

AValiação DO IMPACTO DA REPRESENTAÇÃO DO ATERRAMENTO NA ATUAÇÃO DE PARA-RAIOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

ALLAN F. PINTO*

*Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica - PPGEL - CEFET-MG/UFSJ
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Curvelo, MG, Brasil

Email: allan_eletrica@yahoo.com.br

Abstract— This work investigates the influence of considering or not the frequency-dependent characteristics of tower-footing grounding on lightning overvoltages across line insulators, when the line is protected by surge arresters. A typical 138-kV line protected with surge arresters and subjected to a first stroke current is assessed, considering three different grounding models, namely: 1) a resistance equal to the low-frequency grounding resistance R_{LF} , 2) a resistance equal to the grounding impulse impedance Z_P , and 3) a wideband model considering the frequency-dependent characteristics of grounding. From the simulations, it is found that the influence of grounding modeling is likely to be minimized by the presence of surge arresters, notably along the front of the wave. Along the wave tail, the results obtained by the static model R_{LF} basically match those obtained using the wideband model. On the other hand, along the wave tail, the voltage values obtained using the static model Z_P are lower than those determined using the wideband model.

Keywords— Lightning, grounding, surge arresters, frequency-dependent behavior.

Resumo— Este trabalho investiga a influência de se considerar ou não as características dependentes da frequência do aterramento de torres frente a sobretensões atmosféricas ao longo dos isoladores de uma linha de transmissão, quando a linha é protegida por para-raios. Avalia-se a atuação de um para-raios instalado em uma linha de transmissão típica de 138 kV frente à incidência de uma onda de corrente de primeira descarga mediana, considerando três representações para o aterramento, a saber: 1) uma resistência igual à resistência de aterramento de baixa frequência R_{LF} , 2) uma resistência igual à impedância impulsiva de aterramento Z_P , e 3) um modelo considerando as características dependentes da frequência do aterramento. Dos resultados de simulação, mostra-se que a representação do aterramento tem influência reduzida na frente da onda das sobretensões desenvolvida—o para-raios parece dominar o comportamento das sobretensões nesse intervalo do transitório. Ao longo da cauda, os resultados obtidos pelo modelo estático R_{LF} correspondem basicamente aos obtidos usando o modelo dependente da frequência. A partir das simulações, verifica-se que a influência da modelagem de aterramento provavelmente será minimizada pela presença de para-raios, notadamente ao longo na frente da onda. Por outro lado, ao longo da cauda, os valores de tensão obtidos usando o modelo estático Z_P são inferiores que os determinados usando o modelo de banda larga.

Palavras-chave— Descargas atmosféricas; aterramentos elétricos; para-raios; comportamento dependente da frequência.

1 Introdução

As descargas atmosféricas (DAs) constituem fonte de efeitos destrutivos nos elementos do sistema elétrico. Uma ocorrência específica de interesse prático refere-se à incidência direta de DAs em linhas de transmissão (LTs). As longas extensões das LTs e a usual altura pronunciada de suas estruturas em relação ao solo determinam uma probabilidade elevada de incidência direta de descargas, com possibilidade de desligamento em decorrência da solicitação imposta aos isoladores pelas sobretensões resultantes. Segundo estatísticas das concessionárias de energia, as DAs são responsáveis por grande parte dos desligamentos não programados dos sistemas de transmissão. Nesse sentido, a compreensão dos mecanismos determinantes dos desligamentos devido à solicitação por descargas pode subsidiar a definição e a aplicação de práticas adequadas de proteção para minimizar o número de desligamentos, restringindo-os a níveis aceitáveis tendo em conta as exigências de órgãos regulamentadores.

Considerando especificamente incidências na torre ou nos cabos de blindagem, a prática mais amplamente utilizada para melhoria do desempenho de LTs frente a DAs consiste em atuar no aterramento, reduzindo a sua impedância. A diminuição da impedância de aterramento impacta diretamente na redução das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores.

Por outro lado, no caso de LTs localizadas em regiões cujos solos apresentam elevada resistividade, a obtenção de valores reduzidos de impedância de aterramento é muitas vezes inviável técnica e economicamente. Nessas situações, tem sido prática comum a utilização de dispositivos para-raios. Esses dispositivos são instalados em paralelo com as cadeias de isoladores, sendo que um de seus terminais é conectado à torre de transmissão que está aterrada. Nesse sentido, o aterramento apresenta papel relevante na atuação e no desempenho do dispositivo para-raios.

Para a realização de análises de sensibilidade do comportamento transitório de linhas é comum recorrer a simulações computacionais, nor-

malmente realizadas em programas eletromagnéticos do tipo EMTP (do inglês, *Electromagnetic Transients Program*), que trabalham no domínio do tempo. Tais plataformas são particularmente apropriadas para a modelagem de elementos não-lineares dependentes do tempo como, por exemplo, os para-raios.

