

Estudo Inicial a Respeito de Sobretensões em Linhas de Transmissão Considerando o Efeito da Frequência Sobre os Parâmetros do Solo

Tainá Fernanda Garbelim Pascoalato*
Anderson Ricardo Justo de Araújo** Sérgio Kurokawa*

* Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP, Ilha Solteira, SP Brasil, (e-mails: tfg.pascoalato@unesp.br; sergio.kurokawa@unesp.br).

** Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, UNICAMP, Campinas, SP Brasil, (e-mail: ajaraujo@unicamp.br).

Abstract: In order to compute the electromagnetic transients in power systems adequately, several papers in the literature have proposed different approaches to properly model the ground by its frequency-dependent (FD) soil parameters (conductivity and permittivity). This article presents a brief study on how to simulate electromagnetic transients generated on single-phase transmission line (TL) subjected to slow- and fast-front disturbances. For this analysis, a summary of 8 FD soil models developed in the literature, discussing their conditions and variations, is presented. Then, the formulations of each model are included in the calculation of the longitudinal impedance and the transversal admittance of a certain TL where the impact of the FD soil models are discussed. A comparison between the transient responses obtained with a TL located above a ground considering its frequency-constant electrical parameters with those computed with different FD soil models is carried out. Results indicate that a significant modification on the transient responses characterized by reduced peaks and shifted waveforms is obtained when the FD soil models are considered for the analysis.

Resumo: Para calcular os transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência adequadamente, diversos trabalhos são propostos na literatura para a modelagem do solo com os seus parâmetros elétricos dependentes da frequência (DF) (condutividade e permissividade). Este artigo apresenta um estudo sobre como simular transitórios eletromagnéticos desenvolvidos em linhas de transmissão (LT) monofásicas sujeitas a dois tipos de distúrbios: os de frente lenta (energização) e os de frente rápida (descarga atmosférica). Apresenta-se um resumo de 8 modelos de solo DF desenvolvidos até o momento, discutindo suas aplicabilidades. As formulações de cada modelo são incluídas no cálculo da impedância longitudinal e da admitância transversal de uma LT, discutindo-se o seu impacto nessas respostas. Comparações entre as respostas transitórias obtidas com uma LT sobre um solo considerando seus parâmetros constantes com os resultados obtidos com o solo representado pelos 8 modelos DF são apresentadas. Os resultados indicam que as respostas transitórias computadas com os modelos de solo DF são significativamente modificadas, sendo que suas formas de onda são caracterizadas por picos reduzidos e deslocados em relação às respostas obtidas com o solo com parâmetros constantes.

Keywords: Electromagnetic transient; frequency-dependent soils; transmission lines; ground-return impedance; ground-return admittance.

Palavras-chaves: Transitórios eletromagnéticos; solos dependentes da frequência; linhas de transmissão; impedância de retorno pelo solo; admitância de retorno pelo solo.

1. INTRODUÇÃO

Para uma avaliação precisa dos transitórios eletromagnéticos que ocorrem nos sistemas de energia elétrica, uma modelagem adequada é necessária para cada componente elétrico. Nesse contexto, deve-se considerar que as linhas de transmissão (LT) se localizam acima de solos cujos

* O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processos nº 2020/10141-4 e 2019/01396-1.

parâmetros elétricos são variáveis com a frequência, sendo esse fato significativo para o cômputo dos transitórios gerados por distúrbios de frente lenta e rápida (energizações e descargas atmosféricas) que ocorrem no sistema elétrico.

O solo pode ser considerado como um meio dielétrico e os campos eletromagnéticos que se propagam nele apresentam uma corrente caracterizada por um comportamento divergente, sendo composta por correntes de condução e de deslocamento, cujas densidades são dependentes do campo elétrico incidente no domínio da frequência (Alipio and Visacro, 2014). A influência dos parâmetros elétricos

do solo é mensurada na impedância e na admitância de retorno pelo solo (\mathbf{Z}_{solo} e \mathbf{Y}_{solo}), parâmetros que compõem a impedância longitudinal e a admitância transversal da linha. Os transitórios eletromagnéticos em LT resultam da utilização desses parâmetros. Em grande parte dos programas do tipo EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) que simulam os transitórios eletromagnéticos nos sistemas de potência, o solo tem sido modelado considerando a condutividade constante e negligenciando as correntes de deslocamento pelo solo para todo o espectro de frequência do distúrbio. No entanto, a condutividade (σ) e a permissividade relativa (ε_r) são expressivamente influenciadas pelos fatores ambientais, tais como temperatura e umidade (Salarieh et al., 2020), além de serem variáveis com a frequência (CIGRE C4.33, 2019). Posto isto, diversos pesquisadores desenvolveram modelos durante as últimas décadas a fim de estimar essa variação dos parâmetros do solo em relação à frequência baseados em medições em campo ou laboratório, tais como, Longmire and Smith (1975); Portela (1999); Alipio and Visacro (2014); Datsios and Mikropoulos (2019).

Dessa forma, o objetivo deste artigo é apresentar um estudo para o cálculo dos transitórios eletromagnéticos com os parâmetros do solo DF. Para isso, 8 modelos que calculam os parâmetros do solo (σ e ε_r) variáveis com a frequência são apresentados nesse estudo e incluídos para o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão para um intervalo de 100 Hz a 1 MHz. Em seguida, os transitórios eletromagnéticos decorrentes de uma energização e de uma descarga atmosférica incidente em uma linha de transmissão monofásica localizada sobre um solo modelado com parâmetros elétricos constantes e variáveis com a frequência são calculados. Adicionalmente, um estudo comparativo sobre os parâmetros da linha de transmissão e a resposta transitória empregando os 8 modelos do solo é realizado a fim de se compreender o impacto dessas aproximações nas respostas transitórias de uma LT.

