

Evaluation of the Lightning Performance of Transmission Lines Partially Protected by Surge Arresters Considering the Frequency-Dependent Behavior of Grounding

F. M. de Vasconcellos, R. Alipio, F. A. Moreira

Abstract— This work evaluates the efficiency of installing surge arresters in only one or two phases concerning the lightning performance of transmission lines. The simulations were performed in the ATP software, taking as reference a Brazilian 138 kV transmission line, and considering the rigorous representation of the frequency dependent behavior of the tower footing impedance. The electrical parameters of the soil were considered as either constants or frequency-dependent, in order to analyze the influence of this effect in partially protected lines. The results obtained have shown that the partial protection technique is highly efficient. Although it does not guarantee the protection of the unprotected phase(s), the probability of insulation breakdown is strongly decreased. It was also verified that the inclusion of the frequency-dependent effect in the soil parameters significantly reduces the backflashover rate estimates of the studied line when compared to the constant values situation.

Index Terms— transmission lines; surge arresters; lightning performance; backflashover rate; hybrid simulations.

I. INTRODUÇÃO

Os dispositivos para-raios são frequentemente instalados em linhas de transmissão para melhorar suas características de ruptura ao isolamento ocasionadas por descargas atmosféricas e aumentar a confiabilidade do sistema de energia [1]. Devido à restrição de custos, os para-raios são instalados principalmente em áreas com alta densidade de descargas atmosféricas para o solo e/ou locais onde é difícil alcançar valores de impedância de aterramento suficientemente baixas devido à alta resistividade do solo. Pela mesma razão, é uma prática comum instalar para-raios de linha em apenas uma ou duas fases da torre [2]-[3].

Ambas as condições, ou seja, altos valores de resistividade do solo e alta densidade de descargas atmosféricas para o solo, são típicas no Brasil. Além disso, as correntes de descargas atmosféricas no Brasil, de acordo com as medidas da Estação

do Morro do Cachimbo [4], apresentam valores de pico medianos mais altos do que aqueles medidos na Estação San Salvatore [5], geralmente assumidos como referência na literatura internacional, aumentando a probabilidade de ruptura de isolamento ao longo da linha.

Em simulações do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas protegidas por para-raios, os programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) são frequentemente utilizados. Isto é normalmente devido à modelagem direta das características não lineares dos para-raios nestes programas, que empregam análises no domínio do tempo para simular transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia. Nessas simulações, o sistema de aterramento é tipicamente modelado como uma resistência concentrada, negligenciando as características dependentes da frequência tanto dos parâmetros elétricos do solo quanto da impedância do pé da torre [4], [6]-[7]. Isto é decorrência da tarefa desafiadora de considerar simultaneamente o comportamento não-linear dependente do tempo dos para-raios e as características dependentes da frequência do aterramento [5].

As simulações neste estudo são realizadas no *Alternative Transients Program* (ATP) [8], uma vez que os para-raios são modelados eficientemente em ferramentas de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo, como mencionado anteriormente. Entretanto, neste trabalho, o comportamento de banda larga do sistema de aterramento é incluído nas simulações de domínio de tempo por um circuito equivalente sintetizado usando o método do *Vector Fitting* [9], após ter sido inicialmente modelado usando o rigoroso *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM) [10] no domínio da frequência. Além disso, as simulações foram feitas sob a suposição de parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência, considerando um rigoroso modelo causal [11] para realizar uma análise de sensibilidade deste efeito sobre os resultados.

Em trabalhos anteriores dos autores [12]-[13] e em outros trabalhos recentes [14]-[16] foram realizadas avaliações acerca das respostas impulsivas de linhas de transmissão através da aplicação de para-raios considerando o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento das linhas. Em [14] e [15], avaliou-se o comportamento das sobretensões nas cadeias de isoladores, enquanto em [16] foi feito um estudo

F. M. de Vasconcellos, is with the Superintendency of the Environment and Infrastructure, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil (e-mail: felipe.vasconcellos@ufba.br).

R. Alipio, is with the Department of Electrical Engineering, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil (e-mail: rafael.alipio@cefetmg.br).

F. A. Moreira, is with the Department of Electrical and Computer Engineering, Federal University of Bahia, Salvador, Bahia, Brazil (e-mail: moreiraf@ufba.br).

da absorção da energia dos dispositivos para-raios, sabendo-se que esta é uma característica fundamental na especificação destes equipamentos.

Porém, até onde vai o conhecimento dos autores, não existe um estudo abrangente no qual seja avaliado o impacto da inclusão destes dispositivos simultaneamente com o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento na taxa estimada de desligamentos de linhas de transmissão por *backflashover*. Sabe-se que este é um parâmetro de bastante interesse em aplicações de engenharia, pois os desligamentos não programados causam prejuízos tanto de ordem financeira quanto social, e assim entende-se que esta é a principal contribuição deste trabalho.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II aborda o estudo de caso testado e as diretrizes de modelagem dos elementos dos sistemas de energia. Na Seção III, as formas de onda e os resultados numéricos são apresentados e discutidos. As conclusões são apresentadas na Seção IV.

II. ESTUDO DE CASO E DIRETRIZES DE MODELAGENS

Para avaliar a influência da instalação de para-raios de linha em uma ou duas fases no desempenho das linhas de transmissão em áreas com alta resistividade do solo, considera-se uma linha de transmissão de 138 kV semelhante às linhas encontradas no estado de Minas Gerais.

Neste trabalho, considera-se em todos os casos a incidência direta de uma descarga atmosférica no topo da torre. Esse caso foi considerado por se tratar da ocorrência mais severa quando se avalia o desligamento da linha por *backflashover* [17]. Dez torres adjacentes (idênticas à torre atingida) são incluídas nas simulações para considerar o efeito da propagação da onda ao longo dos condutores da linha e também as reflexões das torres adjacentes e seus sistemas de aterramento. Cinco vãos de 400 m de comprimento cada um são considerados em cada lado da torre atingida pela descarga incidente.