Por outro lado, não é trivial representar em plataformas desse tipo elementos e meios dependentes da frequência. Nesse sentido, a ampla maioria dos trabalhos que avaliam o desempenho de para-raios de linhas frente a descargas representa o aterramento elétrico via um modelo estático composto por uma resistência concentrada com valor igual à resistência de aterramento de baixa frequência (Sardi and Chian, 2010); (Munukutla et al., 2010); (Ishii and Kawamura, 2011). Contudo, de acordo com a literatura, o aterramento elétrico apresenta comportamento significativamente dependente da frequência ao longo do espectro típico associado a corrente de descargas (Alípio, 2013). Portanto, os resultados obtidos em Munukutla et al. (2010) e Ishii and Kawamura (2011) podem apresentar desvios significativos.

Tendo em conta esses comentários iniciais, pretende-se neste trabalho avaliar o impacto da representação do aterramento na atuação de para-raios de linhas de transmissão frente a sobretensões atmosféricas. Almeja-se gerar uma contribuição que subsidie a definição dos limites de aplicabilidade de diferentes representações do aterramento, para avaliação da atuação e do desempenho de para-raios considerando sobretensões atmosféricas.

2 Sistema sob estudo e modelagens adotadas

Para avaliar o impacto do comportamento dependente da frequência do aterramento elétrico na atuação do para-raios, considera-se uma linha de transmissão com nível de tensão de 138 kV, circuito simples, tipicamente encontrada no Brasil. A Fig. 1 apresenta a silhueta típica da linha em questão, que possui um condutor por fase (CAA – *linnet*) e um cabo de blindagem (tipo 3/8" EHS). As coordenadas geométricas dos condutores fase são $A(-2, 9; 28, 72)$, $B(2, 9; 26, 86)$ e $C(-2, 9; 25)$ e do condutor de blindagem é $CB(0; 31,61)$, sendo as unidades expressas em metros.

Nas simulações, considera-se a incidência da descarga atmosférica no topo da torre. Uma vez que o intuito principal deste trabalho é avaliar o impacto da representação do aterramento na atuação do para-raios, as reflexões nos vãos adjacentes são desconsideradas. Para tal, foram utilizadas linhas suficientemente longas, tendo em conta o intervalo de simulação de interesse.

A Fig. 2 apresenta o arranjo de aterramento típico da linha considerada. Ele é composto por

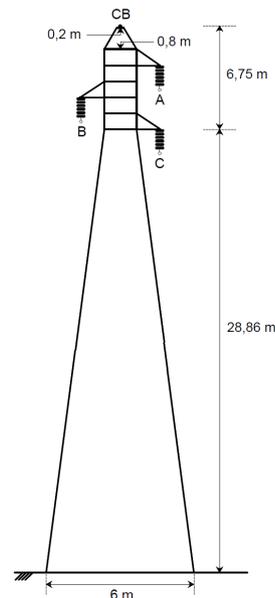


Figura 1: Geometria da torre sob análise.

4 cabos contrapeso de raio 7 mm, enterrados a 0,5 m de profundidade, cada um partindo de um pé da base da torre. O comprimento L dos cabos contrapeso é selecionado de acordo com o valor da resistividade do solo. Em particular, no caso de linhas de transmissão aéreas, esse comprimento é frequentemente determinado de acordo com o comprimento efetivo para primeiras descargas de retorno. Nesse contexto, a Tabela 1 indica as resistividades consideradas neste trabalho e os comprimentos de cabo contrapeso empregados em cada caso.

Nas seções a seguir são descritos os modelos empregados para simulação do transitório decorrente da incidência da descarga atmosférica na linha protegida por para-raios.

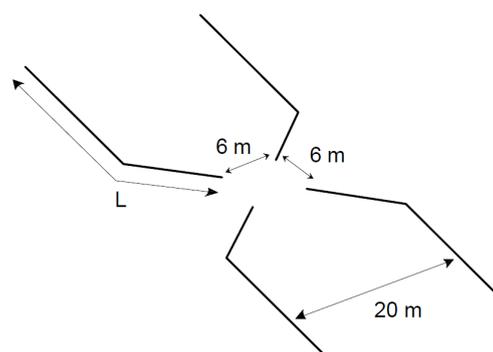


Figura 2: Configuração do arranjo de eletrodos de aterramento de linhas de transmissão.

2.1 Modelagem dos condutores da linha de transmissão

Para modelagem dos condutores da linha de transmissão utilizou-se o modelo desenvolvido por

Tabela 1: Dimensão dos cabos contrapeso em função da resistividade do solo.

