

Análise de parâmetros elétricos de uma linha de transmissão paralela com forte assimetria em seus feixes de condutores

Raphael Batista***, Marcos R. Araújo*

*Graduate Program in Electrical Engineering, UFMG, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil
(marcosraraujo@hotmail.com).

**Federal Institute of Minas Gerais – Betim Campus, R. Itaguaçu 595, 32677-780, Betim, MG, Brazil
(raphael.louro@ifmg.edu.br)

Abstract: This paper shows an evaluation of the main parameters of a parallel transmission line, which presents asymmetrical bundles. A review about the longitudinal impedance and transversal admittance expressions is performed, with focus on ground return feature. Electric parameters as attenuation constant and phase velocity are analysed. The results present similar characteristics with that reported by literature, but the phase velocity at high-frequencies shows a physical incoherence that requires to be studied in the next step of this work.

Resumo: Este trabalho apresenta a avaliação dos principais parâmetros elétricos associados a uma linha de transmissão paralela trifásica com forte assimetria em seus feixes de condutores. Uma revisão das expressões da impedância longitudinal e admitância transversal é realizada, com foco nos aspectos relativos ao retorno da corrente pelo solo. Parâmetros elétricos como a constante de atenuação e velocidade de fase são analisadas ao longo do domínio da frequência. Os resultados apresentados são coerentes com a literatura, mas a velocidade de fase em altas frequências apresenta uma incoerência física que deve ser estudada mais profundamente na continuação do trabalho.

Keywords: Earth-return impedance, electrical parameters, frequency-domain simulation, TEM mode, transmission line modelling.

Palavras-chaves: Impedância de retorno pelo solo, parâmetros elétricos, simulação no domínio da frequência, modo TEM, modelagem de linha de transmissão.

1. INTRODUÇÃO

Os elementos de um sistema elétrico de potência (SEP) possuem grande complexidade de representação, como a implementação de suas características dinâmicas. Dependendo do estudo realizado, simplificações são efetuadas para permitir uma representação do SEP compatível com a precisão exigida pelo engenheiro. Consequentemente, é possível representar partes do SEP, como linhas de transmissão (LT) e seus fenômenos eletromagnéticos associados, por modelos ou parâmetros simplificados, tornando factível sua análise.

É esperado que modelos simplificados e aqueles mais complexos tenham vantagens e desvantagens dependendo da condição em que o SEP é avaliado. Os requisitos da análise devem ser levantados para que haja um compromisso entre o tempo requerido para as simulações e a precisão de suas soluções. Por exemplo, para condições de faltas, um fenômeno de frequência similar à nominal da LT, um modelo simples pode resultar em soluções com boa aproximação, enquanto fenômenos de curta duração de tempo, como descargas atmosféricas, requerem uma representação mais detalhada do sistema em altas frequências, da ordem de MHz.

Trabalhos como Ametani et al. (2014); De Conti & Emidio (2016); De Conti & Alipio (2016); Xue et al. (2018) mostram formas de representar LT para transitórios rápidos e sua resposta no domínio do tempo, mas normalmente se restringe a configurações simples de condutores ou monofásicas. Estudos como Dias et al. (2011); Araújo & Pereira (2017); Batista & Araújo (2018); Araújo & Pereira (2019) consideram o uso de LT com geometrias complexas, seja com forte assimetria nos feixes de condutores ou mesmo a presença de linhas paralelas. Avaliar as características de uma LT em um amplo espectro de frequências é de interesse para a previsão de seu comportamento quanto a fenômenos no domínio do tempo. Além disso, é possível inferir a aplicabilidade limite de modelos mais simples para avaliar certos fenômenos, como chaveamento de linhas, rejeição de carga, surtos originados da incidência direta ou indireta de descargas atmosféricas e tensão de restabelecimento transitória (Martinez-Velasco 2010).

Este trabalho apresenta uma avaliação dos principais parâmetros elétricos associados a uma LT paralela no domínio da frequência. Dados como a constante de atenuação, impedância série por unidade de comprimento (UC) e outros são calculados e comparados com o uso de

diferentes métodos para o cômputo de cada elemento para uma configuração de feixes de condutores complexa.

2. FORMULAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UMA LT AÉREA MONOFÁSICA

2.1 Introdução

As equações do telegrafista são utilizadas para a descrição das ondas de tensão e corrente ao longo de uma LT (Pereira 2015):

$$\frac{\partial V}{\partial x} = -Z' I, \quad (1)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -Y' V, \quad (2)$$

em que os vetores de tensão e corrente, V e I , em um certo ponto da LT, são dependentes das matrizes de impedância longitudinal Z' e admitância transversal Y' por UC, definidos como:

$$Z' = Z'_i + Z'_e + Z'_g, \quad (3)$$

$$Y' = (Y'_e^{-1} + Y'_g^{-1})^{-1}, \quad (4)$$

com Z'_i sendo a impedância interna dos condutores, Z'_e a impedância externa, Z'_g a impedância de retorno pelo solo, Y'_e a admitância externa e Y'_g a admitância de retorno pelo solo (Paul 1994). Todos os parâmetros são variáveis com a frequência e possuem dimensão $n \times n$, em que n é o número total de condutores da LT.

Um modelo representativo da LT pode ser obtido caso os parâmetros que o descreve sejam determinados. O cálculo dos elementos que compõem Z' e Y' são apresentados nas próximas seções. É conveniente explicitar que tais modelos assumem certas simplificações e hipóteses, a citar o modo de propagação quasi-transversoelétrico (quasi-TEM) das ondas ao longo da LT, o que permite a definição de uma capacitância e uma indutância definidas por meio da suposição eletro e magnetostática. Ademais, a suposição de uma LT monofásica adotada nesta seção permite o uso de mais de um condutor por fase, ou seja, elementos mútuos são necessários para o cômputo das matrizes Z' e Y' .

2.2 Impedância interna de condutores cilíndricos

As duas principais expressões para o cálculo de Z'_i em condutores cilíndricos são apresentadas em (Paul 1994; De Conti 2018): uma exata e outra aproximada. A matriz final será do tipo diagonal e apresenta variação com a frequência por meio da velocidade angular $\omega = 2\pi f$, em que f é a frequência nominal.

Por ser a mais precisa e a única utilizada neste trabalho, a expressão exata para condutores fase tubulares e cabos para-raios sólidos é definida como:

$$Z'_{ic,ii} = \frac{1}{2\pi r_{o,ii}} \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \cdot \frac{\left[I_0(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii}) K_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{i,ii}) + I_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{i,ii}) K_0(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii}) \right]}{\left[I_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii}) K_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{i,ii}) - I_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{i,ii}) K_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii}) \right]}, \quad (5)$$

$$Z'_{ip,ii} = \frac{1}{2\pi r_{o,ii}} \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \frac{I_0(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii})}{I_1(\sqrt{j\omega\mu\sigma} r_{o,ii})}, \quad (6)$$

em que $Z'_{ic,ii}$ é a impedância interna do i -ésimo condutor fase e $Z'_{ip,ii}$ do i -ésimo cabo para-raios, $r_{i,ii}$ é o raio interno e $r_{o,ii}$ o raio externo do i -ésimo condutor, σ é a condutividade elétrica do condutor e μ permeabilidade magnética, $I_0(\cdot)$ e $I_1(\cdot)$ são funções de Bessel modificadas de primeira espécie, $K_0(\cdot)$ e $K_1(\cdot)$ são funções de Bessel modificadas de segunda espécie.

2.3 Impedância externa de condutores cilíndricos

A matriz de impedância externa Z'_e é constante com a frequência, sendo função da geometria e posicionamento dos condutores, além das características do meio ao qual a LT está inserida (Pereira 2015). Para estimar Z'_e , o primeiro passo é calcular a matriz L'_e de indutâncias externas por UC, definida pelos elementos $L'_{e,ii}$ de sua diagonal principal e $L'_{e,ij}$ fora desta:

$$L'_{e,ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{2h_i}{r_i} \right), \quad (7)$$

$$L'_{e,ij} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{\sqrt{(h_i + h_j)^2 + (x_i - x_j)^2}}{\sqrt{(h_i - h_j)^2 + (x_i - x_j)^2}} \right), \quad (8)$$

em que h_i e h_j são as alturas referidas ao solo, x_i e x_j as coordenadas horizontais e μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, a qual tem grande similaridade a apresentada no ar.

A última etapa consiste em calcular Z'_e como:

$$Z'_e = j\omega L'_e. \quad (9)$$

2.4 Impedância de retorno pelo solo

Diversos modelos apresentam formas de representar a impedância de retorno pelo solo Z'_g . Neste trabalho, três delas são apresentadas e consideradas: as expressões de Nakagawa, Sunde e Carson.

