DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2180

Análise da Influência da Dependência da Frequência dos Parâmetros Elétricos do Solo na Modelagem e Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Linhas de Transmissão Aéreas

Fernando A. Diniz* Rafael Alipio* Rodolfo A. R. Moura**

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Belo Horizonte, Brasil*
(e-mail: fernandoaldiniz@gmail.com; rafael.alipio@cefetmg.br).
***Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), São João del-Rei, Brasil*
(e-mail: moura@ufsj.edu.br)

Abstract: This paper investigates the influence of the frequency dependence of soil conductivity e permittivity on the simulation of electromagnetic transients in overhead lines. Line parameters are calculated using a precise formulation, that considers ground displacement currents, soil admittance correction, and a rigorous voltage definition. The frequency dependence of soil parameters is calculated considering a causal model based on measurements over a wide frequency range. The calculations are performed in the frequency domain and time domain results are obtained from Laplace numerical transform. The results show that the frequency dependence of soil electrical parameters may be relevant in the simulation of lightning transients in overhead lines, especially if the soil is a poor conductor (has high resistivity). Also, it is shown that the use of Carson's Simplifications leads to significant deviations, taking as reference the results obtained from the use of accurate formulation for parameters calculation.

Resumo: Este artigo investiga a influência do fenômeno de dependência da frequência da condutividade e permissividade do solo na simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas aéreas. Os parâmetros da linha são calculados com o uso de uma formulação precisa que considera as correntes de deslocamento no solo, a correção da admitância do solo e uma definição rigorosa de tensão. A dependência da frequência dos parâmetros do solo é calculada considerando um modelo causal, baseado em medições em uma ampla faixa de frequências. Os cálculos são realizados no domínio da frequência e resultados no domínio do tempo são obtidos via uma transformada numérica de Laplace. Os resultados mostram que a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo pode ser relevante na simulação de transitórios de origem atmosférica em linhas aéreas, especialmente se o solo possui elevada resistividade. Também, mostra-se que o uso da aproximação proposta por Carson leva a desvios significativos, tendo como referência os resultados obtidos a partir da formulação mais precisa de cálculo de parâmetros.

Keywords: electromagnetic transients; frequency dependence of soil electrical parameters; ground admittance; ground return impedance; transmission line.

Palavras-chaves: admitância do solo; dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo; impedância de retorno do solo; linhas de transmissão; transitórios eletromagnéticos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, diversos autores e grupos de pesquisa se dedicaram ao estudo do impacto da consideração da dependência da frequência da condutividade (σ) e permissividade (ε) elétricas do solo no cálculo de transitórios eletromagnéticos, especialmente aqueles de origem atmosféricas. Em (Alipio e Visacro, 2013), (Akbari, Sheshyekani e Alemi, 2013), por exemplo, avalia-se como a dependência da frequência de σ e ε afeta o comportamento transitório de aterramentos elétricos e em (Visacro e Silveira, 2015) como essa influência no comportamento do aterramento impacta o desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Em (Akbari *et al.*, 2013), (Silveira *et al.*, 2014) analisa-se a influência da variação de σ e ε com a frequência no cálculo de tensões induzidas em redes de distribuição por descargas próximas. Os principais aspectos físicos relacionados ao fenômeno de dependência da frequência de σ e ε, a influência desse fenômeno no desempenho de sistemas elétricos frente a descargas atmosféricas e as recomendações de engenharia para se ter em conta esse efeito foram recentemente compiladas na forma de uma Brochura do CIGRE (Working Group C4.33, 2019).

Na avaliação da propagação de ondas de tensão e corrente em linhas de transmissão aéreas é importante ter em conta o efeito do solo, normalmente computado no cálculo da impedância de retorno pelo solo e na correção da admitância do solo (Wedepohl e Efthymiadis, 1978). Nesse sentido, é importante também analisar o impacto de se incluir o efeito de dependência da frequência da condutividade e permissividade do solo na análise de propagação de ondas em linhas de transmissão. No entanto, a maior parte dos

programas do tipo EMT (*Electromagnetic Transients*) computa o efeito do solo pelo uso da formulação clássica de Carson, que supõe a corrente de condução no solo muito superior à de deslocamento e despreza a variação dos parâmetros do solo com a frequência (Carson, 1926). Essas suposições podem levar a erros no caso de solos de elevada resistividade e aplicações que envolvam altas frequências como, por exemplo, transitórios oriundos da incidência de descargas atmosféricas em linhas de transmissão.

O efeito da dependência da frequência de σ e ε no cálculo de parâmetros de linhas aéreas e/ou na propagação de ondas nessas linhas é investigado em alguns trabalhos publicados na literatura. Em (Portela, Tavares e Filho, 2003; Lima e Portela, 2007; Gertrudes, Tavares e Portela, 2011), esse efeito é avaliado no cálculo dos parâmetros de linhas e no transitório de energização, porém considerando um único tipo de solo, o que dificulta a generalização dos resultados. Em (Moura *et al.*, 2014b2014a; Moura *et al.*, 2014b) a influência da dependência da frequência dos parâmetros do solo é analisada em termos dos parâmetros da linha e das tensões transitórios de forma aproximada por meio do modelo de Bergeron. Em (Li *et al.*, 2016) avalia-se a influência da variação de σ e ε com a frequência, considerando um conjunto específico de medições, no cálculo dos parâmetros de linhas, porém as análises não são estendidas para o domínio do tempo. Em (De Conti e Emídio, 2016) investiga-se o impacto da consideração de parâmetros do solo dependentes da frequência na propagação de transitórios em linhas aéreas; no entanto, as configurações analisadas são simples, correspondendo a um ou dois condutores sob o solo, já que o foco é na análise de transitórios em redes de distribuição aéreas. Tendo em conta o exposto, entende-se que há a necessidade de uma análise mais aprofundada e extensa do efeito de dependência da frequência nos parâmetros do solo na modelagem de linhas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar os possíveis desvios associados à consideração de parâmetros do solo constantes e independentes da frequência no cálculo de transitórios de origem atmosférica em linhas de transmissão aéreas.