$\rho_0(\Omega \cdot \text{m})$	300	1000	3000
L (m)	25	45	85

Marti (1982), que está implementado no ATP. Nessa plataforma, o modelo JMarti pode ser acessado via a rotina *Line and Cable Constants* (LCC) cuja entrada de dados corresponde, basicamente, às posições geométricas dos condutores da linha e às características eletromagnéticas dos condutores envolvidos (aéreos e solo).

2.2 Modelagem da torre

As torres metálicas de transmissão são, em geral, representadas por um condutor ou um conjunto de condutores verticais. Este condutor (ou conjunto de condutores), para fins de estudo de transitórios associados à incidência de DAs, é modelado como uma linha de transmissão (parâmetros distribuídos) monofásica sem perdas.

Neste trabalho, adotou-se um modelo composto por um sistema multicondutor vertical. Os principais aspectos dessa metodologia são descritos sucintamente a seguir e correspondem a desenvolvimentos originalmente propostos em De Conti et al. (2006).

A impedância de surto (Z) de um condutor cilíndrico vertical sem perdas com base posicionada no nível do solo é dada por:

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

em que h e r representam a altura do topo do condutor em relação à superfície do solo e o raio do condutor, respectivamente.

Na representação de sistemas compostos por condutores verticais, tal como a torre de transmissão, é necessário avaliar o efeito mútuo entre os condutores. Isso motivou a extensão da equação 1 para avaliação da impedância de surto mútua de condutores verticais sem perdas com mesma altura h . Para isso, calculou-se, utilizando o potencial vetor magnético, a queda de tensão no condutor vertical j causada pela corrente que circula no condutor i , obtendo-se, após manipulações algébricas detalhadas em De Conti et al. (2006), a expressão:

$$Z_{ij} = 60 \ln \frac{2h + \sqrt{4h^2 + d_{ij}^2}}{d_{ij}^2} + \dots \quad (2)$$

$$\dots + 30 \frac{d_{ij}}{h} - 60 \sqrt{1 + \frac{d_{ij}^2}{4h^2}}$$

em que d_{ij} corresponde à distância entre os centros

dos condutores i e j . A equação 2 é válida para $d_{ij} \gg r_i$ e $d_{ij} \gg r_j$.

Considerando que a torre pode ser representada por n condutores sem perdas, então é possível representar todo o sistema por uma única linha de transmissão com impedância de surto equivalente Z_{eq} dada por:

$$Z_{eq} = \frac{V}{I} = \frac{Z + Z_{12} + Z_{13} + \dots + Z_{1,n}}{n} \quad (3)$$

Em De Conti et al. (2006), o modelo descrito anteriormente foi empregado com sucesso no cálculo das correntes associadas à incidência de descargas atmosféricas na torre instalada na Estação do Morro do Cachimbo, que é dedicada à medição de parâmetros de descargas atmosféricas, considerando como referência os resultados obtidos por um modelo eletromagnético. Adicionalmente, em De Conti et al. (2009) esse mesmo modelo foi aplicado no cálculo da impedância de surto de torres de linhas de transmissão para fins de avaliação de seu desempenho frente à incidência direta de descargas atmosféricas. Mostrou-se que o modelo de multicondutores leva a resultados em excelente concordância com aqueles obtidos pela aplicação de uma modelagem eletromagnética elaborada, se o tempo de frente da onda de corrente injetada (t_f) é maior que o tempo de trânsito da torre (τ). Segundo a mesma referência, tal concordância aumenta à medida que t_f cresce em relação à τ . Portanto, é razoável supor que o modelo apresentado nesta seção forneça resultados ainda mais precisos, quando aplicados na modelagem da incidência de primeiras descargas de retorno em torres, que constituem as solicitações de maior interesse na avaliação das sobretensões resultantes.

Na aplicação da abordagem descrita na modelagem da torre ilustrada na Fig. 1, ela foi dividida em quatro seções, sendo a parte inferior dividida em três seções (duas de 9 m e uma de 8,86 m) e a parte superior em uma seção única (6,75 m). Isso foi feito para se ter em conta a variação da impedância de surto mútua com a altura. Considerando o espaçamento médio d_{ij} entre os condutores de cada um dos segmentos da torre e as alturas $h = 9, 18, 26, \text{ e } 33,61$ m, as equações (1) e (2) foram empregadas no cálculo de $Z_{eq}(k)$. Em todos os cálculos adotou-se um raio de $r = 6,5$ cm conforme De Conti et al. (2009), e a velocidade de propagação é 80% a velocidade da luz. A Fig. 3 apresenta o modelo final obtido.