As expressões de Nakagawa são calculadas por meio dos elementos $Z'_{g,ii}$ da diagonal principal e $Z'_{g,ij}$ de fora desta (Nakagawa 1981; Tomasevich 2015):

$$Z'_{g,ii} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2h_i\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_g^2 + \lambda}} d\lambda, \quad (10)$$

$$\mathbf{Z}'_{g,ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-(h_i+h_j)\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 + \gamma_g^2 + \lambda}} \cos(x_{ij}\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0 [\sigma_g + j\omega(\varepsilon_{rg} - 1)\varepsilon_0]}, \quad (12)$$

em que ε_0 é a permissividade dielétrica do vácuo, ε_{rg} é a permissividade dielétrica relativa, σ_g é a condutividade elétrica do solo, γ_g é a constante de propagação no interior do solo e x_{ij} é a distância horizontal entre condutores.

As expressões de Sunde, de menor generalidade quando comparada às de Nakagawa, são calculadas por (10) e (11), mas considerando γ_g igual a (Sunde 1968):

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0 [\sigma_g + j\omega\varepsilon_{rg}\varepsilon_0]}. \quad (13)$$

Para condições de solo em que a resistividade elétrica é muito baixa e/ou para fenômenos de baixa frequência, a condutividade elétrica do solo tende a ser muito maior que o termo relativo à corrente de deslocamento, ou seja, $\sigma_g \gg \omega\varepsilon_{rg}\varepsilon_0$. Tal suposição é considerada nas equações de Carson, definidas como (Carson 1926):

$$\mathbf{Z}'_{g,ii} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-2h_i\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g + \lambda}} d\lambda, \quad (14)$$

$$\mathbf{Z}'_{g,ij} = \frac{j\omega\mu_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-(h_i+h_j)\lambda}}{\sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_g + \lambda}} \cos(x_{ij}\lambda) d\lambda. \quad (15)$$

Como curiosidade, o programa Alternative Transients Program (ATP) utiliza as equações de Carson para estimar \mathbf{Z}'_g em modelos de LT aérea (Alternative Transients Program 2002). Em ordem de generalidade, as expressões são encabeçadas por Nakagawa, seguidas por Sunde e Carson, nesta ordem.

2.5 Admitância externa

A admitância externa \mathbf{Y}'_e é função da capacitância externa transversal \mathbf{C}'_e e da condutância \mathbf{G}'_e , sendo definida como:

$$\mathbf{Y}'_e = \mathbf{G}'_e + j\omega\mathbf{C}'_e. \quad (16)$$

Para a maioria das condições práticas, como as consideradas neste trabalho, \mathbf{G}'_e pode ser desconsiderado para fenômenos que não envolvam religamento de linhas e energização com cargas aprisionadas (De Conti 2018). Trabalhos como Fernandes et al. (2004) apresentam comparações das soluções para o problema com e sem a inclusão de \mathbf{G}'_e . A matriz \mathbf{G}'_e de condutância é desconsiderada neste trabalho.

Para o cômputo de \mathbf{C}'_e , assume-se o modo de propagação quasi-TEM ao longo da LT e são utilizadas as posições geométricas dos condutores, como feito para \mathbf{L}'_e . De (7) e (8), tem-se que a matriz final será:

$$\mathbf{C}'_e = \mu_0\varepsilon_0\mathbf{L}'_e^{-1}. \quad (17)$$

2.6 Admitância de retorno pelo solo

Este parâmetro não é considerado no ATP e costuma ser estimado pela hipótese de que:

$$\mathbf{Z}'_g\mathbf{Y}'_g \approx \gamma_g^2\mathbf{I}, \quad (18)$$

em que \mathbf{I} é a matriz identidade. Assim, \mathbf{Y}'_g vale:

$$\mathbf{Y}'_g \approx \gamma_g^2\mathbf{Z}'_g^{-1}. \quad (19)$$

A hipótese apresentada em (18) é duvidosa, sendo indicado precaução quanto a seu uso (De Conti 2018). O parâmetro \mathbf{Y}'_g é omitido nesse trabalho, sem perdas significativas para fenômenos que envolvam frequências inferiores a 10 MHz.

3. FORMULAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DE UMA LT AÉREA POLIFÁSICA

Para uma LT polifásica, \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' são descritos de maneira similar a (3) e (4), mas os termos associados aos parâmetros externos possuem expressões mais complexas. Supondo permeabilidades relativas idênticas para o ar e o solo, \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' são definidos como (Tomasevich & Lima 2016):

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [\mathbf{P}' + \mathbf{S}'_i - (\mathbf{S}'_2 + \mathbf{T}')], \quad (20)$$

$$\mathbf{Y}' = j\omega 2\pi\varepsilon_0 (\mathbf{P}' - \mathbf{T}')^{-1}, \quad (21)$$

em que a matriz \mathbf{P}' é composta pelos elementos P'_{ii} internos e P'_{ij} externos à sua diagonal principal:

$$P'_{ii} = \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right), \quad P'_{ij} = \ln\left(\frac{\sqrt{(h_i+h_j)^2 + (x_i-x_j)^2}}{\sqrt{(h_i-h_j)^2 + (x_i-x_j)^2}}\right). \quad (22)$$

As matrizes \mathbf{S}'_1 , \mathbf{S}'_2 e \mathbf{T}' têm elementos calculados como:

$$S'_{1,ij} = 2 \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda(h_i+h_j)}}{\lambda + \bar{u}} \cos((x_i-x_j)\lambda) d\lambda, \quad (23)$$

$$S'_{2,ij} = 2 \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda(h_i+h_j)}}{(\gamma_1/\gamma_2)^2 \lambda + \bar{u}} \cos((x_i-x_j)\lambda) d\lambda, \quad (24)$$

$$T'_{ij} = 2 \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{\bar{u}}{\lambda} \frac{e^{-\lambda(h_i+h_j)/2} - e^{-\lambda(h_i+h_j)}}{(\gamma_1/\gamma_2)^2 \lambda + \bar{u}} \cos((x_i-x_j)\lambda) d\lambda, \quad (25)$$

$$\bar{u} = \sqrt{\lambda^2 - \gamma_1^2 + \gamma_2^2}, \quad \gamma_i = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_i + j\omega\varepsilon_i)}, \quad (26)$$

em que γ_1 é a constante de propagação do ar e γ_2 do solo. A tensão $U_n(x,y)$ de cada condutor da LT vale (Pettersson 1999):

$$\begin{aligned} U_n(x,y) &= - \int_{y'=0}^y E_y(x,y') dy' \\ &= V_n(x, h_n - r_n) - V_n(x, 0) + j\omega \int_{y'=0}^{h_n - r_n} A_y(x,y') dy', \end{aligned} \quad (27)$$

em que E_y é o campo elétrico vertical entre a linha e o solo. Assim, U_n é a soma da diferença de potencial escalar entre a superfície do condutor ao solo e a componente relacionada ao potencial vetor magnético $\mathbf{A}(x,y)$.

Neste trabalho, assume-se que o elemento variável com a frequência e o potencial na superfície do solo são nulos, resultando em U_n igual a:

$$U_n(x, y) \approx V_n(x, h_n - r_n). \quad (28)$$

Assim, (20) e (21) são simplificados a (De Conti 2018):

$$\mathbf{Z}' = \mathbf{Z}'_i + \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} [\mathbf{P}' + \mathbf{S}'_1], \quad (29)$$

$$\mathbf{Y}' = j\omega 2\pi\epsilon_0 (\mathbf{P}' + \mathbf{S}'_2)^{-1}. \quad (30)$$

Neste texto, a matriz \mathbf{S}'_2 relacionada ao retorno pelo solo é desconsiderada, e \mathbf{Y}' se torna função apenas dos coeficientes de potencial de Maxwell, \mathbf{P}' .

Para o cômputo dos elementos da diagonal principal de \mathbf{S}'_1 , assumimos $S'_{1,ii}$ igual a (De Conti 2018):

$$S'_{1,ii} = 2 \int_{\lambda=0}^{\infty} \frac{e^{-2\lambda h}}{\lambda + \sqrt{\lambda^2 + \gamma_2^2}} \cos(r\lambda) d\lambda. \quad (31)$$

4. REDUÇÃO DA DIMENSÃO DAS MATRIZES DE IMPEDÂNCIA LONGITUDINAL E ADMITÂNCIA TRANSVERSAL

4.1 Introdução

A redução da dimensão matricial permite o cômputo total dos valores de tensão e corrente por fase. Tal procedimento também auxilia na eficiência do cálculo, já que a inversão de matrizes de grandes dimensões descritas por LT com muitos condutores tende a aumentar consideravelmente o custo computacional associado a solução numérica do problema.