2. PARÂMETROS DA LINHA DE TRANSMISSÃO

A impedância longitudinal de uma LT depende da configuração geométrica dos condutores, dos parâmetros eletromagnéticos do ar e do solo e da frequência angular (ω) do sistema elétrico (Hofmann, 2003). A impedância longitudinal $\mathbf{Z}_{\text{long}}(\omega)$ [Ω/m] da linha corresponde à soma de três componentes, dadas por

$$\mathbf{Z}_{\text{long}}(\omega) = \mathbf{Z}_{\text{int}}(\omega) + \mathbf{Z}_{\text{ext}}(\omega) + \mathbf{Z}_{\text{solo}}(\omega), \quad (1)$$

sendo, ω [rad/s] a frequência angular ($\omega = 2\pi f$), f [Hz] a frequência de operação do sistema, $\mathbf{Z}_{\text{int}}(\omega)$ [Ω/m] a impedância interna, $\mathbf{Z}_{\text{ext}}(\omega)$ [Ω/m] a impedância externa e $\mathbf{Z}_{\text{solo}}(\omega)$ [Ω/m] a impedância de retorno pelo solo. A admitância transversal $\mathbf{Y}_t(\omega)$ [S/m] de uma LT pode ser escrita como

$$\mathbf{Y}_t(\omega) = (\mathbf{Y}_{\text{ext}}^{-1}(\omega) + \mathbf{Y}_{\text{solo}}^{-1}(\omega))^{-1}, \quad (2)$$

sendo, $\mathbf{Y}_{\text{ext}}(\omega)$ [S/m] a admitância externa obtida a partir de um solo condutor perfeito e $\mathbf{Y}_{\text{solo}}(\omega)$ [S/m] a admitância de retorno pelo solo, que é o termo de correção associado a um terreno não perfeitamente condutor. A impedância interna é calculada pelas funções de Bessel (Dommel, 1985), enquanto que a impedância externa e a admitância externa são calculadas pelas equações clássicas da literatura (Martinez-Velasco, 2009). Entretanto, a

maioria das expressões propostas para o cálculo de \mathbf{Z}_{solo} e de \mathbf{Y}_{solo} envolvem integrais infinitas com argumentos complexos que são de resolução complexa como as de Carson (1926) e Nakagawa (1981). Dessa maneira, no intuito de se computar \mathbf{Z}_{solo} e \mathbf{Y}_{solo} , expressões aproximadas na forma-fechada foram propostas na literatura, tais como as de Sunde (1968); Deri et al. (1981); Pettersson (1994, 1999), das quais as utilizadas nesse artigo são a de Sunde (1968) para \mathbf{Z}_{solo} e a de Pettersson (1994) para \mathbf{Y}_{solo} . As expressões de cada grandeza da LT são mostradas na Tabela 1.

Os parâmetros utilizados nas expressões da Tabela 1 são dados por: Z_{cw} [Ω/m] é a impedância da onda do condutor ($Z_{\text{cw}} = \sqrt{j\omega\mu\sigma_c^{-1}}$), r_i [m] é o raio do condutor, γ_c é a constante de propagação do material no condutor ($\gamma_c = \sqrt{j\omega\mu\sigma_c}$), \mathcal{I}_0 e \mathcal{I}_1 representam as funções modificadas de Bessel de primeiro tipo de ordens zero e um. μ [H/m] é a permeabilidade do condutor ($\mu = \mu_r\mu_0$) da qual $\mu_r = 1$ para condutores metálicos e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$). σ_c [S/m] é a condutividade do condutor, h_i [m] é a altura do condutor i em relação ao solo, d_{ij} [m] é a distância do condutor i ao condutor j ($d_{ij} = \sqrt{r_{ij}^2 + (h_j - h_i)^2}$) e D_{ij} [m] é a distância do condutor i a imagem do condutor adjacente j ($D_{ij} = \sqrt{r_{ij}^2 + (h_j + h_i)^2}$). h_j [m] é a altura do condutor j em relação ao solo, r_{ij} [m] é a distância horizontal entre os condutores i e j , γ_{solo} é a constante de propagação do solo ($\gamma_{\text{solo}} = j\omega\mu_0(j\omega\varepsilon_r\varepsilon_0 + \sigma_{\text{solo}})$), ε_r é a permissividade relativa, ε_0 [F/m] é a permissividade do vácuo ($\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$) e σ_{solo} [S/m] é a condutividade do solo. n é o índice de refração do solo ($n = \sqrt{\varepsilon_r + \sigma_{\text{solo}}/(j\omega\varepsilon_0)}$), ($\beta = \gamma_0\sqrt{n^2 - 1}$) e γ_0 é a constante de propagação do vácuo ($\gamma_0 = j\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$).

3. MODELOS DE SOLOS COM PARÂMETROS ELÉTRICOS VARIÁVEIS COM A FREQUÊNCIA

O solo é formado por matéria orgânica e minerais sendo compactado de forma estratificada. Em relação às suas propriedades eletromagnéticas, o solo é caracterizado pela condutividade ($\sigma = 1/\rho$), permissividade relativa (ε_r) e permeabilidade magnética (μ). Na maioria dos estudos de transitórios eletromagnéticos a modelagem do solo é feita levando em consideração que seus parâmetros elétricos são constantes, sendo o valor da condutividade do solo (σ_{solo}) adotado como o medido por instrumentos que usam sinais de baixa frequência. Em relação a permissividade relativa, em alguns softwares tais como o ATP se negligência as correntes de deslocamento pelo solo, enquanto que alguns autores consideram valores constantes entre 10 e 40 de acordo com o teor de umidade (Salarieh et al., 2020). A permeabilidade do solo (μ_{solo}) é praticamente invariável, sendo adotada como aproximadamente a do vácuo ($\mu_{\text{solo}} \approx \mu_0$). Entretanto, sabe-se da literatura científica, que σ_{solo} e ε_r são significativamente afetados por fatores ambientais, assim como pela frequência da onda eletromagnética incidente no solo. Os parâmetros do solo são DF, em razão dos diversos processos de polarização das moléculas do solo tais como: polarizações interfacial, dipolar, atômica e eletrônica, conforme detalhado em Alipio and Visacro

Tabela 1. Expressões para a impedância longitudinal e admitância transversal.