2. CÁLCULO DE PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO INCLUINDO O EFEITO DO SOLO

Considera-se neste trabalho o problema de avaliação da propagação de ondas de tensão e corrente em linhas de transmissão aéreas, em que os condutores estão imersos no ar e sob um solo condutor imperfeito. Com o intuito de estender a teoria de linhas de transmissão para aplicações envolvendo frequências mais elevadas (frequências típicas de descargas atmosféricas - algumas dezenas de MHz), alguns autores se dedicaram ao estudo e à proposição de formulações baseadas diretamente na aplicação das equações de campo ao problema (Kikuchi, 1956; Wedepohl e Efthymiadis, 1978; D'Amore e Sarto, 1997; Pettersson, 1999). Essa abordagem, também conhecida como abordagem de onda completa, se baseia na aplicação das Equações de Maxwell ao problema de linhas transmissão, via potenciais escalar elétrico e vetor magnético, ou de Hertz, dependendo do autor, aplicação das condições de interface entre ar e solo, e, finalmente, obtenção e solução da equação modal para determinação da constate de propagação no ar. O cálculo da constante de propagação como raiz da equação modal não é trivial, além de ter elevado custo computacional (Lima e Tomasevich, 2015). No caso de linhas de transmissão aéreas pode-se supor, com erros de aproximação, a solução da equação modal como sendo a constante de propagação intrínseca do ar, ou seja $\gamma \approx j\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$, em que ω é a frequência angular e μ_0 e ε_0 são a permeabilidade e permissividade do vácuo, respectivamente. A solução obtida a partir dessa suposição é usualmente conhecida na literatura como solução ou aproximação quase-TEM.

Com o intuito de avaliar de forma rigorosa o impacto da representação do efeito do solo no cálculo de parâmetros de linhas de transmissão aéreas e na propagação de transitórios eletromagnéticos nessas linhas, adota-se a aproximação quase-TEM proposta por (Pettersson, 1999). Essa formulação considera as correntes de deslocamento no solo e, adicionalmente, a correção da admitância do solo. Na aproximação quase-TEM também é importante a definição adotada para a tensão (Lima *et al.*, 2018). Neste trabalho, adota-se a definição rigorosa de tensão entre um condutor da linha e um ponto no plano de terra abaixo como a integral de linha do campo elétrico vertical da superfície do solo à altura do condutor, incluindo a componente vertical do potencial vetor magnético (Pettersson, 1999; Lima *et al.*, 2018).

A Fig. 1 ilustra uma linha aérea com condutores infinitos i e j de raio externo r e alturas médias, h_i e h_j, respectivamente. O ar é caracterizado pela permeabilidade magnética μ_0, permissividade elétrica ε_0 e condutividade $\sigma_0 = 0$, enquanto o solo pela permeabilidade magnética $\mu_g = \mu_0$, permissividade elétrica ε_g e condutividade σ_g. A constante de propagação é dada por $\gamma_k = \sqrt{j\omega\mu_k(\sigma_k + j\omega\varepsilon_k)}$, em que k é o meio sendo k=0 o ar e k=g o solo.

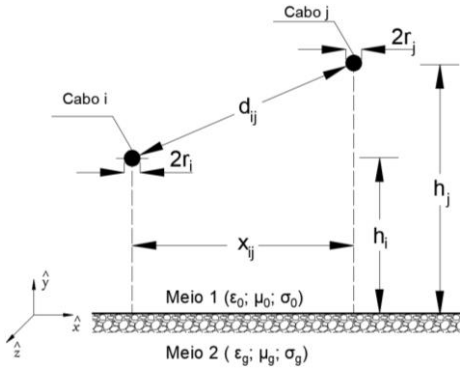


Fig. 1 Arranjo de condutores de uma linha de transmissão polifásica.

Para a linha polifásica da Fig. 1, a impedância e admitância transversal são dadas por (1) e (2), respectivamente.

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{Z_{int}} + \boldsymbol{Z_{ext}} + \boldsymbol{Z_g} \tag{1}$$

onde $\boldsymbol{Z_{int}}$ é a matriz de impedâncias associadas às perdas internas dos condutores e são determinadas usando as funções de Bessel (Juan A. Martinez-Velasco, 2009), $\boldsymbol{Z_{ext}}$ é a matriz de impedâncias externas e está associada ao campo magnético no meio em que os condutores estão imersos, e $\boldsymbol{Z_g}$ é a matriz de impedâncias de retorno pelo solo e está associada ao campo magnético que penetra nele.

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{Y_{ext}} + \boldsymbol{Y_g} \quad (2)$$

onde $\boldsymbol{Y_{ext}}$ é admitância transversal devido ao acoplamento capacitivo entre os condutores da linha e os condutores e um solo ideal, podendo ser determinada a partir do inverso da matriz de potenciais de Maxwell e o termo $\boldsymbol{Y_g}$ leva em conta os efeitos de penetração do campo elétrico em um solo com perdas.

A definição de $\boldsymbol{Z_g}$ e $\boldsymbol{Y}_g$ depende da formulação considerada, sendo que no caso da aproximação quase-TEM de Pettersson, que considera o solo como sendo um meio com perdas e a definição rigorosa de tensão, os parâmetros longitudinal e transversal da linha são calculados, respectivamente, de acordo com (3) e (4).

$$\boldsymbol{Z} = \boldsymbol{Z_{int}} + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}[\boldsymbol{M} + \boldsymbol{S_1} - (\boldsymbol{S_2} + \boldsymbol{T})] \quad (3)$$

$$\boldsymbol{Y} = j\omega\varepsilon_0 2\pi(\boldsymbol{M} - \boldsymbol{T})^{-1} \quad (4)$$

onde os elementos da matriz $\boldsymbol{M}$, relacionados com os campos externos no ar, são dados por.

$$\boldsymbol{M_{ii}} = \ln\frac{2h_i}{r_i} \qquad \boldsymbol{M_{ij}} = \ln\frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (5)$$

com $D_{ij} = \sqrt{\ell_{ij}{}^2 + x_{ij}{}^2}$, $\ell_{ij} = h_i + h_j$ e as variáveis d_{ij} e x_{ij} são as distâncias mostradas na Fig. 1.