A Fig. 1 ilustra a silhueta típica da torre, projetada com um condutor ACSR por fase (código LINNET) e um cabo de blindagem (CB) EHS de 3/8". As coordenadas dos cabos das fases da linha (em metros) são A (2,9;28,72), B (-2,9;26,86), C (2,9;25) e CB (0;33,61). As coordenadas correspondem, respectivamente, à posição horizontal e à altura na torre de transmissão. O ponto (0, 0) está situado no centro da torre, à altura do solo. As flechas dos cabos fase e de blindagem valem 7 m e 4 m, respectivamente.

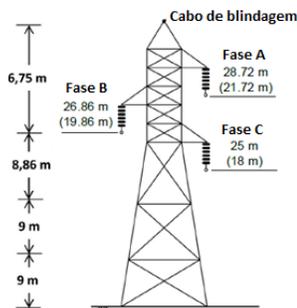


Fig. 1. Silhueta típica da torre sob análise.

O arranjo típico do sistema de aterramento das torres da

linha de transmissão está representado na Fig. 2.

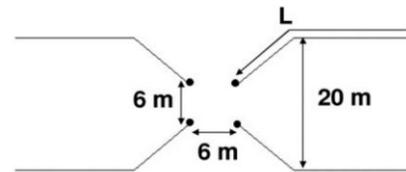


Fig. 2. Arranjo típico de aterramento de “pé” de torre.

Esta contém quatro cabos contrapesos de 7 mm de raio e enterrados a 0,8 m de profundidade no solo. O comprimento (L) dos cabos contrapeso é definido de acordo com a resistividade de baixa frequência do solo ρ_0 , conforme indicado na Tabela I. Vale ressaltar que, apesar de aparentemente altos, os valores de resistividade selecionados e apresentados na Tabela I são relativamente usuais no Brasil, principalmente no estado de Minas Gerais [11]. Além da representatividade de ocorrência desses valores, não faria sentido incluir no estudo baixos valores de resistividade do solo, visto que a aplicação de para-raios de linha nestes casos se configuraria em desperdício de recursos financeiros, pois nestes casos a redução do valor de impedância do aterramento das torres se configura como prática eficiente na redução dos desligamentos por *backflashover* [18]-[19].

O comprimento dos cabos foi definido pelo comprimento efetivo para primeiras descargas de retorno e também considerando as práticas locais de engenharia.

TABELA I.
COMPRIMENTO DOS CABOS CONTRAPESO EM FUNÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

ρ_0 ($\Omega \cdot m$)	1,000	3,000	5,000	10,000
L (m)	40	60	80	130

Vale salientar que as simulações realizadas neste trabalho foram realizadas no *Alternative Transients Program* (ATP) [8]. Nesse caso, os modelos adotados para os componentes do sistema, quais sejam, os condutores da linha de transmissão, a torre e o aterramento estão desacoplados eletromagneticamente entre si, embora tais acoplamentos sejam considerados entre os elementos de cada componente individual. A desconsideração dos acoplamentos entre as ferragens da torre e os condutores da LT possivelmente têm pouco efeito, uma vez que esses componentes são aproximadamente perpendiculares entre si. Já a desconsideração do acoplamento entre os elementos aéreos e enterrados parece não levar a desvios importantes, dada a validação experimental do modelo eletromagnético híbrido apresentada em [10] onde tal acoplamento é desconsiderado.

As diretrizes de modelagem do sistema de energia simulado são então brevemente descritas.

A. Forma de Onda da Corrente da Descarga Atmosférica

Uma avaliação adequada dos efeitos das descargas atmosféricas nos sistemas de energia baseia-se, entre outros fatores, em uma representação apropriada da forma de onda da corrente destas descargas, já que a qualidade dos resultados da

simulação depende da representatividade das ondas de corrente da suposta descarga.

De acordo com [20], as primeiras correntes de retorno são caracterizadas por uma concavidade pronunciada na frente da onda e pela ocorrência de picos múltiplos, sendo o segundo pico geralmente o mais alto, e a inclinação máxima ocorrendo próximo ao primeiro pico de acordo com as medidas das torres instrumentadas, como as apresentadas em [21]-[22].

Considerando os aspectos anteriores, as simulações foram realizadas considerando algumas condições típicas brasileiras, como a forma de onda descrita na Fig. 3, que reproduz aproximadamente os principais parâmetros medianos das primeiras descargas de retorno medidos na Estação Morro do Cachimbo. Como detalhado em [23], a forma de onda da Fig. 3 é obtida por uma soma das funções de Heidler.

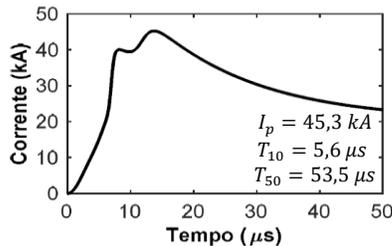


Fig. 3. Forma de onda da corrente representativa de primeiras descargas de retorno, conforme valores medianos.

B. Cabos de Fase e de Blindagem

Para a modelagem da linha de transmissão, utiliza-se o modelo de J. Marti [24], disponível na subrotina *line and cable constants* (LCC) do ATP [8], que permite considerar a dependência da frequência dos parâmetros longitudinais da linha e o efeito do retorno pelo solo, fenômenos importantes em estudos de sobretensões atmosféricas. Nessa subrotina, são inseridas as posições dos condutores, incluindo as flechas, e a resistência CC por unidade de comprimento, conforme dados já apresentados anteriormente. O efeito pelicular nos condutores aéreos é incorporado no modelo.

Os parâmetros da linha foram calculados na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz, enquanto a matriz de transformação modal foi calculada na frequência de 100 kHz, onde se encontra a maior parte da energia de primeiras descargas de retorno. A modificação da frequência da matriz de transformação na faixa supracitada basicamente não implicou diferenças nas sobretensões calculadas, uma vez que a geometria da linha apresenta baixa assimetria.

Vale mencionar que a implementação do modelo de Marti no ATP, considera o efeito do retorno pelo solo de acordo com a clássica formulação de Carson [25], o que implica: i) permissividade relativa do solo igual a 1, e ii) resistividade do solo constante com a frequência. Considerando as condições estudadas neste trabalho, foi demonstrado em [26], tendo como referência uma versão modificada do modelo de Marti que incorpora, no cálculo da impedância de retorno, permissividades relativas do solo diferente de 1 e parâmetros elétricos dependentes da frequência que, para incidência no topo da torre, o uso da formulação de Carson leva a resultados

com excelente exatidão de sobretensão na cadeia de isoladores. De acordo com essa mesma referência, o uso da formulação de Carson para impedância de retorno do solo pode levar a erros nos casos de incidência no meio do vão, que não são abordados neste trabalho.