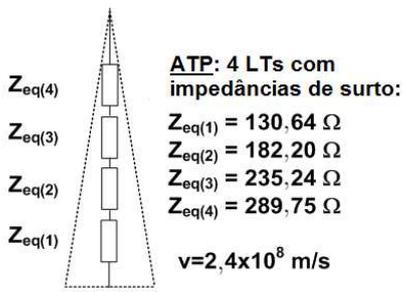


Figura 3: Modelo da torre.

2.3 Modelagem do aterramento

Como já mencionado, considerando o amplo conteúdo de frequências associado às descargas atmosféricas, é importante ter em conta o efeito dependente da frequência do aterramento. A inclusão desse comportamento em plataformas de cálculo de transitórios no domínio do tempo, como o ATP, segue três passos basicamente. Primeiramente, a resposta em frequência do aterramento é calculada, ao longo da faixa de interesse, utilizando um modelo eletromagnético. Em seguida, tal resposta é ajustada via um modelo composto por uma soma de frações parciais. Finalmente, a partir do modelo de funções racionais, um circuito equivalente é sintetizado. Tal circuito pode ser importado diretamente para o ATP. Os itens a seguir descrevem sucintamente esses três passos.

Aplica-se neste trabalho um modelo para simulação do aterramento elétrico baseado na aplicação direta das equações de campo no domínio da frequência. Cada eletrodo é considerado um condutor cilíndrico, que, quando excitado, constitui-se fonte de corrente de dois tipos: i) longitudinal (I_L), ao longo do condutor e ii) transversal (I_T), que dele dispersa para o meio circundante. Essa idéia foi originalmente proposta por Visacro (1992) e, posteriormente, expandida por Visacro and Soares Jr. (2005) para modelagem de condutores genéricos solicitados por descargas atmosféricas, através de elementos condutores cilíndricos, idealizando o chamado *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM). Mais tarde, Alípio (2008) propôs uma nova solução para as equações resultantes do HEM baseada na aplicação do Método dos Momentos (MoM) (Harrington, 1993). Também, nessa solução proposta, o efeito da interface solo-ar foi incluído mediante aplicações do método das imagens complexas, conforme proposto por Schroeder (2001), que adota coeficientes complexos para as imagens, em função das características eletromagnéticas de cada meio e da frequência sob análise. Os detalhes da aplicação do MoM, inclusão de imagens complexas e validação da metodologia proposta com resultados de medição do comportamento impulsivo de eletrodos de aterramento, podem ser encontrados em Alípio et al. (2011).

Considerando o arranjo de aterramento analisado neste trabalho, que consiste em quatro cabos contrapeso, o modelo racional deveria considerar a matriz de admitância de aterramento reduzida aos quatro nós onde a corrente de descarga é injetada; dito de outra forma, o aterramento deveria ser representado via um modelo multiportas.

Por outro lado, dada a simetria do arranjo que consiste em quatro cabos contrapeso de mesmo comprimento e simetricamente dispostos, é possível trabalhar com o problema na forma vetorial. Especificamente, pode-se considerar a impedância harmônica de entrada “vista” a partir de um dos pontos de injeção de corrente e dividi-la por quatro. A admitância associada, aqui chamada de admitância de aterramento Y_g , é obtida imediatamente a partir do inverso da impedância (já dividida por quatro) (Gustavsen and Semlyen, 1999) e (Gustavsen, 2002a).

Para obtenção de um modelo que atenda aos requisitos citados anteriormente, utiliza-se neste trabalho a técnica *vector fitting* proposta por Gustavsen and Semlyen (1999), sendo a passividade do modelo garantida por perturbação dos parâmetros do modelo, conforme proposto por Gustavsen (2008). O algoritmo do *vector fitting* implementado no MATLAB[®] é de domínio público e está disponível em Gustavsen (2002b). Em todos os casos deste trabalho essa rotina foi empregada para ajustar a admitância de aterramento na faixa de frequências entre 1 Hz e 10 MHz.

Especificamente neste trabalho, utiliza-se a rotina *netgen.m* descrita em Gustavsen (2002a) e disponibilizada em Gustavsen (2002b), que converte o modelo racional gerado pela técnica *vector fitting* em um circuito elétrico equivalente. Esse circuito é gravado em um arquivo de texto que pode ser facilmente incorporado no ATP.

2.4 Modelagem do para-raios

Neste trabalho, adota-se o modelo de para-raios de óxido de zinco proposto pelo IEEE (1992). Para tal, foi adotado o para-raios produzido pela Siemens (2016), adequado para aplicação na proteção de uma LT de 138 kV contra surtos atmosféricos. As principais características do para-raios estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2: Dados do para-raios.