Finalmente, as matrizes $\boldsymbol{S_1}$, $\boldsymbol{S_2}$ e $\boldsymbol{T}$, advindas da formulação de Pettersson, são dadas por:

$$\boldsymbol{S_{1ij}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\ell_{ij}\lambda}}{\lambda + \bar{u}} e^{jx_{ij}\lambda} d\lambda \quad (6)$$

$$\boldsymbol{S_{2ij}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\ell_{ij}\lambda}}{n^2\lambda + \bar{u}} e^{jx_{ij}\lambda} d\lambda \quad (7)$$

$$\boldsymbol{T_{ij}} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\bar{u}}{\lambda}\left(\frac{e^{-\frac{\ell_{ij}\lambda}{2}} - e^{-\ell_{ij}\lambda}}{n^2\lambda + \bar{u}}\right) e^{jx_{ij}\lambda} d\lambda \quad (8)$$

Em (6)–(8), $\bar{u} = \sqrt{\lambda^2 + \gamma_2^2 - \gamma_1^2}$ e $n = \gamma_2/\gamma_1$ é o índice de refração do solo.

No caso de baixas frequências, os termos das matrizes $\boldsymbol{S_2}$ e $\boldsymbol{T}$ tendem a zero. Adicionalmente, considerando solos de baixa resistividade, tem-se $\gamma_2 \approx \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_g}$. Supondo essas hipóteses, (3) e (4) se reduzem à clássica aproximação de baixa frequência de Carson, amplamente utilizada em programas populares de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

2.2 Dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo

De acordo com medições laboratoriais (Portela, 1999) e em campo (Alipio e Visacro, 2014), embora a permeabilidade magnética do solo possa ser assumida constante e aproximadamente igual à do vácuo, a condutividade e permissividade elétricas apresentam forte dependência da frequência na faixa entre 0 Hz e alguns MHz. Portanto, na avaliação de transitórios que abranjam uma larga faixa de frequências, e onde o efeito do solo é importante, deve-se considerar o efeito de variação dos parâmetros elétricos do solo (σ_g e ε_g) com a frequência. No entanto, a maior parte dos simuladores de transitórios eletromagnéticos não apenas desprezam as correntes de deslocamento no solo, como também assumem os seus parâmetros constantes.

Algumas metodologias foram propostas para medição e modelagem da dependência da frequência de σ_g e ε_g. Neste trabalho, adota-se o modelo proposto por (Alipio e Visacro, 2014) que foi recentemente recomendado pelo CIGRE na Brochura C4.33 para inclusão do fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo em estudos de transitórios no sistema elétrico (Working Group C4.33, 2019). Esse modelo é baseado em 65 medições realizadas em condições de campo, compreendendo diferentes tipos de solos, com resistividade em baixa frequência variando entre cerca de 60 Ωm a 18.000 Ωm. Adicionalmente, as premissas do modelo supracitado são baseadas nas Equações de Maxwell e nas relações de causalidade de Kramers-Kronig (Alipio e Visacro, 2014). A variação da condutividade e da permissividade relativa são dadas, respectivamente, por (9) e (10) (Alipio e Visacro, 2014; Working Group C4.33, 2019).

$$\sigma(f) = \sigma_0\{1 + 4{,}7 \times 10^{-6} \times \sigma_0^{-0{,}73} \times f^{0{,}54}\} \quad (9)$$

$$\varepsilon_r(f) = 9{,}5 \times 10^4 \times \sigma_0^{0{,}27} \times f^{-0{,}46} + 12 \quad (10)$$

Em (9) e (10), σ_0 é a condutividade em baixas frequências em S/m, que pode ser estimada da resistividade em baixas frequências ρ_0, determinada utilizando-se técnicas e instrumentos convencionais, como $\sigma_0 = 1/\rho_0$; f é a frequência em Hz. A resistividade em função da frequência $\rho(f)$ é determinada a partir de (9) como $1/\sigma(f)$.

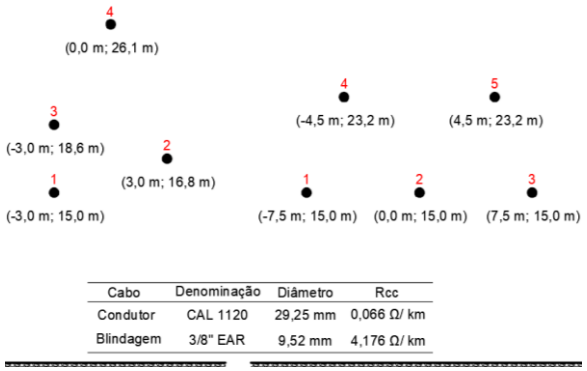
Neste trabalho, (9) e (10) são utilizadas juntamente com a aproximação quase-TEM de Pettersson para investigar o impacto da consideração dos parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência. Nos casos em que se desconsidera tal dependência, assume-se que σ_g=σ_0 e ε_g =10ε_0.

3. ESTUDOS DE CASO

Duas configurações de linhas são consideradas neste trabalho para avaliação da influência do efeito do solo, com ênfase na consideração da dependência da frequência de seus parâmetros elétricos, no cálculo de transitórios de origem atmosférica em linhas de transmissão aéreas. A primeira corresponde a uma linha típica de 138 kV de geometria vertical, e a segunda a uma linha típica de 230 kV de geometria horizontal. Ambas as silhuetas estão ilustradas na Fig. 2, que também indica os tipos de condutores fase e de blindagem para cada configuração. Uma vez que os efeitos da corrente de deslocamento e da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo são mais pronunciados em altas frequências, nas análises deste trabalho, considera-se apenas um vão de linha de 600 m.

