

Modelo a parâmetros concentrados diretamente no domínio do tempo: Aplicação na representação de linhas de transmissão bifásicas

Tainá Fernanda Garbelim Pascoalato*
Pablo Torrez Caballero* Sérgio Kurokawa*

* Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP - Universidade
Estadual Paulista, Avenida Brasil Sul, n 56 - Centro CEP 15385-000
Ilha Solteira, SP Brasil (e-mails: tfgpascoalato@gmail.com,
pablotorrezcaballero@gmail.com, sergio.kurokawa@unesp.br).

Abstract: In this paper we propose a two-phase transmission line model developed directly in the time domain based on the lumped parameter transmission line model. In this model, a two-phase transmission line is represented by a cascade of L coupled circuits. Since the parameters of the transmission line are assumed constant, voltages and currents are obtained in the time domain. Voltages and currents obtained using the proposed model are compared to the voltages and currents obtained with the frequency domain solution of a transmission line transformed to the time domain. Results obtained show that the proposed model is valid for representing two-phase transmission lines without modal transformation matrices.

Resumo: Um modelo de linhas de transmissão bifásicas é desenvolvido diretamente no domínio do tempo com base no método a parâmetros concentrados. Neste modelo, considera-se que uma linha de transmissão bifásica é representada por uma cascata de circuitos L acoplados. Como os parâmetros empregados nessa representação são constantes, é possível obter as correntes e tensões ao longo da linha diretamente no domínio do tempo. As tensões e correntes obtidas com o modelo proposto no domínio do tempo são comparadas com as tensões e correntes obtidas com a solução da linha de transmissão no domínio da frequência transformadas para o domínio do tempo. Os resultados obtidos demonstram que o modelo proposto é válido para linhas de transmissão bifásicas a parâmetros constantes sem a utilização de matrizes de decomposição modal.

Keywords: Two-phase transmission lines; Electromagnetical transients; Time domain; Lumped parameters; cascade of L circuits.

Palavras-chaves: Linhas de transmissão bifásicas; Transitórios eletromagnéticos; Domínio do tempo; Parâmetros concentrados; Cascata de circuitos L .

1. INTRODUÇÃO

A análise dos transitórios eletromagnéticos em uma linha de transmissão (LT) pode ser desenvolvida no domínio do tempo ou da frequência.

As LTs estão inseridas em um sistema de energia elétrica que possui diversos elementos não lineares *e.g.* para-raios Mamis (2003) e efeito Corona Ramírez et al. (2001). A inclusão de elementos não lineares em modelos de LT no domínio da frequência é complexa e muitas vezes impossível. Desse modo, prefere-se modelos de LT desenvolvidos diretamente no domínio do tempo Marti (1988).

Desde 1960, diversos pesquisadores trabalham no desenvolvimento de modelos de LTs voltados para análise de transitórios eletromagnéticos. Um dos primeiros modelos a representar a LT diretamente no domínio do tempo foi desenvolvido por H. W. Dommel Dommel and Meyer (1974). Este modelo baseou-se no método de Bergeron e consiste em combinar o método das características, o método numérico de integração trapezoidal e o método de admitância nodal, resultando em um algoritmo que é capaz de simular transitórios eletromagnéticos em redes cujos parâmetros são concentrados ou distribuídos. Este algoritmo sofreu sucessivas evoluções e está incluído no Eletromagnetic Transients Program (EMTP) Dommel (1996).

Um segundo modelo encontrado na literatura é o que representa a LT multifásica no domínio modal Duesterhoeft et al. (1951). Esse modelo representa uma LT polifásica, decompondo-a nos seus modos de propagação usando uma matriz de transformação modal Wedepohl et al. (1996).

* O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) processo n° 2019/14807-0

Cada modo de propagação é representado por meio dos modelos a parâmetros distribuídos ou a parâmetros concentrados, onde as correntes e tensões ao longo da linha são calculadas. Em seguida, as tensões e correntes são obtidas no domínio das fases utilizando uma matriz de transformação modal inversa.

Outro modelo é o que representa a linha por meio de uma cascata de circuitos L Mamis and Meral (2005), utilizando a definição de variáveis de estado.

