado de R_{LF} para 10000 Ωm.

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho são realizadas análises de sensibilidade da *backflashover rate* (BFOR) de uma linha de transmissão de 138 kV, em relação aos seguintes fatores: resistividade do solo, modelagem do sistema de aterramento e inclusão (ou não) das correlações estatísticas entre os parâmetros de descargas atmosféricas na modelagem da forma de onda de corrente.

Os resultados demonstram uma sensibilidade significativa das BFOR em relação aos parâmetros analisados, especialmente durante a análise da interseção dos fatores: modelagem do sistema de aterramento para valores elevados de resistividade do solo e incorporação das relações estatísticas de correlação na forma de onda de descarga. A análise conjunta desses fatores ressalta a importância de considerar as correlações estatísticas. A investigação desses aspectos requer estudos quantitativos adicionais, visando avaliar práticas de proteção em sistemas elétricos.

REFERÊNCIAS

Alipio, R.S. (2013). *Dependência da Frequência dos Parâmeros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos*. Ph.D. thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.

Alvarez, C.G.C. (2011). Um ambiente computacional para análise de desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. PPGEL/UFSJ.

Berger, K., Anderson, R.B., and Kroninger, H. (1975). Parameters of lightning flashes. *Electra*, 223–237.

De Conti, A., Visacro, S., Soares, A., and Schroeder, M. (2006). Revision, extension, and validation of jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 48(3), 530–536.

Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(3), 1052–1061.

Gustavsen, B. (2010). Fast passivity enforcement for s-parameter models by perturbation of residue matrix eigenvalues. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 33(1), 257–265.

Heidler, F., Cvetic, J., and Stanic, B. (1999). Calculation of lightning current parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14(2), 399–404.

Hileman, A.R. (1999). *Insulation Coordination for Power Systems*. Taylor & Francis Group, LLC.

IEEE Std 1243 (1997). IEEE guide for improving the lightning performance of transmission lines.

Leon Colqui, J.S., Ribeiro de Moura, R.A., De Oliveira Schroeder, M.A., Filho, J.P., and Kurokawa, S. (2023). The impact of transmission line modeling on lightning overvoltage. *Energies*, 16(3), 1343.

Marti, J.R. (1982). Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(1), 147–157.

Martinez, J. and Castro-Aranda, F. (2005). Lightning performance analysis of overhead transmission lines using the emtp. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(3), 2200–2210.

Moura, R.A.R., Lima, A.C.S., and Vieira, P.H.N. (2023). Practical equations to estimate the effective length of transmission tower grounding considering the frequency dependence of the soil. *International Conference on Grounding Lightning Physics and Effects, GROUND2023 & 10th LPE*.

Oliveira, A.J., Schroeder, M.A.O., Moura, R.A.R., Correia de Barros, M.T., and Lima, A.C. (2017). Adjustment of current waveform parameters for first lightning strokes: Representation by heidler functions. In *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, 121–126.

Velasco, J.A.M. and Aranda, F.C. (2002). Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas aéreas de transporte. Parte II: Cálculo estadístico de sobretensiones. *Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona*.

Velasco, J.A.M., Araujo, J.C., and Bedoui, S. (2018). Lightning performance analysis of transmission lines using the monte carlo method and parallel computing. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingenieria*, 26(3), 398–409.

Visacro, S. and Alipio, R. (2012). Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 927–935.

Visacro, S., Alipio, R., Pereira, C., Guimarães, M., and Schroeder, M.A.O. (2015). Lightning response of grounding grids: Simulated and experimental results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(1), 121–127.

Visacro, S. and Soares, A. (2005). HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(2), 1206–1208.

Visacro, S., Jr., A.S., Schroeder, M.A.O., Cherchiglia, L.C.L., and de Sousa, V.J. (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station. *Journal of Geophysical Research*.

Working Group 33.01 (1991). Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines.

[5] Vale destacar que nas medições de Alipio (2013) é mostrado que ρ compreende uma faixa de 60 Ωm até 20000 Ωm, para os solos de Minas Gerais.