C. Torres da Linha de Transmissão

As torres de transmissão são modeladas como uma linha de transmissão monofásica sem perdas, e sua impedância de surto é calculada usando a fórmula revisada de Jordan, que foi estendida em [27] para considerar sistemas verticais a multicondutores. Assumindo que a torre pode ser representada por n condutores verticais que estão conectados no mesmo ponto de injeção de corrente, neste caso o topo da torre, é possível modelar todo o sistema multicondutor como uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente Z_{eq} dada por [27].

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + \dots + Z_{1n}}{n} \quad (1)$$

Em que

$$Z = 60 \left[\ln \frac{4h}{r} - 1 \right] \quad (2)$$

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}} + 30 \frac{d}{h} - 60 \sqrt{\frac{1 + d_{ij}^2}{4h^2}} \quad (3)$$

Em (2) e (3), h (m) é a altura do condutor, r (m) é o raio do condutor, e d_{ij} (m) corresponde à distância entre os centros dos condutores i e j . Em particular, a torre da Fig. 1 foi dividida em quatro seções, cada uma representada por quatro condutores verticais. A parte inferior da torre foi representada como uma cascata de três linhas de transmissão (duas de 9 m e uma de 8,86 m de comprimento), enquanto a sua parte superior foi representada como uma única linha de transmissão de 6,75 m de comprimento. Isto foi feito para considerar a variação da distância entre os condutores existente na estrutura da torre, e que consequentemente altera a parcela da impedância mútua. A Fig. 4 ilustra de forma esquemática as quatro seções em que a torre foi dividida. Para cada seção, adotou-se um espaçamento médio entre os condutores.

A impedância de surto equivalente de cada segmento de torre foi calculada utilizando (1), (2) e (3), considerando as distâncias médias entre os condutores da torre e assumindo $r = 6,5$ cm. A velocidade de propagação da onda foi assumida como sendo 80% da velocidade da luz. Em decorrência da natureza treliçada das torres de linha de transmissão, a distância percorrida pelas ondas que se propagam do topo até a base da torre é maior do que a sua altura. Para se ter em conta esse efeito, tipicamente adota-se uma velocidade de propagação inferior à da luz. Segundo [17], de acordo com observações experimentais, essa velocidade varia entre 80% e 85% da velocidade da luz. Neste trabalho adotou-se 80% da velocidade da luz. O modelo final da torre é ilustrado na Fig. 4. Vale salientar que o cabo de blindagem se encontra eletricamente conectado à torre, enquanto os cabos fase encontram-se conectados por meio de

cadeia de isoladores. A modelagem da ocorrência de ruptura da isolação é abordada na Seção II-F.

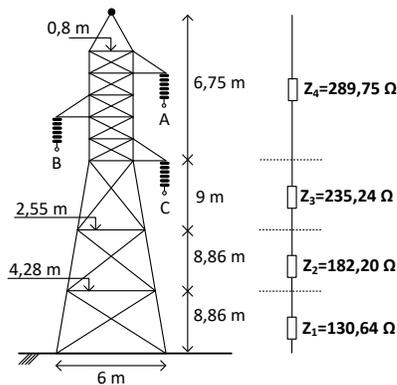


Fig. 4. Modelo da torre com os valores das impedâncias de surto por trecho.

D. Sistema de Aterramento das Torres de Transmissão

Recentemente, alguns trabalhos demonstraram que a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo afeta significativamente o desempenho das linhas localizadas em áreas de solos de alta resistividade [28]-[30]. Além disso, em [12] foi verificado que as características dependentes da frequência dos parâmetros elétricos de aterramento da torre e do solo influenciam a sobretensão desenvolvida através das cadeias de isoladores protegidas por para-raios ou não [5]. O procedimento adotado para incluir o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento das torres de transmissão no ATP será brevemente detalhado a seguir.

Inicialmente, a impedância harmônica do aterramento da torre $Z(j\omega)$ é calculada aplicando o Modelo Híbrido Eletromagnético (HEM) [10], considerando uma faixa de frequência de CC a 10 MHz, conteúdo típico de transitórios associados às descargas atmosféricas.

Os parâmetros elétricos do solo foram considerados constantes e dependentes da frequência, utilizando o rigoroso modelo causal proposto por Alipio e Visacro, que se baseia em um grande número de medições de parâmetros do solo realizadas em condições de campo [11]. Após o cálculo da impedância harmônica $Z(j\omega)$, um modelo de polos e resíduos, dado pela eq. (4), da admitância associada $Y(j\omega) = 1/Z(j\omega)$ é calculado usando o método *Vector Fitting* (VF) [9]. No final, a partir do modelo passivo de polos e resíduos da admitância de aterramento, é possível sintetizar um circuito elétrico que reproduz o comportamento desta no domínio da frequência, e que pode ser incluído diretamente nas simulações no domínio do tempo.

$$Y(s = j\omega) \cong Y_{fit}(s = j\omega) = \sum_{m=1}^N \frac{r_m}{s-a_m} + d + se \quad (4)$$

Em (4), a_m e r_m , respectivamente, expressam os polos e resíduos da aproximação polo-resíduo Y_{fit} , enquanto d e e são valores reais constantes, e N é o número de polos (ordem do modelo polo-resíduo). Para obter simulações estáveis no domínio do tempo, a passividade é imposta pela perturbação dos parâmetros do modelo [31].

É importante mencionar que tanto o modelo de polos-resíduos quanto os circuitos elétricos sintetizados foram obtidos aplicando o pacote de rotinas, que são de domínio público, para uma aproximação racional das matrizes de admitância dependentes da frequência disponíveis em [32].

E. Dispositivos Para-Raios

O para-raios utilizado para realizar as simulações deste trabalho é um para-raios comercial fabricado pela Siemens [33].