Consideram-se neste trabalho três valores distintos de resistividade em baixa frequência ρ_0=100, 1.000 e 10.000 Ωm. A Fig. 3 ilustra a variação da resistividade relativa,

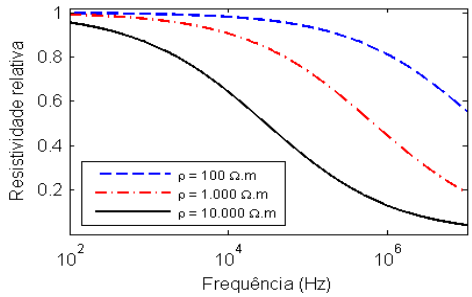
definida como $\frac{\rho(f)}{\rho_0}$, e da permissividade relativa com a frequência para os três solos, considerando o modelo descrito na seção 2.2. Conforme pode-se observar, a resistividade decresce com o aumento da frequência, sendo o decrescimento relativo mais acentuado para solos mais resistivos. A permissividade relativa apresenta valores elevados para frequências na faixa de kHz e tende para valores da ordem de 10^1 na faixa superior do espectro.



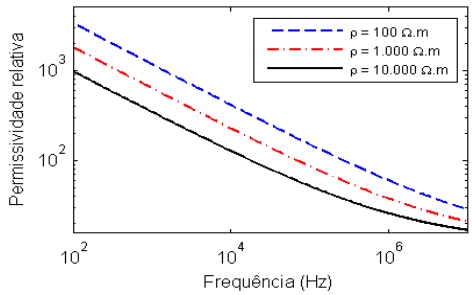
Cabo	Denominação	Diâmetro	Rcc
Condutor	CAL 1120	29,25 mm	0,066 Ω/ km
Blindagem	3/8" EAR	9,52 mm	4,176 Ω/ km

(a) (b)

Fig. 2 Silhueta das estruturas típicas de linhas de (a) 138 kV e (b) 230 kV. As alturas indicadas na figura se referem às alturas médias no meio do vão da linha.



(a)



(b)

Fig. 3 Variação da (a) resistividade e (b) permissividade relativas do solo, considerando ρ_0=100, 1000 e 10.000 Ωm.

3.1 Análise no domínio modal e da frequência

Uma linha de transmissão polifásica pode ser estudada por meio da decomposição de suas fases em modos de propagação independentes, obtidos a partir da aplicação de uma transformação de similaridade nas equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento das tensões e correntes. A propagação desses modos é governada pelas constantes de propagação modais, que são obtidas como os autovalores de $\sqrt{Z \cdot Y}$, ou seja:

$$\alpha_m + j\frac{\omega}{v_m} = eig(Z \cdot Y) \tag{11}$$

em que α_m é a constante de atenuação e v_m a velocidade de propagação do modo *m*.

De acordo com (Wedepohl e Nguyen, 1996), a utilização de algoritmos convencionais na determinação de autovetores de matrizes pode conduzir a erros no cálculo das grandezas modais. Esses erros podem ocorrer em decorrência da troca artificial de posição dos autovalores em determinadas frequências. Para contornar esse problema, neste trabalho adota-se o procedimento proposto em (Wedepohl e Nguyen, 1996), onde se utiliza o método de Newton-Raphson considerando como restrição que a soma dos quadrados do autovetor da primeira coluna seja igual a 1.

3.2 Análise no domínio do tempo

Para avaliação da resposta no domínio do tempo, aplica-se um sinal de tensão de impulso atmosférico padronizado com amplitude de 1 p.u, tempo de frente de 1,2 µs e tempo de meia onda de 50 µs no terminal emissor de um dos cabos de blindagem da configuração analisada, com os outros terminais da linha abertos. A Fig. 4 ilustra as configurações simuladas, juntamente com a numeração dos nós.

A interação entre a excitação, que se encontra no domínio do tempo, e o modelo, proposto no domínio da frequência, é feita, computacionalmente, via transformada numérica de Laplace. A modelagem do sistema é realizada a partir da matriz de admitância nodal da linha, que, no domínio da frequência, se representa na forma entrada-saída através da Lei Ohm:

$$\boldsymbol{I}(s) = \boldsymbol{Y_n}(s)\boldsymbol{V}(s) \tag{12}$$

onde $\boldsymbol{V}(s)$ e $\boldsymbol{I}(s)$ são os vetores de correntes e tensões, no domínio da frequência, referente aos terminais emissor e receptor da linha de transmissão. A matriz de admitância nodal $\boldsymbol{Y_n}$ pode ser calculada por

$$\boldsymbol{Y_n} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Y_c} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{Y_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B} & \boldsymbol{A} \end{bmatrix} \tag{13}$$

sendo as matrizes **A** e **B** dadas, respectivamente, por:

$$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{I} - \boldsymbol{H}^2)^{-1}(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{H}^2) \tag{14}$$

$$\boldsymbol{B} = -2\boldsymbol{H}(\boldsymbol{I} - \boldsymbol{H}^2)^{-1} \tag{15}$$

onde $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{exp}\left(-\boldsymbol{\ell}\sqrt{\boldsymbol{Y} \cdot \boldsymbol{Z}}\right)$ é a função de propagação, $\boldsymbol{Y_c} = \boldsymbol{Z}^{-1}\sqrt{\boldsymbol{Z} \cdot \boldsymbol{Y}}$ é a admitância característica e $\boldsymbol{I}$ é a matriz identidade.

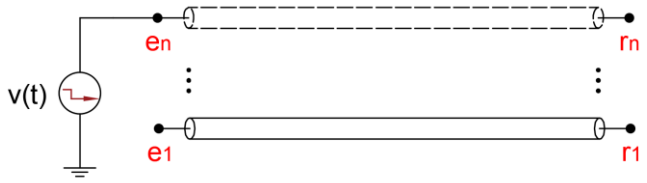


Fig. 4 Circuito representativo das linhas de transmissão, com n = 4 para LT de 138 kV e n = 5 para a LT de 230 kV.