Grandeza	Expressões
Impedância interna	$Z_{\text{int}ii}(\omega) = -\frac{Z_{\text{cw}}}{2\pi r_i} \frac{\mathcal{L}_0(\gamma_c r_i)}{\mathcal{L}_1(\gamma_c r_i)}$
Impedância externa	$Z_{\text{ext}ii}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right)$ $Z_{\text{ext}ij}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{ij}'}{d_{ij}}\right)$
Impedância do solo de Sunde (forma-fechada)	$Z_{\text{solo}ij}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left[\frac{1+\gamma_{\text{solo}}h_i}{\gamma_{\text{solo}}h_i}\right]$ $Z_{\text{solo}ij}(\omega) = j\omega \frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left[\frac{[1+0,5\gamma_{\text{solo}}(h_i+h_j)]^2+(0,5\gamma_{\text{solo}}r_{ij})^2}{[0,5\gamma_{\text{solo}}(h_i+h_j)]^2+(0,5\gamma_{\text{solo}}r_{ij})^2}\right]$
Admitância externa	$\mathbf{Y}_{\text{ext}}(\omega) = j\omega 2\pi\epsilon_0 \mathbf{A}^{-1}$ $A_{ii} = \ln\frac{2h_i}{r_i}; \quad A_{ij} = \ln\frac{D_{ij}'}{d_{ij}}$
Admitância do solo de Pettersson (forma-fechada)	$\mathbf{Y}_{\text{solo}}(\omega) = j\omega[\mathbf{P}_{\text{solo}}(\omega)]^{-1}$ $P_{\text{solo}ii}(\omega) = \frac{1}{(n^2+1)\pi\epsilon_0} \ln\left[1 + \frac{n^2+1}{2h_i\beta}\right]$ $P_{\text{solo}ij}(\omega) = \frac{1}{(n^2+1)\pi\epsilon_0} \ln\frac{\sqrt{((h_i+h_j)+\frac{n^2+1}{\beta})^2+r_{ij}^2}}{\sqrt{(h_i+h_j)^2+r_{ij}^2}}$

(2013). Neste artigo, 8 modelos propostos na literatura são apresentados para estimar os parâmetros do solo.

3.1 Scott (1964, 1966, 1967) - S

O primeiro modelo da literatura científica com expressões para os parâmetros do solo (σ_{solo} e ϵ_r) foi proposto por Scott. O objetivo principal era minimizar os erros relativos a polarização interfacial na medição dos parâmetros do solo. Para isso os autores utilizaram o método com 2 eletrodos para medir a permissividade e a condutividade. As medições foram realizadas em frequências de 100 Hz a 10 MHz usando amostras de rocha e solo contendo variação nas quantidades de umidade. Para a medição da impedância utilizou-se cubas cilíndricas com o auxílio de pontes de capacitores e de resistores. A partir dos resultados obtidos com as medições, correlações estatísticas foram ajustadas por computador para obter equações empíricas para σ_{solo} e ϵ_r (Scott et al., 1964; Scott, 1966; Scott et al., 1967).

3.2 Longmire e Smith (1975) - LS

Longmire e Smith desenvolveram o primeiro modelo semi-teórico da literatura para os parâmetros do solo para frequências que variam de 100 Hz a 200 MHz e o denominaram de modelo universal do solo (Longmire and Smith, 1975). Para realização do modelo os autores reuniram três elementos de outros trabalhos, sendo: (i) método no domínio do tempo para resolver as equações de Maxwell em solos dispersivos de Longmire and Longley (1971); (ii) resultados experimentais de laboratório de Scott et al. (1967); (iii) dados de Wilkenfeld. O método de Longmire e Longley foi utilizado pois era baseado no fato de que um volume unitário de solo poderia ser representado por um circuito de ramos RC. Os dados de Wilkenfeld foram utilizados, pois além de operarem com amostras de concreto e argamassa, se conectavam muito bem com as curvas de Scott, satisfazendo a relação da rede RC. Baseado nesses trabalhos, os autores determinaram analiticamente a admitância complexa da rede RC e relacionaram suas partes reais e imaginárias com a condutividade e permissividade, respectivamente. σ_{solo} e ϵ_r foram determinados de modo a ajustar-se às curvas experimentais obtidas por Scott.

3.3 Messier (1980, 1985) - M

Messier publicou dois trabalhos (Messier, 1980, 1985) com o propósito de apresentar uma solução alternativa de ajuste de curva para os dados de Scott, no entanto, nesse processo, Messier acabou desenvolvendo um modelo empírico para calcular os parâmetros do solo (σ_{solo} e ϵ_r) que abrange a mesma faixa de frequência do modelo S. As expressões que foram propostas necessitam somente de dois parâmetros: ϵ_∞ que é o limite da permissividade relativa em altas frequências e σ_0 que é a condutividade dc em baixas frequências obtida em 100 Hz.

3.4 Visacro e Portela (1987) - VP

Visacro e Portela propuseram expressões para obtenção de σ_{solo} e ϵ_r baseadas em resultados de medições de três tipos de solo (Visacro and Portela, 1987). As medições foram realizadas compactando as amostras de solo em cubas de dois comprimentos, considerando diferentes valores de umidade, variados artificialmente pela adição de água destilada e aplicando tensões senoidais entre as fases condutoras. A impedância foi calculada por meio da amplitude e do defasamento entre a queda de tensão e a corrente resultante dessas medições para 26 frequências entre 40 Hz e 2 MHz. Devido ao fato de que em algumas medições foi detectado um efeito de polarização interfacial, os autores realizaram um procedimento baseado na dedução desse efeito com comparação da medição de amostras de diferentes comprimentos. A partir desse procedimento, a impedância da amostra foi obtida, na qual pode-se calcular σ_{solo} e ϵ_r .

3.5 Portela (1997, 1999, 2000, 2002) - P

O modelo proposto por Portela para os parâmetros do solo é resultante do estudo de quatro trabalhos publicados entre os anos de 1997 e 2002 (Portela, 1997, 1999, 2000, 2002). Nesse modelo, para cada tipo específico de solo foram realizados procedimentos especiais a fim de coletar amostras com a finalidade de que sua estrutura natural e sua umidade fossem preservadas. As medições de 68

amostras em uma faixa de frequência de 100 Hz a 2 MHz foram realizadas em cubas aplicando-se o método de 4 eletrodos. A partir das medições de corrente e da queda de tensão determinaram-se σ_{solo} e ε_r da amostra de solo.

3.6 Visacro e Alípio (2011, 2012) - VA

Dois trabalhos foram desenvolvidos por Visacro e Alípio nos anos de 2011 e 2012 para determinar os parâmetros do solo variáveis com a frequência (Visacro et al., 2011; Visacro and Alípio, 2012). No trabalho de 2011 foi proposta uma metodologia experimental da qual as medições foram realizadas diretamente no campo, enquanto no trabalho de 2012 essa metodologia foi testada em diferentes solos, de onde foram desenvolvidas expressões empíricas para o cálculo de σ_{solo} e ε_r em uma faixa de frequência de 100 Hz a 4 MHz. A metodologia era composta por correntes impulsivas de baixa intensidade com tempos de frente muito curtos que eram impressas em um eletrodo horizontal aterrado em solos de 50 a 9.100 $\Omega \cdot \text{m}$. A partir desse eletrodo eram medidas a corrente impressa, a tensão e a impedância do qual foram derivadas analiticamente os valores de σ_{solo} e ε_r .