A Tabela II apresenta as características típicas do para-raios, tais como os valores máximos das tensões residuais do tipo 30/60 μ s e impulsos de corrente do tipo 8/20 μ s. O modelo de para-raios dependente da frequência sugerido pelo IEEE é utilizado nas simulações [34].

TABELA II.
CARACTERÍSTICAS DOS PARA-RAIOS (RETIRADO DE [33])

Classe do para-raios	2
Altura do para-raios (m)	1.24
Número de colunas de Óxido Metálico em paralelo	1
Tensão nominal (kV)	132
Tensão de operação contínua (kV)	106
Tensão residual para corrente de 1 kA 30/60 μ s (kV)	269
Tensão residual para corrente de 10 kA 8/20 μ s (kV)	337

F. Ruptura do Isolamento

O Método do Efeito Disruptivo (DE) é aplicado para verificar a ocorrência de ruptura do isolamento em fases não protegidas por para-raios.

A concepção do método DE é baseada na ideia de que existe um efeito disruptivo base (DE_B) para cada configuração específica de cadeia de isoladores. Se um surto não padronizado exceder esta base DE_B , considera-se que o desligamento ocorre. Por outro lado, se o surto produzir um valor de DE menor do que esta base DE_B , presume-se que não ocorra o desligamento [35].

De acordo com [36], as estimativas de desligamentos por backflashover que mais se aproximaram do registro histórico de desligamento de uma linha real brasileira semelhante à simulada neste trabalho, foram alcançadas aplicando o método DE, em comparação ao Método da Progressão do Líder (LPM) e curvas V-t, e a partir desta conclusão, este método foi utilizado neste estudo.

O efeito disruptivo associado a uma onda de tensão é determinado por:

$$DE = \int_{t_0}^t [e(t) - V_0]^k dt \quad (5)$$

em que $e(t)$ corresponde à onda de tensão aplicada sobre o isolador, V_0 refere-se ao limiar de tensão a partir do qual tem início o processo de ruptura no isolador, t_0 é o instante de tempo em que o valor instantâneo de $e(t)$ ultrapassa V_0 , k é um fator adimensional, e DE é a variável denominada “efeito disruptivo”. Para uma linha de 138 kV típica, as constantes do método DE podem ser obtidas de acordo com Hileman [35]:

$DE_B = 1,1506(CFO)^k$; $k = 1,36$; $V_0 = 0,77CFO = 500,5$ kV; $CFO = 650$ kV.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar a eficiência da instalação de para-raios somente em uma ou duas fases, em termos do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas, foram simulados os seguintes casos: i) nenhum para-raios; ii) para-raios instalados somente na fase A (fase com sobretensão mais alta sem PRs); iii) para-raios instalados nas fases A e B (duas fases com sobretensões mais altas sem PRs). Em todos os casos, o sistema de aterramento com parâmetros elétricos do solo constantes e dependentes da frequência foram comparados, a fim de analisar o impacto deste efeito sobre o desempenho das linhas. Quatro valores de resistividade do solo foram considerados (1.000; 3.000; 5.000; e 10.000 $\Omega.m$), e os comprimentos correspondentes de contrapeso estão indicados na Tabela I. As ondas de sobretensões desenvolvidas e os valores de pico são apresentados na subseção III-A. As taxas de desligamento por backflashover das linhas considerando distribuições uniformes e não uniformes das resistividades do solo ao longo da linha de transmissão são mostradas na subseção III-B.

A. Sobretensões Desenvolvidas

a. Para-Raios Instalados na Fase A

A Fig. 5, mostra as formas de onda da tensão na fase B (fase superior não protegida) e na fase A (fase protegida) da linha de transmissão simulada. Para esta configuração de proteção, as sobretensões das fases B e C desprotegidas apresentaram formas de onda similares, diferenciando-se pelos valores de pico alcançados.

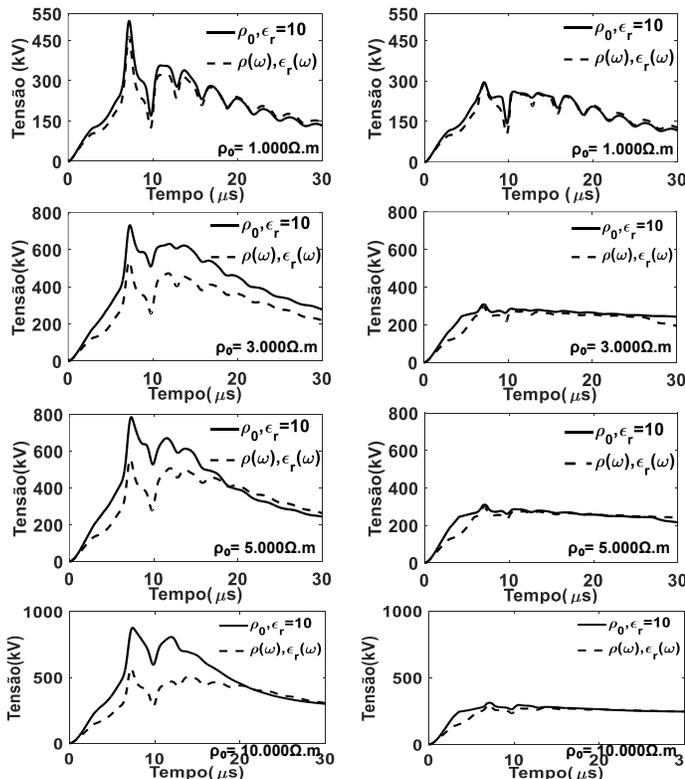


Fig. 5. Formas de onda da tensão da fase B (esquerda) e A (direita) com para-raios apenas protegendo a fase A para solos de resistividade entre 1.000 $\Omega.m$ e 10.000 $\Omega.m$.

b. Para-Raios Instalados nas Fases A e B

A Fig. 6 apresenta as formas de onda da tensão na fase C (fase desprotegida) e na fase B (fase protegida mais próxima da desprotegida) da linha de transmissão simulada.