4. RESULTADOS

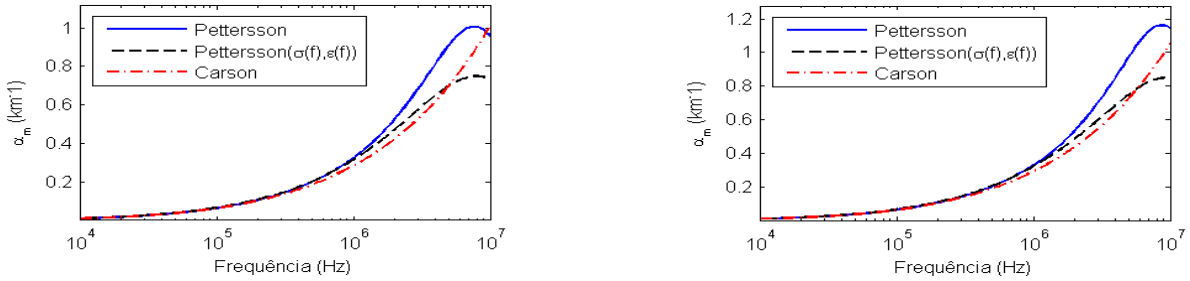
Nas seções a seguir são apresentados os resultados obtidos no domínio modal e da frequência e resultados no domínio do tempo do transitório de aplicação de um impulso atmosférico a um vão da linha. Em todos os casos, são considerados três tipos de modelagens: i) aproximação quase-TEM de Pettersson com parâmetros elétricos do solo dependentes da frequência, identificada como "Pettersson (σ(f), ε(f))"; ii) aproximação quase-TEM de Pettersson com parâmetros elétricos do solo constantes e independentes da frequência, identificada como "Pettersson"; e iii) aproximação de baixa frequência, identificada como "Carson".

4.1 Resultados no domínio modal e da frequência

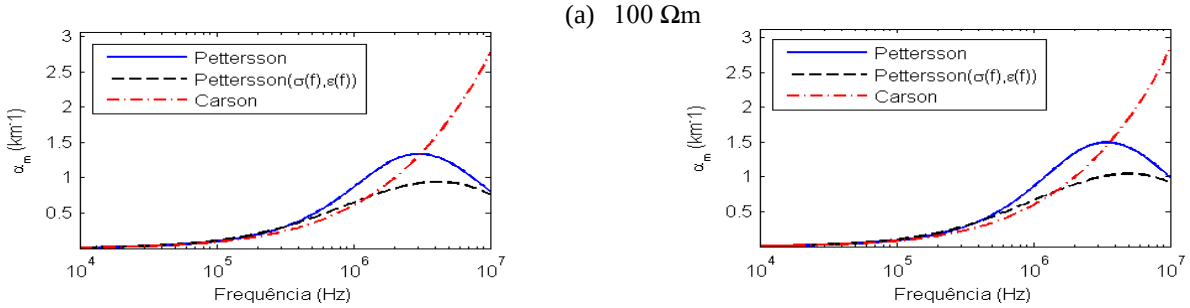
A Fig. 5 apresenta os resultados da constante de atenuação de modo terrestre, considerando as linhas de 138 kV e 230 kV, e solos de (a) 100 Ωm, (b) 1.000 Ωm e (c) 10.000 Ωm. Optou-se por apresentar apenas os resultados para os modos terrestres por uma questão de concisão e, também, porque os parâmetros do solo influenciam de forma mais acentuada esse modo. Os resultados são apresentados para frequências a partir de 10 kHz, já que na faixa inferior do espectro as diferenças entre as formulações são desprezíveis (por exemplo, diferenças relativas inferiores a 10% para solo de 1.000 Ωm na faixa de 1 Hz - 10 kHz).

De acordo com a Fig. 5, ao comparar as simulações assumindo a formulação de Pettersson, nota-se que as curvas obtidas, considerando ou não a dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, apresentam a mesma tendência. As principais diferenças são observadas na faixa do espectro entre centenas de kHz e alguns MHz, sendo que as discrepâncias se tornam visíveis para frequências menores à medida que a resistividade do solo aumenta. Na faixa mencionada, a constante de atenuação é menor quando se considera a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, em decorrência da redução da resistividade do solo com o aumento da frequência.

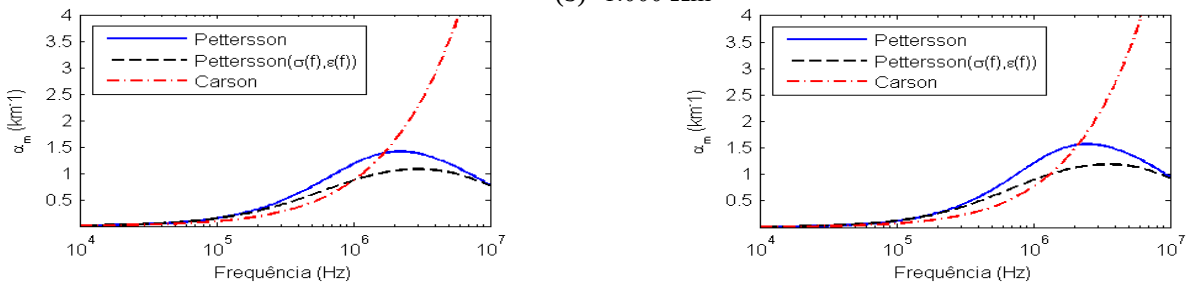
Considerando os resultados obtidos pela aplicação da aproximação de baixa frequência de Carson, observa-se que a constante de atenuação é inferior àquela determinada para a formulação de Pettersson para frequências até cerca de 1 MHz, notadamente para os solos de maior resistividade. Após essa frequência, considerando a aproximação de Carson, nota-se um aumento expressivo da constante de atenuação com o crescimento da frequência, especialmente para solos de maior resistividade. Por outro lado, para a formulação de Pettersson, a constante de atenuação cresce até uma frequência de corte e, depois, reduz-se. Essa frequência de corte diminui com o aumento da resistividade do solo. Fisicamente, a partir da frequência de corte, os campos eletromagnéticos associados à linha deixam de penetrar o solo e a corrente de retorno tende a se propagar quase em sua totalidade na superfície do solo. Nessa faixa de frequências, a influência do solo é reduzida e as perdas se devem, basicamente, à impedância interna dos condutores aéreos.