3.7 Alípio e Visacro (2014) - AV

Alípio e Visacro propuseram um modelo causal semi-teórico para descrever a dependência da frequência em σ_{solo} e ε_r na faixa de frequência de 100 Hz a 4 MHz (Alípio and Visacro, 2014). O modelo foi desenvolvido a partir das medições em laboratório aplicando dispersão estatística, da qual se baseando nos parâmetros ε_∞ , ξ e $h(\sigma_0)$ três formulações são propostas para níveis distintos de conservadorismo. Adotando esses níveis, levam-se em consideração as potenciais incertezas em relação à estrutura elétrica do solo e a variação da condutividade e permissividade relativa em relação à frequência. Os autores compararam os resultados do modelo proposto aos resultados experimentais do modelo VA, obtendo boa concordância.

3.8 Datsios e Mikropoulos (2019) - DM

Datsios e Mikropoulos propuseram expressões para os parâmetros do solo por meio de medições experimentais de laboratório (Datsios and Mikropoulos, 2019). O modelo proposto utilizou amostras de solos arenosos com conteúdo de água variável usando arranjos protegidos de 2 eletrodos. As medições em amostras secas foram realizadas primeiramente secando as amostras e depois armazenando-as em recipientes herméticos juntamente com dessecantes de sílica gel. As medições em amostras úmidas foram realizadas usando água desionizada de alta pureza variando o conteúdo gravimétrico de água até a saturação. Cinco testes sucessivos para as amostras secas e três testes sucessivos para as amostras úmidas foram realizados com cada solo e os valores médios de σ_{solo} e ε_r foram calculados para uma faixa de frequência de 42 Hz a 1 MHz.

As expressões para o cálculo da condutividade do solo e permissividade relativa (σ_{solo} e ε_r) de cada modelo descrito anteriormente estão listadas na Tabela 2.

Na Tabela 2, σ_{solo} e $\sigma_0 = \text{S/m}$ para os modelos LS, M, VP, P e VA. Para os modelos S e AV σ_{solo} e $\sigma_0 = \text{mS/m}$

e para o modelo DM, σ_{solo} e $\sigma_0 = \mu\text{S/m}$. O parâmetro ε_∞ é igual a 5 no modelo LS, igual a 8 no M e igual a 3,5 no DM. O parâmetro K no modelo DM é igual a $0,537\sigma_0^{0,16}$. No modelo LS, os parâmetros F_i e α_i são encontrados na Tabela 1 em Longmire and Smith (1975). Já no modelo P, os parâmetros $\alpha = 0,706$ e $\Delta_i = 11,71 \text{ mS/m}$. E por fim os parâmetros $\varepsilon_\infty/\varepsilon_0$, $h(\sigma_0)$ e ξ no modelo AV são dados na Figura 8 em Alípio and Visacro (2014).

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

A fim de estudar a performance dos diversos modelos do solo com parâmetros variáveis com a frequência que foram discutidos anteriormente, a impedância e a admitância da linha são calculadas com os parâmetros do solo constantes e DF. Além disso, as respostas transitórias para uma LT submetida a dois tipos de distúrbios (degrau e descarga atmosférica) são investigadas nesta seção. As simulações são realizadas considerando a silhueta da LT monofásica da Figura 1a constituída por um condutor do tipo *Grosbeak* com 0,01021 m de raio, a uma altura de 24,4 m em relação ao solo e comprimento de 1 km. A condutividade do material do condutor é igual a $5,8 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}^{-1}$. A condutividade do solo em baixas frequências é $\sigma_0 = 0,001 \text{ S/m}$. Os resultados são apresentados em uma faixa de frequência compreendida entre 100 Hz e 1 MHz. Os resultados numéricos são divididos em três partes que serão apresentadas a seguir.

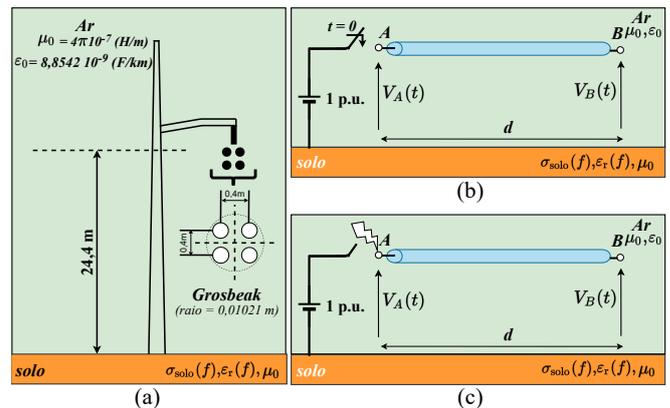


Figura 1. (a) LT monofásica usada nas simulações; (b) Energização por fonte degrau na LT com circuito aberto; (c) Descarga atmosférica incidente na LT com circuito aberto.

As simulações computacionais foram realizadas no software MATLAB cujas configurações do computador são: Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @ 2,40GHz, 2401 Mhz, 2 Núcleo(s), 8,00 GB.

4.1 Impedâncias e admitâncias da linha com parâmetros do solo constantes

Primeiramente, os parâmetros longitudinais e transversais são calculados considerando o solo com uma condutividade e permissividade relativa constantes de $\sigma_{\text{solo}} = 0,001$ e $\varepsilon_r = 1$, respectivamente, para a LT da Figura 1a. Na Figura 2 são mostradas as impedâncias interna e do solo calculadas como mostrado na Tabela 1 e a longitudinal calculada como em (1). Devido ao fato de ser considerado

Tabela 2. Expressões dos modelos de solos com parâmetros elétricos variantes com a frequência.