A seguir, dois procedimentos para a redução da ordem das matrizes de impedância e admitância são apresentados. Os parâmetros que compõem \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' precisam ser construídos na seguinte ordem: para uma LT única, com fases A, B e C, as três primeiras linhas precisam ser os primeiros condutores das fases A, B e C. As outras linhas das matrizes são definidas por todos os outros condutores da fase A, seguido pelos condutores restantes da fase B e C. As matrizes serão completas se os cabos para-raios forem incorporados às últimas linhas de \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' .

Para condições de LT paralelas, a segunda linha é vista como outro conjunto trifásico, como as fases T, S e R, nesta ordem. Ela irá atuar como uma LT hexafásica na montagem das matrizes, isto é, o mesmo procedimento para linha única pode ser seguido.

4.2 Eliminação dos cabos para-raios

A eliminação dos cabos para-raios é possível em situações em que se pode assumir tensões nulas nesses condutores, como em fenômenos de baixa frequência (De Conti 2018). Como ilustrado na Fig. 1, a matriz \mathbf{Z}'_{red} de impedâncias reduzida é dada por Pereira (2015):

$$\mathbf{Z}'_{red} = \mathbf{Z}'_{AA} - \mathbf{Z}'_{AB} \mathbf{Z}'_{BB}^{-1} \mathbf{Z}'_{BA}, \quad (32)$$

em que \mathbf{Z}'_{AA} representa a matriz composta pelos condutores fase, \mathbf{Z}'_{BB} se refere a matriz formada pelos cabos para-raios da LT, e \mathbf{Z}'_{AB} e \mathbf{Z}'_{BA} são os outros elementos que compõem

\mathbf{Z}' . O mesmo procedimento é realizado para \mathbf{P}' , o qual é utilizado como etapa preliminar para determinação de \mathbf{Y}' .

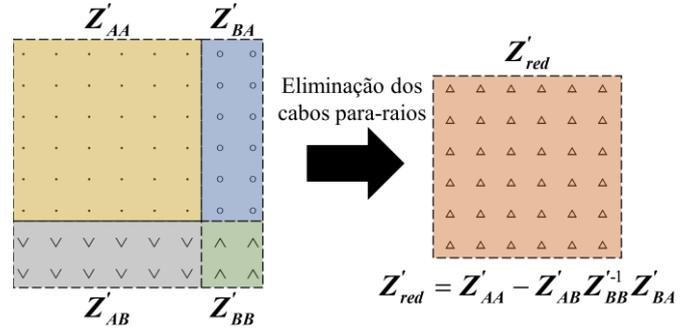


Fig. 1 Ilustração do procedimento de eliminação dos cabos para-raios nas matrizes \mathbf{Z}' e \mathbf{Y}' .

A ordem final de \mathbf{Z}'_{red} será $(n-n_{GW}) \times (n-n_{GW})$, em que n_{GW} é o número de cabos para-raios da LT.

4.3 Agrupamento de condutores

Caso o agrupamento de condutores for realizado, é possível obter as matrizes finais reduzidas de impedância e admitância, $\mathbf{Z}'_{redfinal}$ e $\mathbf{Y}'_{redfinal}$, sendo esta última derivada de $\mathbf{P}'_{redfinal}$. Essas matrizes apresentam ordem $b \times b$, em que b é o número de fases da LT.

O procedimento consiste em subtrair de todas as colunas que correspondem ao condutor de cada fase da coluna correspondente ao primeiro cabo relacionado a mesma fase. Em seguida, as linhas relacionadas aos condutores da fase devem ser subtraídas da linha correspondente ao primeiro condutor da mesma fase (Gómez-Expósito, Conejo & Cañizares 2008). Por exemplo, para a fase A, as colunas de todos os condutores que compõem esta fase são subtraídas do primeiro condutor de A. Em sequência, todas as linhas dos condutores da fase são subtraídas da linha da matriz correspondente ao primeiro condutor da fase A.

O procedimento apresentado resulta em uma condição de contorno similar à eliminação de cabos para-raios, com $\mathbf{Z}'_{redfinal}$ e $\mathbf{Y}'_{redfinal}$ estimadas de maneira equivalente àquela definida em (32).

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Uma LT trifásica paralela, similar a Dias et al. (2011) e ilustrada na Fig. 2, é considerada nesta seção. Quatro cabos para-raios (EHS 3/8") e 12 condutores por fase (Bluejay) são empregados na LT, totalizando 76 condutores. Uma transposição perfeita é admitida para estimar os parâmetros desejados da linha, o que resulta em uma matriz $\mathbf{Z}'_{redfinal}$ final reduzida com elementos Z_m mútuos idênticos. Além disso, os elementos da diagonal principal também se tornam Z_p idênticos.