(a) 100 Ωm



(b) 1.000 Ωm



(c) 10.000 Ωm

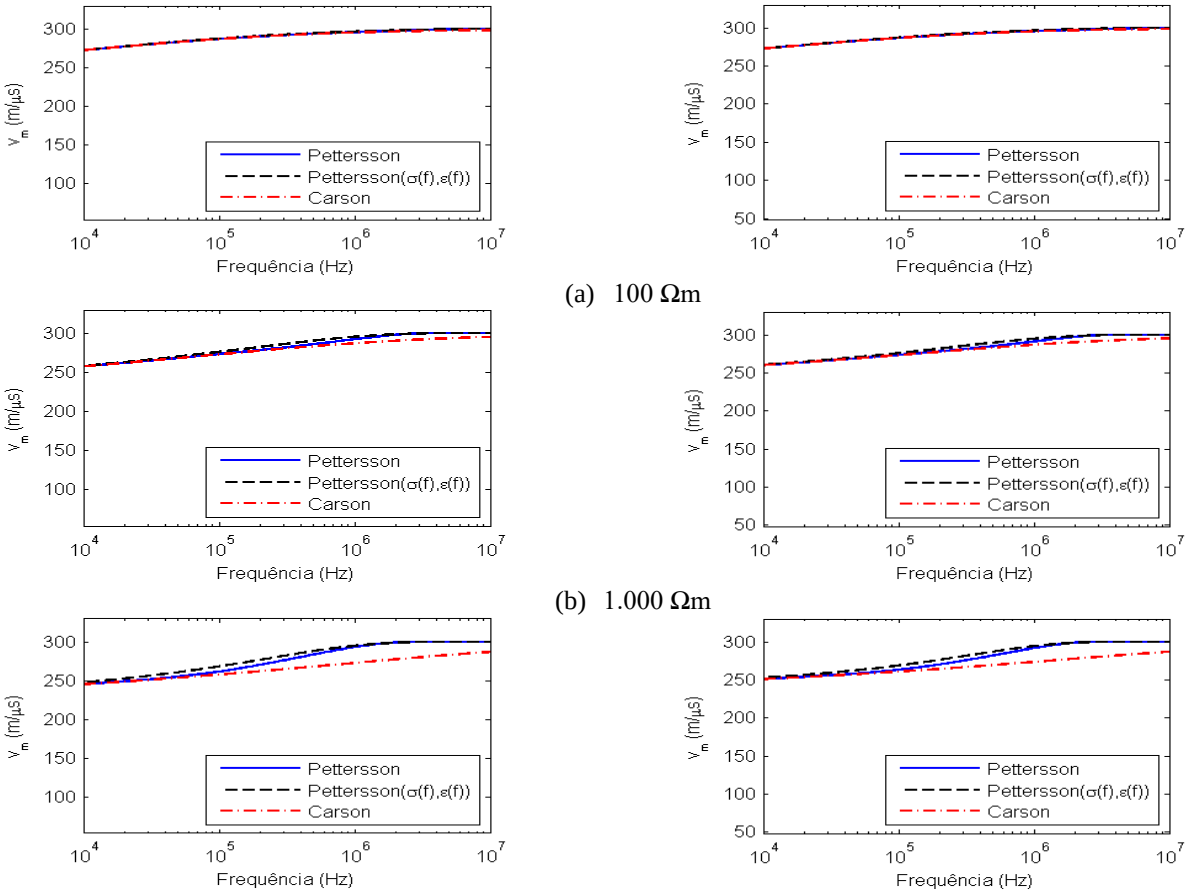
Fig. 5 Constante de atenuação de modo terrestre das linhas de transmissão de 138 kV (esquerda) e 230 kV (direita).

Isso explica, inclusive, por que as curvas associadas ao uso da formulação de Pettersson tendem para valores muito próximos para altas frequências, considerando ou não a dependência da frequência dos parâmetros do solo. Nota-se que a formulação de baixa frequência de Carson, dada as suas aproximações intrínsecas, não consegue capturar esse comportamento físico. A Fig. 6 mostra a variação da velocidade de modo terrestre com a frequência, considerando as linhas de 138 kV e 230 kV, e solos de (a) 100 Ωm, (b) 1.000 Ωm e (c) 10.000 Ωm. De forma análoga à Fig. 5, os resultados são mostrados para frequências superiores a 10 kHz.

De acordo com os resultados, observa-se que, diferentemente da constante de atenuação, as discrepâncias entre os resultados para a formulação de Pettersson, considerando ou não a dependência da frequência dos parâmetros do solo, são discretas. Para ambas as configurações de linhas, e para as resistividades assumidas, a velocidade modal tende assintoticamente para a velocidade da luz, quando se considera a formulação quase-TEM. Na faixa de frequências analisada, a aproximação de Carson leva a valores de velocidade inferiores na faixa superior do espectro, em comparação à formulação de Pettersson, especialmente para solos de maior resistividade.

4.2 Resultados no domínio do tempo

As Figs. 7 e 8 apresentam as formas de onda resultantes nas linhas de 138 kV e 230 kV, respectivamente, considerando a aplicação de uma tensão de impulso atmosférico nos nós indicados na Fig. 4. Os resultados são apresentados para as resistividades de (a) 1.000 Ωm e (b) 10.000 Ωm. No domínio do tempo não são mostrados os resultados obtidos para 100 Ωm em função da restrição do número de páginas, porém os resultados obtidos para os três modelos simulados são basicamente coincidentes.