Modelo	Expressões
S	$\sigma_{\text{solo}}(f) = 10^{K_1}$ $K_1 = 0,028 + 1,098 \log_{10}(\sigma_0) - 0,068 \log_{10}(f) + 0,036 \log_{10}^2(\sigma_0) - 0,046 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_0) + 0,018 \log_{10}^2(f)$ $\varepsilon_r(f) = 10^{D_1}$ $D_1 = 5,491 + 0,946 \log_{10}(\sigma_0) - 1,097 \log_{10}(f) + 0,069 \log_{10}^2(\sigma_0) - 0,114 \log_{10}(f) \log_{10}(\sigma_0) + 0,067 \log_{10}^2(f)$
LS	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 + 2\pi\varepsilon_0 \sum_{i=1}^{13} \alpha_i F_i \frac{(f/F_i)^2}{1+(f/F_i)^2}$ $\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sum_{i=1}^{13} \frac{\alpha_i}{1+(f/F_i)^2}$
M	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 + \sqrt{4\pi f \sigma_0 \varepsilon_\infty \varepsilon_0}$ $\varepsilon_r(f) = \varepsilon_\infty + \sqrt{\frac{\sigma_0 \varepsilon_\infty}{\pi f \varepsilon_0}}$
VP	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 (f/100)^{0,072}$ $\varepsilon_r(f) = 2,34 \times 10^6 \sigma_0^{0,535} f^{-0,597}$
P	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 + \Delta_i \left[\cot\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right) \right] \left(\frac{f}{10^6}\right)^\alpha$ $\varepsilon_r(f) = \Delta_i \left(\frac{f}{10^6}\right)^\alpha \frac{1}{2\pi f \varepsilon_0}$
VA	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 \{1 + [1,2 \times 10^{-6} (1/\sigma_0)^{0,73}] [(f-100)^{0,65}]\}$ $\varepsilon_r(f) = \begin{cases} 7,6 \times 10^3 f^{-0,4} + 1,3 & f \geq 10\text{kHz} \\ 7,6 \times 10^3 (10.000)^{-0,4} + 1,3 & f < 10\text{kHz} \end{cases}$
AV	$\sigma_{\text{solo}}(f) = \sigma_0 + \sigma_0 \times h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}}\right)^\xi$ $\varepsilon_r(f) = \frac{\varepsilon_\infty'}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi\xi/2) \times 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 (1\text{MHz})^\xi} \sigma_0 \times h(\sigma_0) f^{\xi-1}$
DM	$\sigma_{\text{solo}}(f) = f \times 10^{-6} (\sigma_0 + 0,65\sigma_0^{0,43}) + [42 - 42(f-42) \times 10^{-6}] [(\sigma_0/42) - (\sigma_0 + 0,65\sigma_0^{0,43}) \times 10^{-6}]$ $\varepsilon_r(f) = \begin{cases} 1,24\sigma_0^{0,415} \varepsilon_\infty + (3.000/f)^K [4\sigma_0^{0,463} (2,9\varepsilon_\infty - 3,8) - 1,24\sigma_0^{0,415} \varepsilon_\infty] & f \geq 3\text{kHz} \\ 1,24\sigma_0^{0,415} \varepsilon_\infty + 1^K [4\sigma_0^{0,463} (2,9\varepsilon_\infty - 3,8) - 1,24\sigma_0^{0,415} \varepsilon_\infty] & f < 3\text{kHz} \end{cases}$

apenas uma linha monofásica a impedância externa é nula, pois não há a influência das fases vizinhas.

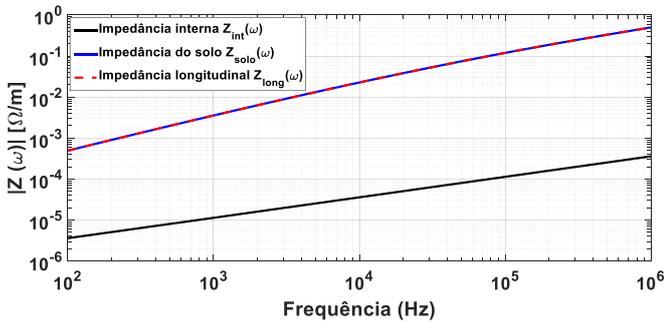


Figura 2. Magnitude das impedâncias da LT da Figura 1.

A impedância longitudinal como pode ser visto na Figura 2 tem as curvas de resposta bem semelhantes a impedância do solo. Isto acontece em consequência da soma da impedância interna e do solo, visto que, a impedância interna tem um valor máximo de aproximadamente $0,3585 \times 10^{-3} \Omega/\text{m}$, enquanto a impedância do solo chega a aproximadamente $0,4966 \Omega/\text{m}$, fazendo com que a impedância do solo tenha maior impacto na impedância longitudinal. A admitância externa e do solo foram simuladas pelas equações encontradas na Tabela 1 e a admitância transversal pela equação em (2) e são mostradas na Figura 3.

As simulações da Figura 3 indicam a semelhança entre as curvas da admitância transversal com a admitância externa, enquanto a curva da admitância do solo em comparação com as demais é superior em toda a faixa de frequência. Isso mostra que o termo de correção dado pela admitância do solo não interfere pronunciadamente no valor final da admitância transversal, afirmando a consideração de muitos autores de que essa admitância pode

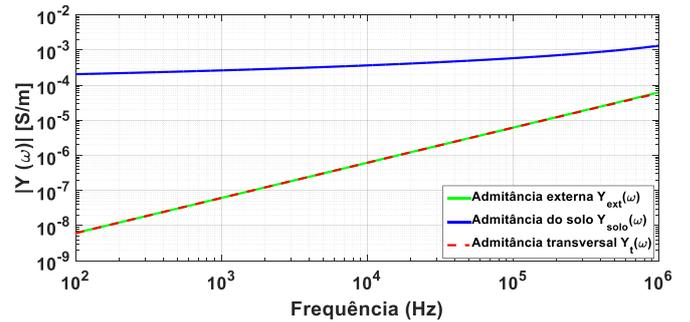


Figura 3. Magnitude das admitâncias da LT da Figura 1.

ser desprezada sem erros significativos para as frequências associadas aos transitórios do sistema de potência (Moura et al., 2014).