Para esta configuração de proteção, as sobretensões das fases A e B protegidas apresentam formas de onda similares. Observa-se que nas fases protegidas, em ambas as situações nas seções *a.* e *b.*, prevalece o efeito limitador de tensão do para-raios. Nesses casos, não há diferenças significativas entre as tensões máximas desenvolvidas através das cadeias de isoladores considerando parâmetros elétricos do solo constantes ou dependentes da frequência, nem considerando as diferentes condições para a resistividade do solo. Isto demonstra o impacto dos para-raios na proteção das linhas de transmissão.

A inclusão do efeito dependente da frequência dos parâmetros do solo reduz os valores de pico de sobretensão resultantes em fases não protegidas por para-raios em todos os casos, como mostrado na Tabela III. Vale mencionar que este efeito é ligeiramente reduzido quando comparado às linhas de transmissão sem para-raios, como mostrado em [5]. Outro papel relevante dos para-raios na proteção de linhas de transmissão pode ser observado, já que, após sua instalação, as sobretensões das fases desprotegidas da linha foram significativamente reduzidas. Esta condição foi observada para todos os casos.

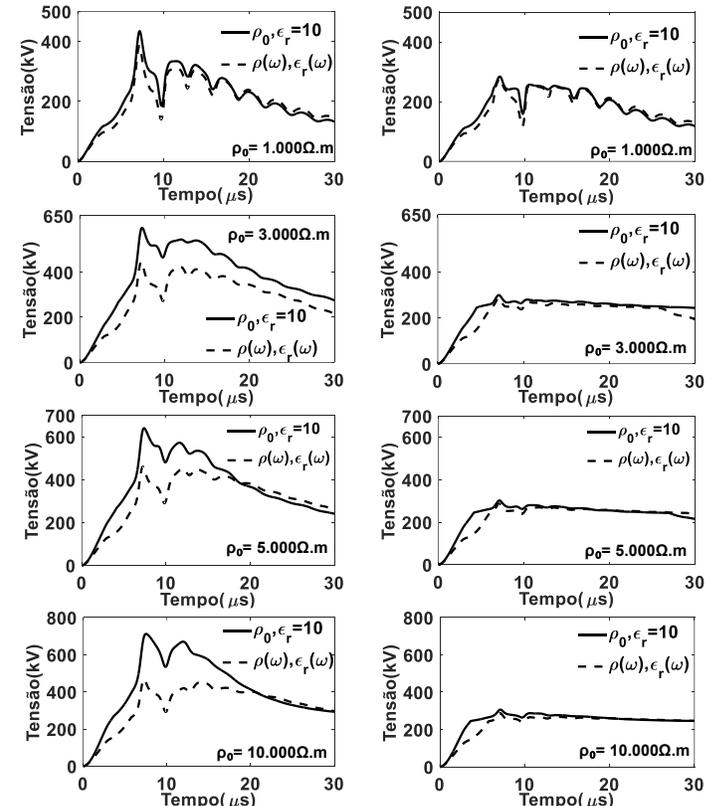


Fig. 6. Ondas de tensão desenvolvidas na fase C (esquerda) e B (direita) com para-raios instalados nas fases A e B para solos com resistividade entre 1.000 $\Omega.m$ e 10.000 $\Omega.m$.

B. Taxa de Desligamento por Backflashover Estimada

A fim de estimar a taxa de *backflashover* de uma linha de transmissão, é necessário primeiro calcular a corrente crítica que levaria à ruptura do isolamento. Para um determinado conjunto de condições de linha e forma de onda de corrente, é possível identificar facilmente a corrente crítica (I_c) que levaria à ruptura do isolamento. Com a forma de onda de corrente mantida, basta aumentar seu valor de pico até que a amplitude de sobretensão correspondente atinja a condição de ruptura. O método DE foi aplicado às ondas de sobretensão da subseção A para determinar o valor de pico da corrente crítica (I_c), sob a suposição de parâmetros de solo constantes e dependentes da frequência. Os valores de I_c calculados são mostrados na Tabela IV, juntamente com as probabilidades de ocorrência de correntes de pico acima de I_c ($P[I \geq I_c]$). Estas foram determinados a partir da distribuição de probabilidades cumulativas das correntes de pico para as primeiras descargas de retorno medidos na estação Morro do Cachimbo - MG [22], que é aproximadamente:

$$P_I = 1/[1 + (I/45,3)^{3,9}] \quad (6)$$

correlação entre I_p e T_f fosse levada em conta.

Ao considerar o efeito da dependência da frequência nos parâmetros do solo, os valores de pico das correntes críticas (I_c) são aumentados em todos os casos, e o aumento se torna mais significativo para os solos de maior resistividade.

Assim, a probabilidade de ocorrência de correntes de pico acima de I_c é reduzida, como indicado pela variável " Δ " na Tabela IV. O impacto deste efeito é significativo para todos os casos estudados, começando de aproximadamente 34,5% para solos de 1.000 $\Omega.m$ e atingindo 56,8% para solos de 10.000 $\Omega.m$.

O mesmo efeito de redução pode ser visto ao incluir para-raios em uma e duas fases, sendo respectivamente, 38,3% a 66,3% e 37,6% a 72,3%.

Esta redução crescente resultou do efeito redutor da proteção parcial sobre as sobretensões das fases desprotegidas, conforme apresentado na Tabela III. A partir das probabilidades de ocorrência de correntes de descarga superiores a I_c mostradas na Tabela IV, as taxas de *backflashover* estimadas da linha de transmissão foram calculadas seguindo um procedimento similar ao indicado por Anderson [37].