(a) 100 Ωm

(b) 1.000 Ωm

(c) 10.000 Ωm

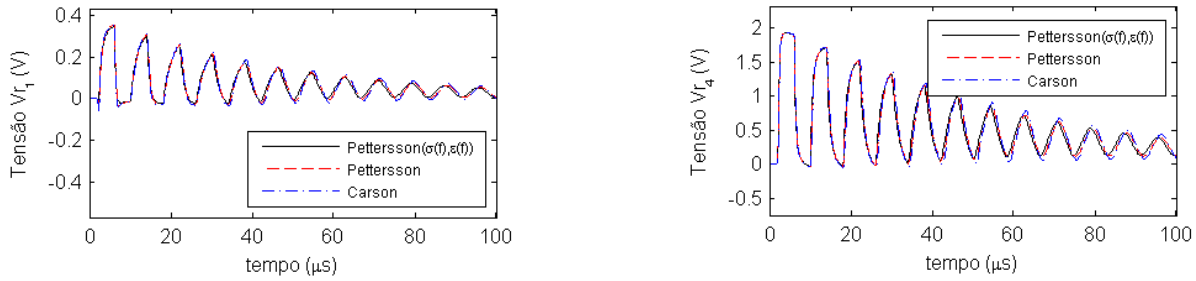
Fig. 6 Velocidade de fase de modo terrestre (v_m) das linhas de transmissão de 138 kV (esquerda) e 230 kV (direita).

De acordo com os resultados, as diferenças entre as três formulações é pequena no caso do solo de 1.000 Ωm, mas torna-se perceptível para o solo de 10.000 Ωm. Interessantemente, nota-se que as formas de onda obtidas para a formulação de Pettersson são similares para as duas hipóteses de modelagem do solo, parâmetros elétricos constantes e dependentes da frequência. Por outro lado, esses resultados diferem daqueles obtidos pelo uso da aproximação de Carson.

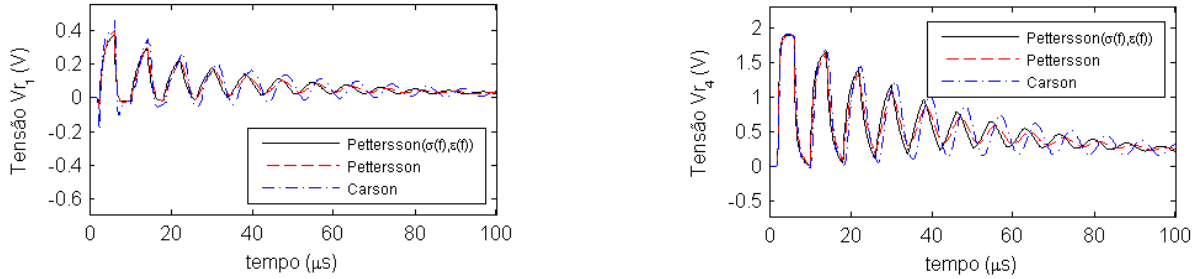
Considerando a tensão no terminal receptor do cabo em que a tensão impulsiva é aplicada, observa-se que as formas de onda associadas ao uso da aproximação de Carson são menos atenuadas e apresentam uma frequência de oscilação menor, em comparação às demais formas de onda. Essa observação é consistente com o resultado da Fig. 6(c), que mostra que a velocidade de fase considerando a aproximação de Carson tende a valores menores na faixa superior do espectro, em comparação à formulação de Pettersson. Adicionalmente, de

acordo com a Fig. 5(c), a constante de atenuação obtida com o uso da aproximação de Carson é menor do que aquelas calculadas considerando a formulação de Pettersson até cerca de 1 MHz, o que explica o comportamento na cauda das formas de onda das Figs. 7(b) e 8(b).

As observações anteriores permanecem válidas para as tensões induzidas nos terminais receptores. Ainda, observa-se que as diferenças entre os resultados obtidos pelo uso da aproximação de Carson e formulação de Pettersson são mais expressivas para as formas de onda das tensões induzidas. Esse resultado indica que nos casos em que o cálculo de tensões induzidas for de maior importância, cuidado adicional deve ser levado em conta na modelagem do efeito do solo, especialmente no caso de resistividades mais elevadas.

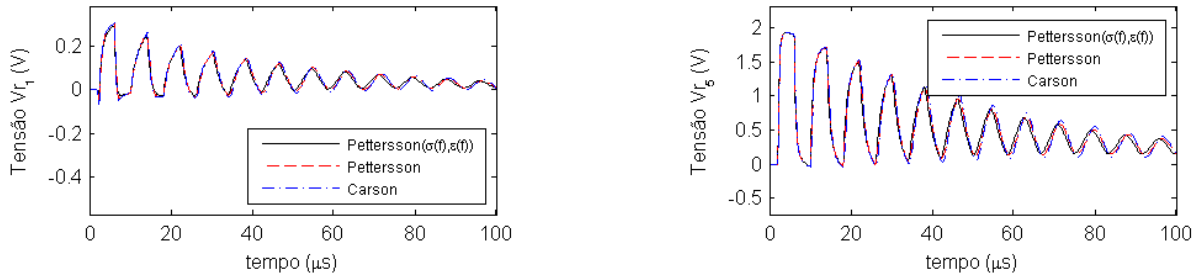


(a) 1.000 Ωm

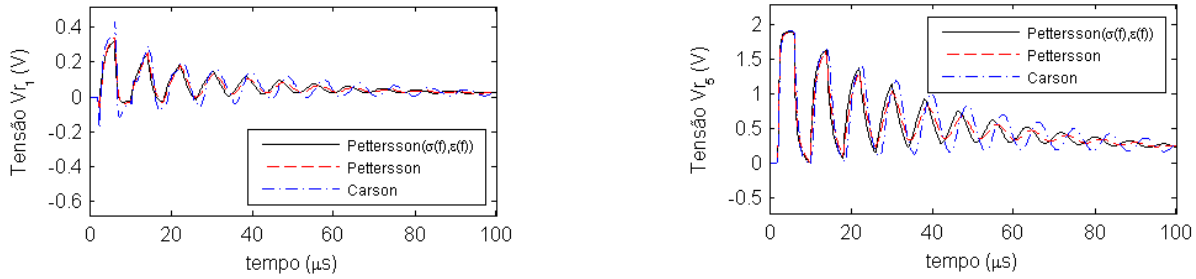


(b) 10.000 Ωm

Fig. 7 Tensões nos terminais receptores 1 e 4 da linha de 138 kV para (a) 1.000 Ωm e (b) 10.000 Ωm.