4.2 Impedância e admitância da linha com parâmetros do solo DF

A fim de se verificar o comportamento da condutividade do solo $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e da permissividade relativa $\varepsilon_r(f)$ em função da frequência, são considerados os parâmetros da Figura 1a com um solo de $\sigma_0 = 0,001 \text{ S/m}$ representado pelos modelos S, LS, M, VP, P, VA, AV e DM, cujas curvas de $\sigma_{\text{solo}}(f)$, e $\varepsilon_r(f)$ são ilustradas nas Figuras 4 e 5. A faixa de frequência adotada é de 100 Hz a 1 MHz, sendo essa a máxima frequência em comum para todos os 8 modelos. Para o modelo AV foram considerados $h(\sigma_0) = 1,26 \times \sigma_0^{-0,73}$, $\xi = 0,54$ e $\varepsilon_\infty'/\varepsilon_0 = 12$.

Nota-se que $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e $\varepsilon_r(f)$ variam significativamente em função da frequência e há uma divergência pronunciada entre as 8 formulações apresentadas. Para as curvas de $\sigma_{\text{solo}}(f)$ na Figura 4, observa-se que todos os modelos

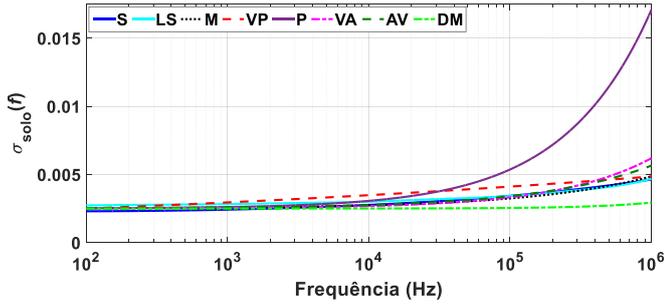


Figura 4. Condutividade do solo $\sigma_{\text{solo}}(f)$.

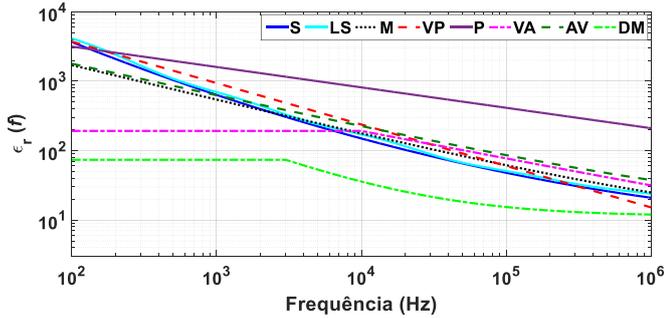


Figura 5. Permissividade relativa $\epsilon_r(f)$ do solo.

apresentam o mesmo perfil no comportamento crescendo com o aumento da frequência. No que concerne à $\epsilon_r(f)$ na Figura 5, seu valor é muito menor em altas frequências do que em baixas, tendendo a valores usuais empregados em estudos de aterramento. Sendo que para as duas figuras os modelos que mais se diferenciam são P e DM. Essas características divergentes entre os modelos vão resultar em distintas impedâncias longitudinais e admitâncias transversais. Dessa maneira, a impedância longitudinal e a admitância transversal com a dependência da frequência nos parâmetros do solo são calculadas levando em consideração as 8 formulações apresentadas. Para isso, no cálculo da impedância do solo e da admitância do solo são consideradas as expressões na forma-fechada de Sunde e Pettersson, respectivamente, em combinação com as 8 formulações de σ_{solo} e ϵ_r . Também é simulada uma curva com os parâmetros do solo constantes (C) $\sigma_{\text{solo}} = 0,001$ e $\epsilon_r = 10$ para critério de comparação, conforme Figuras 6 e 7.

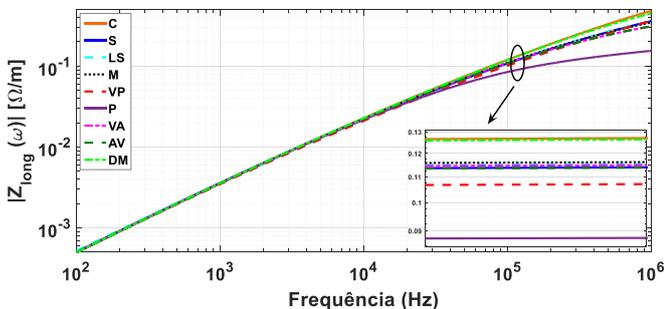


Figura 6. Magnitude da impedância longitudinal com $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e $\epsilon_r(f)$.

As curvas para a impedância longitudinal com os parâmetros do solo DF da Figura 6 são bastante semelhantes as curvas da impedância do solo da Figura 2. Assim como foi mostrado nas simulações para o solo constante, isso se dá

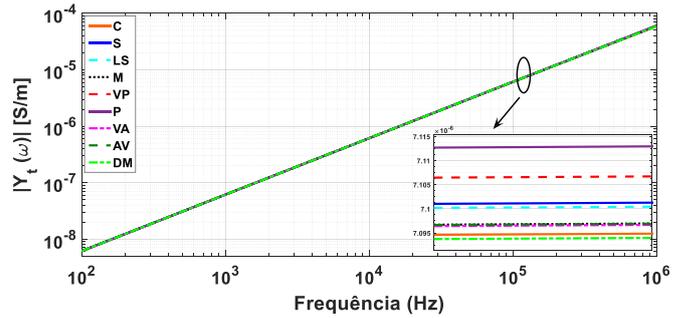


Figura 7. Magnitude da admitância transversal com $\sigma_{\text{solo}}(f)$ e $\epsilon_r(f)$.

peelo fato do valor máximo da impedância interna ser muito menor em comparação ao valor máximo da impedância do solo, fazendo com que a resposta da impedância do solo tenha maior impacto na resposta final da impedância longitudinal, frisando mais uma vez a importância da impedância do solo para os parâmetros da linha. Dentre as 9 curvas as que mais se diferem são P, DM e C. As curvas para a admitância transversal são semelhantes entre todos os modelos considerados e ainda são semelhantes a curva da admitância externa mostrada na Figura 3. Isso confirma o fato da admitância do solo não ter um impacto significativo na resposta final da admitância transversal.