TABELA III
MAIORES VALORES DE SOBRETENSÃO DESENVOLVIDAS ATRAVÉS DA CADEIA DE ISOLADORES DA LINHA DE TRANSMISSÃO(KV)

ρ_0 ($\Omega.m$)	L (m)	Sem Para-Raios			Para-Raios Inst. na Fase A			Para-Raios Inst. Nas Fases A e B		
		$\rho=\rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0, \epsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
1,000	40	630	554	-12.1%	523	462	-11.7%	434	384	-11.5%
3,000	60	899	650	-27.7%	732	537	-26.6%	597	445	-25.5%
5,000	80	969	677	-30.1%	785	557	-29.0%	640	460	-28.1%
10,000	130	1094	691	-36.8%	877	566	-35.5%	712	467	-34.4%

TABELA IV
CORRENTE DE DESCARGAS CRÍTICAS NAS LINHAS PARCIALMENTE PROTEGIDAS POR PARA-RAIOS

ρ_0 ($\Omega.m$)	L (m)	Sem Para-Raios					Para-Raios Inst. na Fase A					Para-Raios Inst. Nas Fases A e B				
		$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$		$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$		$\Delta(\%)$	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$		$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$		$\Delta(\%)$	$\rho = \rho_0, \epsilon_r = 10$		$\rho=\rho(\omega), \epsilon(\omega)$		$\Delta(\%)$
I_c	$I_p > I_c$	I_c	$I_p > I_c$	I_c	$I_p > I_c$		I_c	$I_p > I_c$	I_c	$I_p > I_c$		I_c	$I_p > I_c$	I_c	$I_p > I_c$	
		(kA)	(%)	(kA)	(%)		(kA)	(%)	(kA)	(%)		(kA)	(%)	(kA)	(%)	
1,000	40	80	9.8%	90	6.4%	-34.5%	94	5.5%	107	3.4%	-38.3%	114	2.7%	129	1.7%	-37.6%
3,000	60	49	44.4%	62	23.9%	-46.2%	56	30.4%	70	15.5%	-49.1%	66	18.7%	83	8.6%	-54.0%
5,000	80	40	61.9%	55	31.9%	-48.4%	46	48.5%	64	20.6%	-57.5%	56	30.4%	76	11.7%	-61.5%
10,000	130	33	77.5%	54	33.5%	-56.8%	39	64.2%	63	21.7%	-66.3%	47	46.4%	74	12.9%	-72.3%

Segundo uma abordagem simplificada, a correlação entre o valor de pico da corrente (I_p) e o tempo de frente (T_f) foi desconsiderada. Vale salientar que, de acordo com os resultados da Tabela IV e considerando a metodologia rigorosa de se adotar parâmetros elétricos dependentes da frequência, a não inclusão da referida correlação entre I_p e T_f mostrou-se conservadora. Isso porque para hipótese de parâmetros dependentes da frequência, os valores de corrente crítica obtidos são sempre superiores ao valor mediano de 45 kA; portanto, nas simulações foi assumido um tempo de frente da corrente mais curto do que aquele que seria considerado caso a

A metodologia proposta requer certas informações preliminares, tais como a geometria da torre, a densidade de descargas para o solo (N_g) e a distribuição de resistividades do solo ao longo do trajeto da linha de transmissão. O valor de $N_g=5$ descargas/km²/ano foi considerado, pois é o valor médio encontrado no estado de Minas Gerais [38], onde também está localizada a Estação do Morro do Cachimbo.

A Tabela V resume os resultados das estimativas da taxa de *backflashover* considerando uma linha desprotegida ou parcialmente protegida e sob a suposição de parâmetros do solo constantes e dependentes da frequência. As reduções percentuais das taxas são dadas na coluna definida pela variável

TABELA V

TAXA ESTIMADA DE DESLIGAMENTOS POR BACKFLASHOVER EM LINHAS PROTEGIDAS PARCIALMENTE POR PARA-RAIOS (DESLIGAMENTOS/100KM/ANO)

Hipóteses de distribuição de ρ no trajeto da linha de transmissão (%)				Número de desligamentos/100km/ano								
1.000 ($\Omega.m$)	3.000 ($\Omega.m$)	5.000 ($\Omega.m$)	10.000 ($\Omega.m$)	Sem Para-Raios			Para-Raios Inst. na Fase A			Para-Raios Inst. Nas Fases A e B		
				$\rho=\rho_0,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$	$\rho=\rho_0,$ $\varepsilon_r = 10$	$\rho=\rho(\omega),$ $\varepsilon(\omega)$	$\Delta(\%)$
100%	0%	0%	0%	6.8	4.4	-35.3%	3.8	2.3	-39.5%	1.9	1.2	-36.8%
0%	100%	0%	0%	30.6	16.5	-46.1%	21	10.7	-49.0%	12.9	5.9	-54.3%
0%	0%	100%	0%	42.7	22	-48.5%	33.5	14.2	-57.6%	21	8.1	-61.4%
0%	0%	0%	100%	53.5	23.1	-56.8%	44.3	15	-66.1%	32	8.9	-72.2%
50%	30%	20%	0%	21.1	11.6	-45.0%	14.9	7.2	-51.7%	9.0	4.0	-55.6%
25%	35%	30%	10%	30.6	15.8	-48.4%	22.8	10.1	-55.7%	14.5	5.7	-60.7%
0%	40%	30%	30%	41.1	20.1	-51.1%	31.7	13.0	-59.0%	21.1	7.5	-64.5%

" Δ ". A análise considera sete distribuições diferentes de resistividade do solo ao longo da linha: quatro distribuições uniformes (ρ_0 de 1.000 a 10.000 $\Omega.m$) e três distribuições não uniformes, nestes casos representando condições de solo variáveis ao longo do trajeto longitudinal da linha, sendo assim mais realistas.

Os resultados na Tabela V mostram que a proteção parcial da linha causa uma diminuição significativa nas taxas de backflashover em todos os casos. Para parâmetros de solo constantes, estes valores foram de 6,8 a 53,5 desligamentos/100km/ano, sem para-raios, 3,8 a 44,3 com um para-raios, e 1,9 a 32, com dois para-raios. Com parâmetros dependentes da frequência, os valores foram 4,4 a 23,1; 2,3 a 15, e 1,2 a 8,9, respectivamente. A mesma tendência de redução também é verificada para casos de distribuição não uniforme da resistividade do solo.