Classe do para-raios	2
Altura do para-raios (m)	1,24
Nº de colunas de MO em paralelo	1
Tensão nominal do para-raios (kV)	132
Tensão de operação contínua (kV)	106
Tensão residual para 1 kA 30/60 μ s	269
Tensão residual para 10 kA 8/20 μ s	337

2.5 Modelagem das ondas de corrente de descarga

As descargas de maior interesse neste trabalho, e na avaliação do desempenho de linhas frente a DAs de um modo geral, correspondem às primeiras descargas de retorno. A forma de onda da Fig. 4 é obtida pela soma de sete funções de Heidler, descrita conforme proposto em De Conti and Visaro (2007).

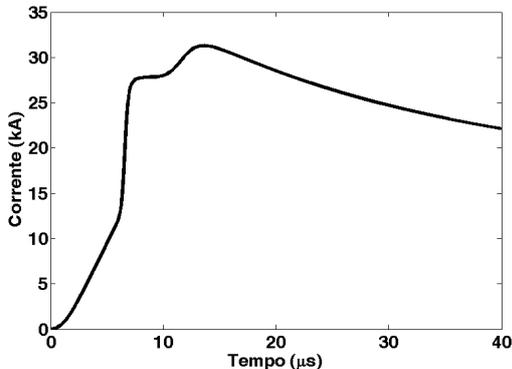


Figura 4: Representação da forma de onda para corrente de primeiras descargas de retorno medidas na estação do Monte San Salvatore. Corrente de pico mediana e tempos de frente: $I_P = 31,1$ kA, $Td_{30} = 3,8 \mu s$, $Td_{10} = 5,6 \mu s$ (De Conti & Visaro 2007).

3 Resultados

O objetivo desta seção é, com base nas modelagens apresentadas nas seções anteriores, avaliar a influência da representação do aterramento na atuação do para-raios. Em todas as simulações supõe-se a injeção de uma primeira descarga mediana no topo da torre. Em termos de instalação de para-raios são consideradas duas situações: para-raios em uma única fase (fase A) e para-raios nas três fases.

Para avaliação da influência do aterramento, são consideradas as seguintes três representações: 1) modelo estático, composto por um resistor com valor igual à resistência de aterramento R_{LF} ; 2) modelo estático composto por um resistor com valor igual à impedância impulsiva de aterramento Z_P ; e 3) modelo dependente da frequência (modelo de banda larga).

A Tabela 3 apresenta os valores de R_{LF} e Z_P para os arranjos e as resistividades consideradas neste trabalho. Note-se que os valores de Z_P são inferiores aos de R_{LF} , devido ao efeito da dependência da frequência dos parâmetros do solo (Alípio et al., 2016).

Ainda, vale salientar que a partir das modelagens apresentadas, uma série de análises de sensibilidades pode ser desenvolvida, produzindo uma quantidade significativa de resultados. No

entanto, optou-se por uma apresentação compacta dos resultados, focando no objetivo central deste trabalho.

Todas as simulações foram realizadas utilizando a plataforma ATP.

Tabela 3: Valores de Z_P e R_{LF} para o arranjo do aterramento sob análise.

$\rho_0(\Omega \cdot m)$	$L(m)$	$Z_P(\Omega)$ 1 ^{as} descargas	$R_{LF}(\Omega)$
300	25	5,76	6,66
1000	45	11,50	14,11
3000	85	18,54	25,62

3.1 Considerando para-raios na fase A

A Fig. 5 ilustra as sobretensões resultantes ao longo da cadeia de isoladores da fase A, considerando solos de resistividade 300, 1000 e 3000 $\Omega \cdot m$. Os gráficos à esquerda apresentam detalhes da frente da onda de sobretensão, enquanto que os gráficos à direita ilustram um maior intervalo de tempo incluindo a cauda da onda.

De acordo com os resultados, são observadas pequenas diferenças na frente da onda dependendo do tipo de representação adotada para o aterramento. Nota-se, também, uma tendência de leve aumento das discrepâncias entre os resultados obtidos pelas diferentes representações à medida que a resistividade do solo aumenta. Em todos os casos, considerando a frente da onda, a representação do aterramento via Z_P leva a resultados mais próximos daqueles com a representação completa do aterramento considerando características variável com a frequência e a utilização da técnica *Vector Fitting* – VFV, em comparação com a representação via R_{LF} . Esses resultados estão em consonância com aqueles obtidos por Visaro and Silveira (2016), sem a inclusão de para-raios. É importante salientar que, a despeito das diferenças observadas entre as curvas, pode-se afirmar que a frente da onda é pouco influenciada pela representação do aterramento. Inclusive, os valores de pico são basicamente os mesmos em todos os casos. Uma vez que a atuação do para-raios se dá, sobretudo, na frente da onda, tal resultado permite inferir que na avaliação da atuação do dispositivo em termos de simulação, a dependência da frequência do aterramento é pouco relevante e uma representação simplificada via uma resistência concentrada leva a bons resultados. Aparentemente, a característica não linear do para-raios domina o comportamento do transitório ao longo da frente da onda.