Uma LT paralela é uma condição interessante de avaliar por conta da existência de elementos mútuos entre os condutores fase do mesmo circuito, denotados por Z_m , e fases entre circuitos diferentes, chamados de Z_{m1} . Como apresentado em

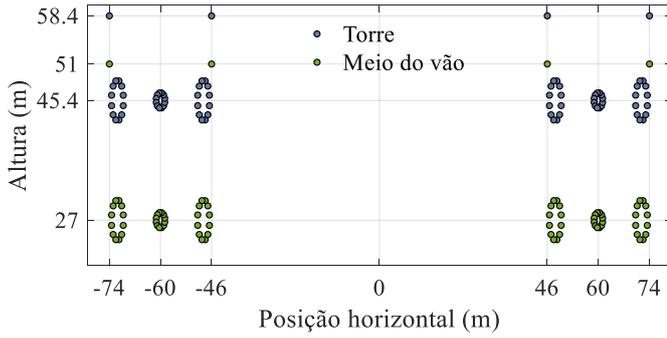


Fig. 2 Posição dos condutores da LT na torre e a meio do vão – adaptada de Dias et al. (2011).

(Kang & Liao 2012), essa condição resulta em um circuito equivalente de seqüência com dois modos: os modos 1 e 2.

As curvas mostradas nas Fig. 3 a 5 ilustram os seguintes parâmetros: constante de atenuação α , Z'_{redfin} e velocidade de fase ν , em que α é a parte real da constante de propagação:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (33)$$

β é a constante de fase e ν é descrita por:

$$\nu = \omega/\beta. \quad (34)$$

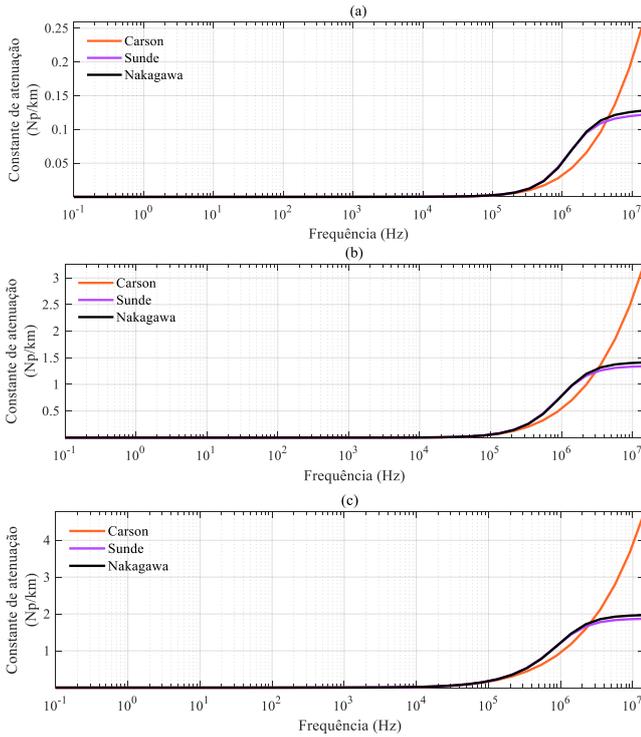


Fig. 3 Constante de atenuação α para (a) seqüência positiva e (b) zero por meio de diferentes expressões para $Z'g$.

Os dados de α e ν são apresentados como parâmetros de seqüência. Como a seqüência negativa apresenta os mesmos valores da positiva, apenas as seqüências positiva e a zero são mostradas nas Fig. 3 e 5. Um solo com $\sigma_g = 1/2000$ S/m e $\epsilon_{rg} = 10$ é suposto nas simulações.