Sabe-se que as linhas de transmissão de 138 kV não possuem regulação por parte do Operador Nacional do Sistema (ONS) pois estas não compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), e por isso não há um limite normatizado para o número de desligamentos máximo por 100 km de linha por ano. No entanto, alguns trabalhos estimam que 10 desligamentos seria o máximo aceitável [39], baseado nos critérios de FEC e DEC. Admitindo este número de desligamentos máximo como referência, e assumindo a densidade de descargas considerada nos cálculos, pode-se observar da Tabela V que para solos de resistividade igual ou superior à 3.000 $\Omega.m$ e parâmetros constantes com a frequência, mesmo a instalação de dois para-raios não é suficiente para adequar a taxa de desligamentos a um número inferior a 10. Por outro lado, considerando a metodologia que incorpora o efeito de dependência da frequência dos parâmetros do solo, percebe-se que a instalação de dois para-raios reduz a taxa de desligamentos para 5,9; 8,1 e 8,9; respectivamente para os solos de 3.000 $\Omega.m$, 5.000 $\Omega.m$ e 10.000 $\Omega.m$. Isso mostra que a incorporação do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo permite uma distribuição otimizada de dispositivos para-raios ao longo da LT, isto é, o uso de um menor número de dispositivos para se atingir a taxa de desligamentos máxima tomada como referência. Essa redução do número de para-raios a ser instalado é particularmente expressiva no caso de regiões de solo de alta resistividade. Ainda, a redução global dos custos,

associado à economia com dispositivos para-raios, vai depender da distribuição de resistividades ao longo da rota da linha. De acordo com os resultados, entende-se que essa economia será mais significativa no caso de linhas em que a maior parte das torres estejam alocadas em regiões inóspitas de solo em termos de resistividade.

Por fim, vale mencionar que o efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo reduz fortemente a estimativa da taxa de *backflashover* das linhas parcialmente protegidas, provando a importância da representação rigorosa do sistema de aterramento das linhas neste tipo de estudo, o que normalmente não é feito [4], [6]-[7].

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo para avaliar a eficiência da instalação de para-raios apenas em uma ou duas fases em termos do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e considerando simultaneamente, de forma rigorosa, o comportamento dependente da frequência do sistema de aterramento do pé da torre. Os parâmetros elétricos do solo foram considerados como constantes ou dependentes da frequência, a fim de analisar a influência deste efeito.

Os resultados obtidos mostraram que a técnica de proteção parcial é altamente eficiente. Embora não garanta a proteção contra *backflashover* para a(s) fase(s) desprotegida(s), a probabilidade de ruptura do isolamento é fortemente reduzida, em função da redução das sobretensões nestas fases. Também foi demonstrado que na(s) fase(s) não protegida(s), a não consideração do efeito dependente da frequência dos parâmetros elétricos do solo leva a níveis de sobretensão resultantes mais altos do que aqueles obtidos quando a dependência da frequência é considerada. Embora conservadora, a abordagem simplificada de ignorar a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo aumenta incorretamente a estimativa das taxas de *backflashover* em comparação àquelas determinadas utilizando a abordagem mais fisicamente consistente. Isto pode levar a estratégias superestimadas de proteção de linha com um possível aumento dos custos de construção e operação da linha de transmissão.

Finalmente, a metodologia introduzida neste trabalho pode ser aplicada para otimizar a distribuição dos para-raios ao longo das linhas de transmissão, a fim de atingir as taxas de

backflashover suficientemente baixas e com custo reduzido em relação a opção de proteção de todas as fases das linhas de transmissão.