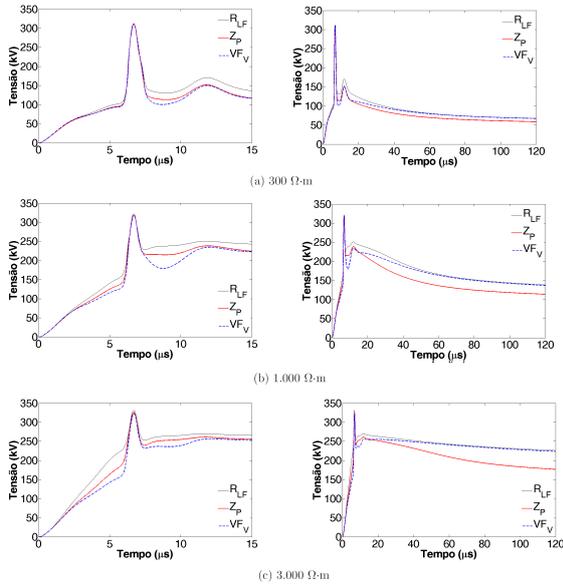


Figura 5: Sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (fase com para-raios instalado), considerando diferentes valores de resistividade. As figuras à esquerda ilustram a frente da onda e as figuras à direita contemplam um maior intervalo de tempo incluindo a cauda da onda de tensão.

As curvas à direita da Fig. 5, que contemplam um intervalo de tempo maior incluindo a cauda das ondas de tensão, ilustram alguns aspectos interessantes. Ao longo da cauda da onda de tensão, percebe-se que os resultados obtidos pelas representações do aterramento completa e via R_{LF} são basicamente coincidentes. Tal resultado é fisicamente consistente, uma vez que a cauda da onda, que apresenta variação temporal relativamente lenta, está associada aos componentes de baixa frequência. Assim, o comportamento nesse intervalo do transitório é basicamente ditado pela resistência de aterramento, parâmetro que caracteriza o aterramento em baixas frequências. Como a representação completa do aterramento contempla seu comportamento em uma larga banda de frequências, incluindo a faixa inferior do espectro, essa representação tende para a resistência de aterramento ao longo da cauda da onda.

Por outro lado, nota-se que a representação do aterramento via Z_P leva a valores de tensão inferiores ao longo da cauda. Neste ponto é muito importante salientar que, a despeito da impedância impulsiva contemplar de forma concisa e aproximada o comportamento impulsivo do aterramento, a representação via uma resistência concentrada com valor igual à Z_P ainda é um modelo estático. Nesse sentido, é esperado que ao longo da cauda essa representação leve a valores inferiores de tensão, já que, em decorrência da dependência da frequência dos parâmetros do solo, a impedância impulsiva é menor do que a resistência de aterramento (considerando os casos analisados).

O fato de a representação do aterramento via Z_P produzir valores de tensão inferiores ao longo da cauda leva a um outro questionamento. De acordo com as análises anteriores, a atuação do para-raios, relacionada, sobretudo, à frente da onda, é pouco influenciada pela representação do aterramento. Por outro lado, o desempenho do para-raios, principalmente considerando a energia dissipada por ele, pode ser influenciado pela cauda da onda. Nesse caso, uma representação via Z_P poderia levar a estimativas de energia dissipada inferiores às reais, tomando como referência a representação completa do aterramento. Note que essa hipótese é verdadeira apenas se a atuação do para-raios se estender para a cauda da onda; ou seja, se ele continuar conduzindo corrente também nesse intervalo do transitório.

A Fig. 6 ilustra resultados similares aos da Fig. 5, porém considerando a fase B. Embora a linha seja considerada não-transposta, dada a disposição dos condutores, as sobretensões na fase C são muito similares às das fase B. De forma a apresentar os resultados de forma mais concisa, optou-se por incluir apenas aqueles referentes à fase B.