(a) 1.000 Ω



(b) 10.000 Ω

Fig. 8 Tensões nos terminais receptores 1 e 5 da linha de 230 kV para (a) 1.000 Ωm e (b) 10.000 Ωm.

6. CONCLUSÕES

Avaliou-se neste trabalho a influência da dependência da frequência da condutividade e permissividade do solo na simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão aéreas. De acordo com os resultados, a dependência da frequência dos parâmetros do solo pode ser importante no estudo de transitórios de origem atmosférica em linha localizadas em regiões de alta resistividade. As diferenças observadas nas formas de onda, considerando ou desprezando a variação de σ e ε com a frequência, podem ser suficientes para, por exemplo, determinar a ocorrência (ou não) da ruptura do isolamento de uma linha de transmissão.

Adicionalmente, mostrou-se que a formulação clássica de Carson pode levar a erros significativos, quando se consideram altas frequências. Tais erros se acentuam com o crescimento da resistividade do solo. Nesse sentido, a análise de transitórios eletromagnéticos que abranjam uma ampla faixa de frequências, por exemplo, descargas atmosféricas, deve ser feita com cautela, caso seja feito uso da aproximação de Carson.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as sugestões do Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima e do Prof. Marco Aurélio de Oliveira Schroeder. O autor Rafael Alipio agradece os subsídios do CNPq no âmbito do projeto 312763/2018-2 e ao CEFET-MG pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS

Akbari, M. *et al.* (2013) 'Evaluation of lightning electromagnetic fields e their induced voltages on overhead lines considering the frequency dependence of soil electrical parameters', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 55(6), pp. 1210–1219.

Akbari, M., Sheshyekani, K. e Alemi, M. R. (2013) 'The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 55(4), pp. 739–746.

Alipio, R. e Visacro, S. (2013) 'Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 55(1), pp. 132–139.

Alipio, R. e Visacro, S. (2014) 'Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 56(5), pp. 1163–1171.

Carson, J. R. (1926) 'Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return', *Bell System Technical Journal*, 5(4), pp. 539–554.

De Conti, A. e Emídio, M. P. S. (2016) 'Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters', *Elec. Power Syst. Research*, 138, pp. 120–130.

D'Amore, M. e Sarto, M. S. (1997) 'A new formulation of lossy ground return parameters for transient analysis of multiconductor dissipative lines', *IEEE Trans. Power Del.*, 12(1), pp. 303–309.

Gertrudes, J. B., Tavares, M. C. e Portela, C. (2011) 'Transient analysis on overhead transmission line considering the frequency dependent soil representation', *2011 IEEE Electrical Power e Energy Conference, EPEC 2011*, pp. 362–367.

Juan A. Martinez-Velasco (2009) *Power system transients: parameter determination.* 1st edn. Boca Raton: CRC Press.

Kikuchi, H. (1956) 'Wave propagation along an infinite wire above ground at high frequencies', *Proc. Electrotech. J.*, 2, pp. 73–78.

Li, Z. *et al.* (2016) 'Influence of frequency characteristics of soil parameters on ground-return transmission line parameters', *Elec. Power Syst. Research*, 139, pp. 127–132.

Lima, A. C. S. *et al.* (2018) 'Assessment of different formulations for the ground return parameters in modeling overhead lines', *Elec. Power Syst. Research*, 164, pp. 20–30.

Lima, A. C. S. e Portela, C. (2007) 'Inclusion of frequency-dependent soil parameters in transmission-line modeling', *IEEE Trans. Power Del.*, 22(1), pp. 492–499.

Lima, A. C. S. e Tomasevich, M. Y. (2015) 'Numerical Issues in Line Models Based on a Thin Wire Above a Lossy Ground', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 57(3), pp. 555–564.

Moura, R. A. R. *et al.* (2014a) 'Influence of the Soil e Frequency Effects to Evaluate Atmospheric Overvoltages in Overhead Transmission Lines – Part I : The Influence of the Soil in the Transmission Lines Parameters', *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, (June), pp. 15–20.

Moura, R. A. R. *et al.* (2014b) 'Influence of the Soil e Frequency Effects to Evaluate Atmospheric Overvoltages in Overhead Transmission Lines – Part II : The Influence of the Soil in Atmospheric Overvoltages', in *XV International Conference on Atmospheric Electricity*, pp. 15–20.

Pettersson, P. (1999) 'Propagation of waves on a wire above a lossy ground - Different formulations with approximations', *IEEE Trans. Power Del.*, 14(3), pp. 1173–1178.

Portela, C. (1999) 'Measurement e modeling of soil electromagnetic behavior', *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 2, pp. 1004–1009.

Portela, C. M., Tavares, M. C. e Filho, J. P. (2003) 'Accurate representation of soil behaviour for transient studies', *IEE Proceedings: Generation, Transmission e Distribution*, 150(6), pp. 736–744.

Silveira, F. H. *et al.* (2014) 'Lightning-induced voltages over lossy ground: The effect of frequency dependence of electrical parameters of soil', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 56(5), pp. 1129–1136.

Visacro, S. e Silveira, F. H. (2015) 'The Impact of the Frequency Dependence of Soil Parameters on the Lightning Performance of Transmission Lines', *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 57(3), pp. 434–441.

Wedepohl, L. M. e Efthymiadis, A. E. (1978) 'Wave propagation in transmission lines over lossy ground: a new, complete field solution', *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 125(6), p. 505.

Wedepohl, L. M. e Nguyen, H. V. (1996) 'Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using newton-raphson method', *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3), pp. 1538–1546.

Working Group C4.33 (2019) *Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes e on the lightning performance of electrical systems*. CIGRE.