4.3 Cálculo das tensões transitórias

As tensões transitórias são calculadas para a LT da Figura 1a submetida a dois cenários diferentes: (1) Energização da LT por uma fonte de tensão de 1 p.u. aplicada no terminal emissor enquanto o terminal receptor está em aberto, conforme ilustrado na Figura 1b; (2) Uma descarga atmosférica atinge o terminal emissor da LT, cujo terminal receptor está em circuito aberto, conforme ilustrado na Figura 1c. A fonte de tensão é modelada como uma função degrau e a descarga atmosférica é modelada como uma fonte de corrente impulsiva dada pela função Gaussiana (Pascoalato et al., 2021). A metodologia consiste em considerar os parâmetros do solo dependentes da frequência propostos por S, LS, M, VP, P, VA, AV e DM em (1) e (2). Em seguida, calcula-se as tensões transitórias da LT com terminal receptor em aberto a partir das equações hiperbólicas da LT representada por um quadripolo ABCD no domínio da frequência. Todas as respostas são calculadas pelo método da Transformada Numérica Inversa de Laplace (Moreno and Ramirez, 2008), em que a tensão transitória $V_B(t)$ para os dois cenários é representada. Um diagrama mostrando cada etapa para o cálculo das tensões transitórias em uma LT é mostrado na Figura 8.

Dois tipos de solos são considerados. No primeiro tipo, o solo é representado por seus parâmetros constantes ($\sigma_{\text{solo}} = 0,001$ e $\epsilon_r = 10$), sendo a impedância do solo calculada pela equação de Sunde (forma-fechada). No segundo tipo, o solo é representado pelos parâmetros DF, sendo a impedância do solo calculada pela equação de Sunde (forma-fechada) em combinação com as expressões descritas na seção III e organizadas na Tabela 2. A admitância transversal é calculada considerando somente a admitância externa, pois conforme mostrado nas Figuras 3 e 7, o fator de correção dado pela admitância do solo não tem um impacto significativo na admitância

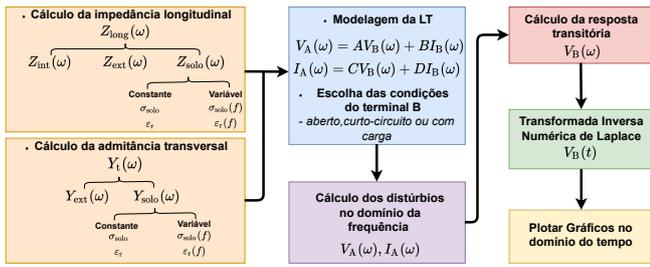


Figura 8. Metodologia para o cálculo das tensões transitórias em uma LT sobre distintos tipos de solo.

transversal. As tensões transitórias no terminal receptor são apresentadas nas Figuras 9 e 10.

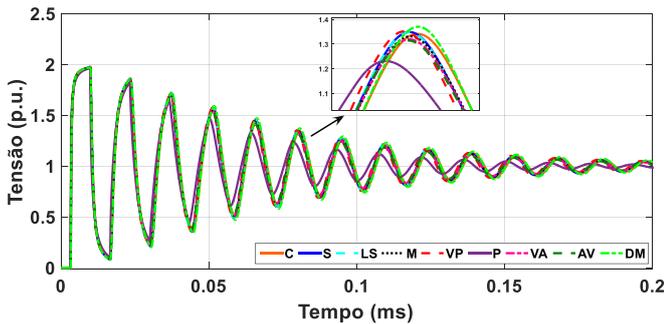


Figura 9. Tensões transitórias no terminal receptor ($V_B(t)$) para o cenário (1).

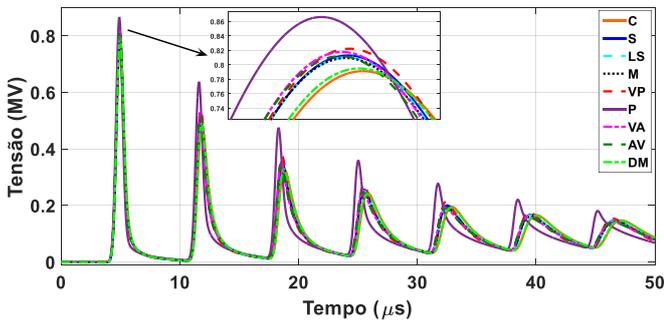


Figura 10. Tensões transitórias no terminal receptor ($V_B(t)$) para o cenário (2).

Pode-se notar que as tensões transitórias da Figura 9 apresentam um comportamento oscilatório amortecido e as da Figura 10 apresentam múltiplos picos devido às reflexões da extremidade receptora aberta. Em ambas as figuras os picos de tensões variam para os diferentes modelos de solo DF, sendo que os modelos que mais se diferem são P, DM e C. Para o modelo P que tem sempre as curvas com a maior diferença das demais, é explicado em CIGRE C4.33 (2019) que esse modelo sofre de falta de confiabilidade nas medições que foram usadas para determinar as constantes α e Δ_i . Já para o modelo DM, as curvas tem as respostas pronunciadas (para mais ou para menos), devido ao fato que o modelo refere-se a solos arenosos, onde os fenômenos de condução são menos marcados (Datsios and Mikropoulos, 2019). Os resultados com o modelo com os parâmetros elétricos constantes (C) representa uma condição mais conservadora, visto que desprezam a corrente de deslocamento no solo, sendo essa aproximação amplamente empregada nos software

de análise de transitórios eletromagnéticos em sistema de potência.

Tais considerações sobre os valores de picos são de fundamental importância para o dimensionamento correto de diversos equipamentos do sistema elétrico, tais como disjuntores, resistores de pré-inserção, cadeia de isoladores e pára-raios de linha de transmissão. Além disso, os deslocamentos entre as formas de onda das respostas transitórias podem afetar também na atuação adequada dos sistemas de proteção. Para as aplicações práticas de engenharia, a brochura CIGRE-781 recomenda que para estudos de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão localizadas sobre solos de resistividade acima de $700 \Omega.m$ que o solo seja representado por parâmetros elétricos variáveis com a frequência em consequência do seu impacto relevante nas respostas transitórias (CIGRE C4.33, 2019).

5. CONCLUSÃO

Um estudo para a simulação de transitórios eletromagnéticos em linhas sobre solos com parâmetros elétricos DF é apresentado neste artigo. Primeiramente, um breve levantamento bibliográfico com os principais modelos de solo com seus parâmetros elétricos variáveis com a frequência é realizado com as respectivas faixas de frequência válidas, sendo suas expressões organizadas em uma tabela.