De acordo com os resultados da Fig. 6, pode-se observar que as diferenças na frente das ondas de tensão são mais acentuadas do que no caso da fase A. Isso se deve ao fato de que, embora o efeito do para-raios seja estendido para as outras fases, a sua influência é naturalmente reduzida. Pode-se notar que, embora as diferenças entre os valores de pico das sobretensões obtidas pelas diferentes representações do aterramento sejam basicamente desprezíveis para solos até $1000 \Omega \cdot m$, algumas discrepâncias já são observadas no caso do solo de $3000 \Omega \cdot m$. Esses resultados indicam que, do ponto de vista rigoroso, na determinação da ocorrência ou não de ruptura nas fases não protegidas por para-raios, uma representação mais elaborada do aterramento, tendo em conta o seu comportamento dependente da frequência, é importante. Novamente, os resultados obtidos pela representação via Z_P se aproximam mais daqueles determinados com a representação completa do aterramento. No entanto, para uma avaliação mais rigorosa da representação via Z_P neste caso, uma modelagem deveria ser implementada para os isoladores da linha.

O comportamento das tensões na fase B ao longo da cauda é similar ao caso da fase A, ou seja, as curvas obtidas pelas representações completa e via R_{LF} são basicamente coincidentes, enquanto que os resultados obtidos via Z_P levam a patamares inferiores de tensão.

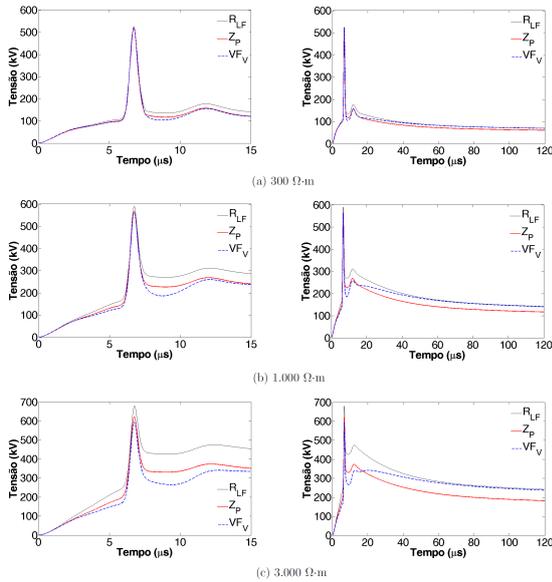


Figura 6: Sobretensões na cadeia de isoladores da fase B (fase sem para-raios instalado), considerando diferentes valores de resistividade. As figuras à esquerda ilustram a frente da onda e as figuras à direita contemplam um maior intervalo de tempo incluindo a cauda da onda de tensão.

3.2 Considerando para-raios nas três fases

A Fig. 7 ilustra as sobretensões resultantes ao longo da cadeia de isoladores da fase A, considerando solos de resistividade 300, 1.000 e 3.000 $\Omega\cdot m$. De modo similar à seção anterior, os gráficos à esquerda apresentam detalhes da frente da onda de sobretensão, enquanto que os gráficos à direita ilustram um maior intervalo de tempo incluindo a cauda da onda. Os resultados para as outras duas fases são basicamente idênticos.

Os resultados são similares aos obtidos para a fase A no caso anterior (situação de instalação de para-raios apenas na fase A). Embora sejam observadas pequenas diferenças na frente da onda dependendo do tipo de representação adotada para o aterramento, principalmente no caso de solo de 3.000 $\Omega\cdot m$, pode-se afirmar que, de modo geral, essa região da onda é pouco influenciada pelo comportamento dependente da frequência do aterramento. Também nesse caso, os valores de pico são basicamente coincidentes, independentemente da representação adotada para o aterramento. Esses resultados permitem inferir que, no caso de uma torre com as três fases protegidas, a representação do aterramento influencia pouco na avaliação da atuação do para-raios.

Ao longo da cauda, os mesmos comentários da seção anterior se aplicam, inclusive com relação à questão de avaliação da energia dissipada pelo para-raios.

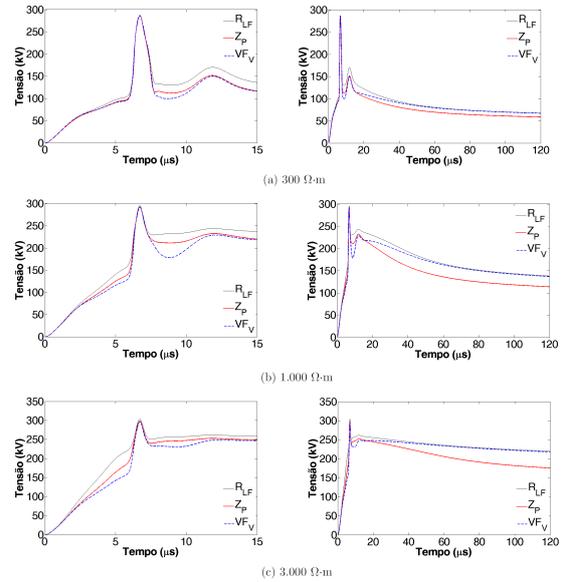


Figura 7: Sobretensões na cadeia de isoladores da fase A (para-raios instalados em todas as fases), considerando diferentes valores de resistividade. As figuras à esquerda ilustram a frente da onda e as figuras à direita contemplam um maior intervalo de tempo incluindo a cauda da onda de tensão.