Percebe-se da Fig. 3 que a constante de atenuação por meio das expressões de Carson, Sunde e Nakagawa são

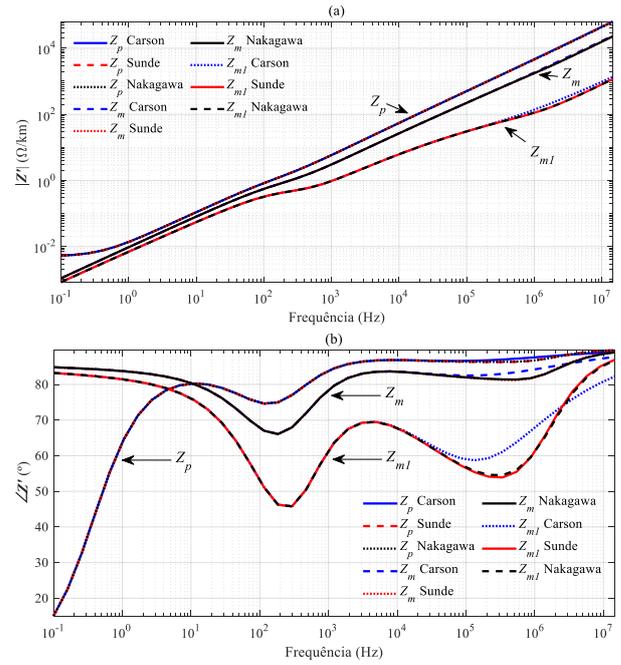


Fig. 4 Elementos Z'_p da diagonal principal e Z'_m e Z'_{ml} mútuos de Z' : (a) magnitude e (b) fase admitindo diferentes expressões para $Z'g$.

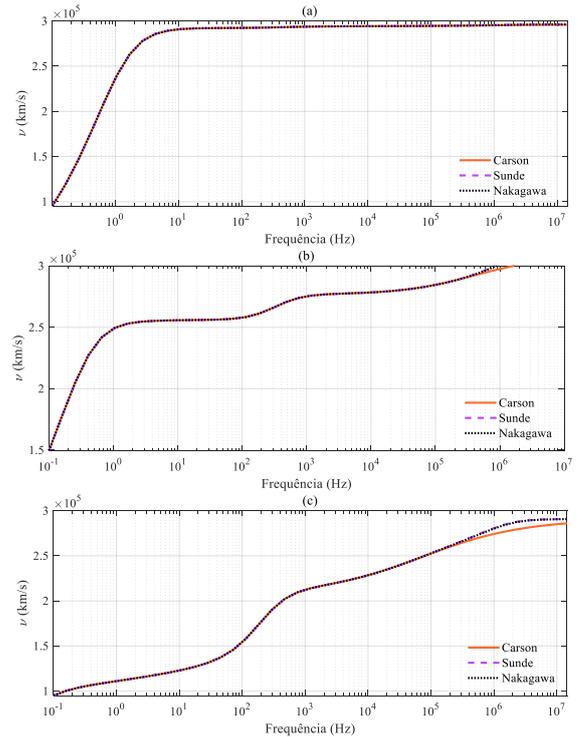


Fig. 5 Velocidade de fase ν para (a) seqüência positiva, (b) modo zero 1 e (c) modo zero 2 considerando diferentes expressões para $Z'g$.

essencialmente as mesmas para a seqüência positiva até 300 kHz, enquanto a seqüência zero apresenta essa característica até 200 kHz. Acima destes valores, a fórmula de Carson diverge das outras e tende a crescer indefinidamente. Sunde e Nakagawa apresentam um valor limite na faixa de MHz utilizada para α por conta do termo associado à corrente de deslocamento, omitida nas expressões de Carson.

Para Z' , a Fig. 4 apresenta praticamente os mesmos valores para cada expressão de Z'_g . Uma divergência das curvas é observada na fase de Z_m e Z_{m1} em altas frequências por conta dos efeitos da corrente de deslocamento admitidos nas expressões de Sunde e Nakagawa.

Por fim, a Fig. 5 apresenta um resultado interessante, em que v supera a velocidade da luz na sequência zero de modo 1 a partir de 1 MHz. Tal velocidade é impossível fisicamente e sugere uma verificação das premissas empregadas por (Kang & Liao 2012), já que é possível que, do ponto de vista matemático, as expressões estejam corretas, mas não impliquem sempre em soluções com senso físico adequado.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a avaliação paramétrica de uma LT paralela trifásica com forte assimetria nos feixes de condutores. Uma revisão das principais expressões para cada parâmetro da LT foi realizada, bem como a apresentação das hipóteses consideradas nas simulações.

O uso de expressões que desconsideram os efeitos associados a corrente de deslocamento para Z'_g , como as fórmulas de Carson, podem alterar significativamente parâmetros como a constante de atenuação, especialmente em altas frequências. Este aspecto é relatado em outros trabalhos e, mesmo com a redução final de matrizes realizada em Z' e Y' , é observada nos parâmetros de sequência positiva e, principalmente, zero.