REFERÊNCIAS

- [1] J. He, R. Zeng, J. Hu, S. Chen, and J. Zhao, "Design and application of line surge arresters to improve lightning protection characteristics of transmission lines" in Proc. of 2008 *IEEE PES T&D Conference and Exposition*, Chicago, 2008, pp. 1–8.
- [2] S. C. Assis, W. C. Boaventura, J. O. S. Paulino, and R. L. Markiewicz, "Lightning performance of transmission line with and without surge arresters: comparison between a monte carlo method and field experience" *Electric Power System Research*, no. 149, pp. 169–177, 2017.
- [3] S. Visacro, F. H. Silveira, G. Cardoso, and A. Assini, "Effectiveness of surge arresters for improving the lightning performance of transmission lines," in Proc. *10th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2017)*, Krabi-Thailand, 2017, pp. 403–406.
- [4] K. Munukutla, V. Vittal, G. T. Heydt, D. Chipman, and B. Keel, "A practical evaluation of surge arrester placement for transmission line lightning protection" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 3, pp. 1742–1748, Jul. 2010.
- [5] R. Alipio, A. F. Pinto, A. De Conti, and M. A. O. Schroeder, "Evaluation of line surge arresters performance considering frequency-dependent characteristics of tower-footing grounding," in Proc. *GROUND2016 & 7thLPE*, Porto de Galinhas, Brazil, 2016, pp. 1–5.
- [6] J. A. Martinez and F. Castro-Aranda, "Lightning flashover rate of an overhead transmission line protected by surge arresters" in Proc. of *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Tampa-FL, 2007, pp. 1–6.
- [7] M. Ishii and H. Kawamura, "Application of line surge arresters to double-circuit transmission lines" in Proc. of 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, 2011, pp. 312–318.
- [8] L. Prikler, H.K. Hoidal, "ATPDraw Manual - Version 5.6", 2009.
- [9] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, July 1999.
- [10] S. Visacro and A. Soares Jr., "HEM: a model for simulation of lightning related engineering problems" *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1026–1028, Apr. 2005.
- [11] R. Alipio and S. Visacro, "Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil" *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163–1171, Oct. 2014.
- [12] R. Alipio, M. H. R. Duarte, J. C. A. Dias and A. S. De Miranda, "Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical Brazilian conditions," in 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), 2017, pp. 365–369, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116953.
- [13] F. de Vasconcellos, F. Moreira, R. Alipio, "Influência do Efeito Dependente da Frequência dos Parâmetros Elétricos do Solo sobre o Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas" in XXIII Congresso Brasileiro de Automática, Nov 2020.
- [14] R. Moura, M. A. O. Schroeder, S. Assis, B. Giarola, W. Sales, L. Nascimento and I. Meireles, "Análises Crítica e Reflexiva de Modelos de Para-Raios para Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas" in XXIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Oct. 2015.
- [15] P. C. Marcelino, "Avaliações de Sobreensões Atmosféricas em Linhas de Transmissão". M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Federal Univ. of São João del Rey, São João del Rey, MG, BR, 2021.
- [16] R. Shariatnasab, J. Gholinezhad and K. Sheshyekani, "Estimation of Energy Stress of Surge Arresters Considering the High-Frequency Behavior of Grounding Systems," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 60, no. 4, pp. 917–925, Aug. 2018, doi: 10.1109/TEMC.2017.2756700.
- [17] Working Group C4.23, "CIGRE TB 839: Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines – New Aspects," Paris, 2021.
- [18] S. Visacro, "Direct strokes to transmission lines: Considerations on the mechanisms of overvoltage formation and their influence on the lightning performance of lines," *J. Light. Res.*, vol. 1, pp. 60–68, 2007.
- [19] S. Visacro, F.H. Silveira, and A. De Conti, "The use of underbuilt wires to improve the lightning performance of transmission lines," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 1, pp. 205–213, Jan. 2012.
- [20] S. Visacro, "A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke" *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L07112, Apr. 2004.
- [21] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "Parameters of lightning flashes," *Electra*, no. 80, pp. 223–237, 1975.
- [22] S. Visacro, A. Soares, M. A. O. Schroeder, L. C. L. Cherchiglia, and V. J. Sousa, "Statistical analysis of lightning current parameters: measurements at Morro do Cachimbo station," *Journal on Geophysical Research*, vol. 109, D01105, pp. 1–11, Jan. 2004.
- [23] A. De Conti and S. Visacro, "Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.
- [24] J. R. Marti, "Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 1, pp. 147–157, Jan. 1982.
- [25] J. R. Cason, "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return" *Bell Systems Technical Journal*, vol. 5, p. 539–556, 1926.
- [26] R. Alipio, A. De Conti, A. Miranda, M. T. Correia de Barros "Lightning Overvoltages Including Frequency-Dependent Soil Parameters in the Transmission Line Model" In 2019 International Conference on Power Systems Transients (IPST), 2019.
- [27] A. De Conti, S. Visacro, A. Soares, and M. A. O. Schroeder, "Revision, extension and validation of Jordan's formula to calculate the surge impedance of vertical conductors," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 530–536, Aug. 2006.
- [28] S. Visacro and F. Silveira, "The impact of the frequency dependence of soil parameters on the lightning performance of transmission lines," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 57, no. 3, pp. 434–441, Jun. 2015.
- [29] S. Visacro and R. Alipio, "Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 2, pp. 927–935, Apr. 2012.
- [30] S. Visacro, R. Alipio, M. H. Murta Vale, and C. Pereira, "The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency dependent soil resistivity and permittivity," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 22, no. 2, pp. 401–406, May 2011.
- [31] B. Gustavsen, "Fast passivity enforcement for pole-residue models by perturbation of residue matrix eigenvalues," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 23, no. 4, pp. 2278–2285, Oct. 2008.
- [32] B. Gustavsen, Matrix Fitting Toolbox [Online]. Available: <https://www.sintef.no/projectweb/vectorfitting/>, 2020.
- [33] Siemens: Line surge arresters – product overview [Online]. Available: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offers/power-transmission/transmission-products/surge-arresters/line-surge-arresters>, 2020.
- [34] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling, "Modeling of metal oxide surge arresters," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 302–309, Jan. 1992.
- [35] A. R. Hileman, *Insulation Coordination for Power Systems*, 1st ed., CRC Press, 1999, pp.627–640.
- [36] A. J. Oliveira, M. A. O. Schroeder, R. A. R. Moura and Í. A. J. W. S. Meireles, "Analysis of lightning performance of overhead transmission lines: Comparison between insulator string models," 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Niteroi, Brazil, 2018, pp. 1–5, doi: 10.1109/SBSE.2018.8395637.
- [37] Anderson, J. G. (1982). *Transmission Line Reference Book – 345 kV and Above / Second Edition*, chapter 12. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California.
- [38] A. Dellalibera, A. Andrade, A. Bezerra, J. Duarte, P. Góis, and R. Markiewicz. "Brazilian production development of class 2 polymeric surge arresters for transmission line application (TLA)" in Proc. of Conference: Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems - CIGRÉ Croatia: Cavtat, Croatia, 2008.
- [39] R. N. Dias., "Nova Metodologia para Identificação de Pontos Críticos de Desempenho em Linhas de Transmissão baseada na Aplicação de Sistemas de Localização de Descargas Atmosféricas", Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Federal Univ. of Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, BR, 2006.



Felipe Mendes de Vasconcellos was born in Rio de Janeiro, RJ, Brazil, in 1986. He received the B.Sc. degree in Electrical Industrial Engineering from the Federal Institute of Education, Science and Technology of Bahia, Salvador, BA, Brazil, in 2010, and the M.Sc. and D.Sc. degrees in Electrical Engineering from the Federal University of Bahia, Salvador, BA, Brazil, in 2017 and 2020, respectively. Since 2019, he has been an Assistant Professor teaching Electrical Engineering in some Private Higher Education Institutions in Salvador, Bahia. His research interests include electromagnetic transients in power systems, grounding systems modeling, lightning performance of overhead transmission lines, and lightning protection of power systems.



Rafael Alipio was born in Belo Horizonte, Brazil, in 1985. He received the B.Sc. degree in electrical engineering and the M.Sc. degree in mathematical and computer modeling from the Federal Center of Technological Education of Minas Gerais (CEFET/MG), Belo Horizonte, in 2007 and 2008, respectively, and the B.Sc. degree in physics and the Ph.D. degree in electrical engineering from the Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, in 2008 and 2013, respectively. He is currently a Full-Time Lecturer with the Department of Electrical Engineering, CEFET/MG. His general research interests include grounding, frequency dependence of soil parameters, lightning, electromagnetic transients, and electromagnetic modeling.



Fernando Augusto Moreira was born in São Paulo, SP, Brazil, in 1970. He received his B.Sc. and M.Sc. degrees in Electrical Engineering in 1994 and 1997, respectively, from the University of São Paulo, Brazil. He received his Ph.D. degree also in Electrical Engineering in 2002 from the University of British Columbia, Canada. He has been with the Department of Electrical and Computer Engineering of the Federal University of Bahia, Brazil, since 2005, where he is currently an Associate Professor. His main research interests are in the theory and simulation of electromagnetic transients in power systems and in the development of efficient solution methods for EMT-type programs.