4 Conclusões

Este trabalho concentrou-se na avaliação do impacto da representação do aterramento elétrico na atuação de para-raios frente a descargas atmosféricas.

O principal resultado de impacto do ponto de vista de engenharia é que a representação do aterramento influencia pouco a frente da onda de sobretensão e, conseqüentemente, a atuação do para-raios. Isso implica que em simulações rotineiras para avaliação de *sobretensões* de origem atmosférica em linhas protegidas com para-raios, uma representação simplificada estática do aterramento leva a bons resultados, particularmente no caso de sua representação via uma resistência com valor igual à impedância impulsiva.

Assim, em simulações que não se tem disponível um modelo de banda larga para o aterramento, é recomendável representá-lo via uma resistência com valor igual à resistência de aterramento R_{LF} , em uma abordagem conservadora.

Agradecimentos

O autor agrade o apoio fornecido pelo PPGEL – UFSJ/CEFET-MG.

Referências

Alípio, R. S. (2008). *Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do*

- Tempo e da Frequência*, Dissertação de mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Alípio, R. S. (2013). *Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Alípio, R. S., Pinto, A. F., De Conti, A. R. and Schroeder, M. A. O. (2016). Evaluation of Line Surge Arresters Performance Considering Frequency-Dependent Characteristics of Tower-Footing Grounding, *Ground'2016 & 7th LPE – International Conference on Grounding and Earthing & International Conference on Lightning Physics and Effects*.
- Alípio, R. S., Schroeder, M. A. O., Afonso, M. M. and Oliveira, T. A. S. (2011). Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos de Alta Frequência e Comparação com Resultados Experimentais, *Revista Controle & Automação (SBA)* **22**(1): 89–102.
- De Conti, A. and Visacro, S. (2007). Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **49**(2): 448–451.
- De Conti, A., Visacro, S. and Silva, E. G. (2009). Calculation of Tower Surge Impedance With Jordan's Equations, *XIX International Conference Electromagnetic Disturbances* pp. 35–40.
- De Conti, A., Visacro, S., Soares Jr., A. and Schroeder, M. A. O. (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. (2002a). Computer Code for Rational Approximation of Frequency Dependent Admittance Matrices, *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Gustavsen, B. (2002b). SINTEF Energy Research - The Vector Fitting Web Site. Disponível em <http://www.sintef.no/Projectweb/VECTFIT/>.
- Gustavsen, B. (2008). Fast Passivity Enforcement for Pole-residue Models by Perturbation of Residue Matrix Eigenvalues, *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**(4): 2278–2285.
- Gustavsen, B. and Semlyen, A. (1999). Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting, *IEEE Transactions on Power Delivery* **14**(3): 1052–1061.
- Harrington, R. F. (1993). *Field Computation by Moment Methods*, IEEE Press, New York.
- IEEE (1992). IEEE Working Group 3.4.11 - Modeling of Metal Oxide Surge Arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery* **7**(1): 302–309.
- Ishii, M. and Kawamura, H. (2011). Application of Line Surge Arresters to Double-Circuit Transmission Lines, *International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA)* pp. 312–318.
- Marti, J. R. (1982). Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Eelectromagnetic Transient Simulations, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **PAS-101**(1): 147–157.
- Munukutla, K., Vittal, V., Heydt, G. T., Chipman, D. and Keel, B. (2010). A Practical Evaluation of Surge Arrester Placement for Transmission Line Lightning Protection, *IEEE Transactions on Power Delivery* **25**(3): 1742–1748.
- Sardi, J. and Chian, J. O. C. (2010). Evaluation of surge arrester requirement for overhead transmission line using electromagnetic transient program, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010)* pp. 985–988.
- Schroeder, M. A. O. (2001). *Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro de Cachimbo*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Siemens (2016). High-Voltage Surge Arresters – product guide [online]. Disponível em <http://siemens.com/energy/arrester>. Acessado em 21 Junho 2016.
- Visacro, S. (1992). *Modelagem de Aterramentos Elétricos*, Tese de doutorado, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ.
- Visacro, S. and Silveira, F. H. (2016). Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires, *IEEE Transactions on Power Delivery* **31**(4): 1524–1532.
- Visacro, S. and Soares Jr., A. (2005). HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems, *IEEE Transactions on Power Delivery* **20**(2): 1206–1208.