O resultado mais significativo deste trabalho se relaciona a velocidade de fase obtida para a sequência zero de modo 1 a partir de 1 MHz. Por ser considerada uma LT paralela e com forte assimetria, possíveis inconsistências físicas na formulação dos modos 1 e 2 do circuito PI equivalente tendem a ser evidenciados. A velocidade de fase estimada superior à da luz indica uma fragilidade do ponto de vista físico do procedimento adotado, independente da expressão escolhida para Z'_g . Novos resultados e considerações, como a suposição de parâmetros elétricos do solo variáveis com a frequência, além de uma avaliação mais profunda do problema, serão apresentados em uma versão estendida do estudo ou em um artigo de continuação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Alternative Transients Program. (2002). ATP Rule Book. Trondheim: EMTP Users Group.
- Ametani, A.; Miyamoto, Y.; Baba, Y. and Nagaoka, N. (2014). Wave propagation on an overhead multiconductor in a high-frequency region. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 56 (6); pp. 1638-1648.
- Araújo, M.R. and Pereira, C. (2017). A practical first-zone distance relaying algorithm for long parallel transmission lines. *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 146; pp. 17-24.
- Araújo, M.R. and Pereira, C. (2019). Distance protection algorithm for long parallel transmission lines with no common bus. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 35 (2); pp. 1059-1061.
- Batista, R. and Araújo, M.R. (2018). Linha de transmissão monofásica com forte assimetria entre condutores representada no domínio do tempo a partir de sua matriz de admitância nodal por meio do Vector Fitting. In: *Proc. XVI Conf. Estudos em Eng. Elét.* [Online] Uberlândia: CEEL, pp. 1-6.
- Carson, J.R. (1926). Wave propagation in overhead wires with ground return. *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 5; pp. 539-556.
- De Conti, A.R. (2018). *Aplicações Especiais da Teoria de Linhas de Transmissão*. Notas de aula.
- De Conti, A. and Alipio, R. (2016). Lightning transients on branched distribution lines considering frequency-dependent ground parameters. In: *Proc. 2016 33th International Conference on Lightning Protection*. [Online] Estoril: ICLP, pp. 1-5.
- De Conti, A.R. and Emídio, M.P.S. (2016). Extension of a modal-domain transmission line model to include frequency-dependent ground parameters. *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 138; pp. 120-130.
- Dias, R.; Lima, A.; Portela, C. and Aredes, M. (2011). Extra long-distance bulk power transmission. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 26 (3) ; pp. 17-24.
- Fernandes, A.B.; Neves, W.L.A.; Costa, E.G. and Cavalcanti, M.N. (2004). Transmission line shunt conductance from measurements. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 19 (2); pp. 722-728.
- Gómez-Expósito, A.; Conejo, A.J. and Cañizares, C. (2008). *Electrical energy systems: analysis and operation*. Boca Raton: CRC Press.
- Kang, N. and Liao, Y. (2012). Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines. In: *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*. [Online] San Diego: IEEE PESGM, pp. 1-6.
- Martinez-Velasco, J.A. (2010). *Power system transients: parameter determination*. Boca Raton: CRC Press.
- Nakagawa, M. (1981). Further studies on wave propagation along overhead transmission lines: Effects of admittance correction. *IEEE Trans. App. syst.*, Vol. PAS-100 (7); pp. 3626-3633.
- Paul, C.R. (1994). *Analysis of multiconductor transmission lines*. New York: John Wiley & Sons.
- Pereira, C. (2015). *Redes Elétricas no domínio da frequência*. São Paulo: ArtLiber Editora.
- Pettersson, P. (1999). Propagation of waves on a wire above a lossy ground – different formulations with approximations. *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 14 (3); pp. 1173-1180.
- Sunde, E.D. (1968). *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. New York: Dover.
- Tomasevich, M.M.Y. (2015). *Viability assesment of transmission lines in time and frequency domains*. Rio de Janeiro: UFRJ, D.Sc. thesis.
- Tomasevich, M.M.Y. and Lima, A.C.S. (2016). Impact of frequency-dependent soil parameters in the numerical stability of image approximation-based line models. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 58 (1); pp. 785-794.
- Xue, H.; Ametani, A.; Mahseredjian, J.; Baba, Y.; Rachid, F. and Kocar, I. (2018). Transient responses of overhead cables due to mode transition in high frequencies. *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, Vol. 60 (3); pp. 785-794.