O solo impacta significativamente a impedância longitudinal, sendo que a impedância do solo é afetada pelo solo com seus parâmetros variáveis com a frequência para frequências acima de 100 kHz. Entretanto, abaixo dessa frequência, todos dos modelos convergem. Já o fator de correção dado pela admitância do solo não interfere de forma significativa na admitância transversal, podendo ser desprezado nas aplicações práticas de engenharia. Nota-se que a condutividade e a permissividade variam de forma pronunciada nas altas frequências, justificando assim a sua importância nos estudos de transitórios para fenômenos de frente lenta e rápida. Assim, a dependência da frequência nos parâmetros do solo é muito importante e impacta nos transitórios de uma linha de transmissão localizada sobre esse tipo de solo. Os modelos P, DM e C apresentaram as variações mais expressivas em comparação aos demais modelos. No modelo P, essas diferenças ocorrem devido às imprecisões nas medições realizadas para se computar os coeficientes α e Δ_i . O modelo DM apresenta as divergências devido ao fato de ser desenvolvido em solos arenosos, caracterizado por altas resistividades. Finalmente, o solo com os parâmetros elétricos constantes representa uma condição mais conservadora nas simulações visto que despreza as correntes de deslocamento do solo, sendo essa aproximação usualmente empregada nos programas de transitórios eletromagnéticos.

Para estudos de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, recomenda-se a inclusão do efeito da frequência nos parâmetros elétricos do solo quando a resistividade for superior a $700 \Omega.m$ devido ao impacto significativo nas respostas transitórias computadas com esses modelos.

REFERÊNCIAS

Alipio, R. and Visacro, S. (2013). Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of

- grounding electrodes. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(1), 132–139.
- Alipio, R. and Visacro, S. (2014). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(5), 1163–1171.
- Carson, J.R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. *The Bell System Technical Journal*, 5(4), 539–554.
- CIGRE C4.33, W.G. (2019). Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems. *Tech. Brochure 781*, 1–66.
- Datsios, Z. and Mikropoulos, P. (2019). Characterization of the frequency dependence of the electrical properties of sandy soil with variable grain size and water content. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 26(3), 904–912.
- Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A., and Castanheira, A. (1981). The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multi-layer earth return. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (8), 3686–3693.
- Dommel, H.W. (1985). Overhead line parameters from handbook formulas and computer programs. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(2), 366–372.
- Hofmann, L. (2003). Series expansions for line series impedances considering different specific resistances, magnetic permeabilities, and dielectric permittivities of conductors, air, and ground. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 564–570.
- Longmire, C.L. and Longley, H.J. (1971). Time domain treatment of media with frequency-dependent electrical parameters. *Mission Research Corporation, Santa Barbara, CA, MRC-N-1, DNA F*, 3167.
- Longmire, C.L. and Smith, K.S. (1975). A universal impedance for soils. Technical report, Santa Barbara, Califórnia.
- Martinez-Velasco, J.A. (2009). *Power system transients: parameter determination*. CRC press, Flórida, U.S.A.
- Messier, M. (1985). Another soil conductivity model. *internal rep., JAYCOR, Santa Barbara, CA*.
- Messier, M. (1980). The propagation of an electromagnetic impulse through soil: Influence of frequency dependent parameters. *Mission Res. Corp., Santa Barbara, CA, USA, Tech. Rep. MRC-N-415*.
- Moreno, P. and Ramirez, A. (2008). Implementation of the numerical laplace transform: A review task force on frequency domain methods for emt studies, working group on modeling and analysis of system transients using digital simulation, general systems subcommittee, IEEE power engineering society. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4), 2599–2609.
- Moura, R.A., Schroeder, M.A., Menezes, P.H., Nascimento, L.C., and Lobato, A.T. (2014). Influence of the soil and frequency effects to evaluate atmospheric overvoltages in overhead transmission line—part 2: The influence of the soil in atmospheric overvoltages. In *Proceedings of XV International Conference on Atmospheric Electricity*, 15–20. Jun, Norman, U.S.A.
- Nakagawa, M. (1981). Admittance correction effects of a single overhead line. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, (3), 1154–1161.
- Pascoalato, T., de Araújo, A., Kurokawa, S., and Pissolato Filho, J. (2021). Analysis of transient voltages and currents in short transmission lines on frequency-dependent soils. *Electric Power Systems Research*, 194, 107103.
- Pettersson, P. (1999). Propagation of waves on a wire above a lossy ground-different formulations with approximations. *IEEE transactions on power delivery*, 14(3), 1173–1180.
- Pettersson, P. (1994). Image representation of wave propagation on wires above, on and under ground. *IEEE transactions on power delivery*, 9(2), 1049–1055.
- Portela, C. (1997). Frequency and transient behavior of grounding systems. i. physical and methodological aspects. In *IEEE 1997, EMC, Austin Style. IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No. 97CH36113)*, 379–384. IEEE.
- Portela, C. (1999). Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility.*, volume 2, 1004–1009. IEEE, Seattle, WA.
- Portela, C. (2000). Statistical aspects of soil electromagnetic behavior in frequency domain. In *Proceedings Ground 2000-International Conference on Grounding and Earthing*, 99–104.
- Portela, C. (2002). Soil electromagnetic behavior in frequency domain and its influence in lightning effects. In *Proc. Ground Int. Conf. Grounding Earthing*, 211–216.
- Salarieh, B., De Silva, H.J., and Kordi, B. (2020). Electromagnetic transient modeling of grounding electrodes buried in frequency dependent soil with variable water content. *Electric Power Systems Research*, 189, 106595.
- Scott, J.H. (1966). *Electrical and magnetic properties of rock and soil*. U. S. Geological Survey, Theoretical Notes, Note 18.
- Scott, J.H., Carroll, R.D., and Cunningham, D.R. (1967). Dielectric constant and electrical conductivity measurements of moist rock: A new laboratory method. *Journal of Geophysical Research*, 72(20), 5101–5115.
- Scott, J., Carroll, R., and Cunningham, D. (1964). Dielectric constant and electrical conductivity of moist rock from laboratory measurements. *US Dept. of interior geological survey technical letter, Special projects-12, August*, 17.
- Sunde, E.D. (1968). *Earth conduction effects in transmission systems*. Dover Publications Inc., New York.
- Visacro, S. and Portela, C. (1987). Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems. In *Symp. High Voltage Eng.*
- Visacro, S. and Alipio, R. (2012). Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 927–935.
- Visacro, S., Alipio, R., Vale, M.H.M., and Pereira, C. (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 53(2), 401–406.