Dessa maneira, este artigo propõe, representar um modelo para LT bifásicas genéricas a parâmetros concentrados, considerando seu acoplamento eletromagnético, diretamente no domínio das fases e do tempo, sem o uso de matrizes de transformação modal. Empregando os mesmos conceitos de quando se representa uma linha monofásica por meio de uma cascata de circuitos L , *i.e.*, considerando cada pequeno segmento de linha como um circuito L acoplado. A cascata é solucionada através das suas equações de estado.

2. MODELO PROPOSTO

A representação a parâmetros concentrados aplicada para uma LT monofásica já foi estudada extensivamente na literatura por diversos tipos de circuitos (π , L , etc) Mamis and Meral (2005); Macías et al. (2005); Dommel (1996). Neste trabalho, a mesma ideia é utilizada, porém para reproduzir uma LT bifásica diretamente no domínio do tempo, onde cada pequeno segmento dessa linha, é representado por um par de circuitos L acoplados.

Os circuitos L são descritos pelas suas equações de estado, como segue

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{x} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \quad (1a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x} + \mathbf{D} \mathbf{u}, \quad (1b)$$

sendo \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} e \mathbf{D} as matrizes de estado da LT. \mathbf{x} o vetor de estados constituído das correntes longitudinais e das tensões transversais de cada circuito conectado em cascata. \mathbf{u} são as tensões aplicadas nos terminais emissores da linha. \mathbf{y} é o vetor constituído pelas tensões e correntes de saída.

Para o desenvolvimento do modelo proposto será considerado que a LT bifásica de comprimento d é representada por uma cascata de n pares de circuitos L acoplados. Cada segmento L acoplado é mostrado na Fig. 1.

Na Fig. 1, as resistências R_1 e R_2 e as indutâncias L_1 e L_2 são os parâmetros longitudinais das fases 1 e 2. A capacitância C_1 é o parâmetro transversal da fase 1. Na fase 2 o parâmetro transversal é a capacitância C_2 . Os elementos R_{12} , L_{12} e C_{12} representam o acoplamento entre as fases. Em linhas aéreas de transmissão, a condutância transversal é muito pequena, portanto, o seu efeito é desprezado Martinez et al. (2005).

Os parâmetros longitudinais devem ser calculados levando em consideração os efeitos do solo e pelicular, e a influência do campo magnético externo nos condutores. No que se diz respeito ao acoplamento entre os condutores, os elementos R_{12} e L_{12} são calculados levando em consideração a influência do campo magnético externo nos condutores e o efeito do solo Dommel (1996); Pana and Baloi (2015).

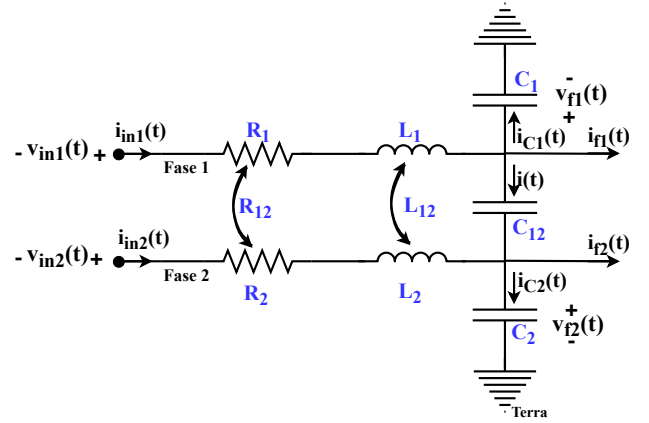


Figura 1. Par de circuito L acoplado.

As quedas de tensão na fase 1 Δv_{11} e na fase 2 Δv_{21} devido às resistências mútuas Schulze et al. (2011) são dadas por

$$\Delta v_{11}(t) = R_{12} i_{21}(t) \quad (2a)$$

$$\Delta v_{21}(t) = R_{12} i_{11}(t). \quad (2b)$$

As tensões nos terminais emissores e receptores das fases 1 e 2 mostradas na Fig. 1 são v_{in1} , v_{in2} , v_{f1} e v_{f2} , respectivamente. As correntes nos terminais emissores das fases 1 e 2 são i_{in1} e i_{in2} e as correntes nos terminais receptores das fases 1 e 2 são i_{f1} e i_{f2} . Dessa maneira, o vetor de entrada \mathbf{u} , o vetor de variáveis de estado \mathbf{x} , e o vetor de saída \mathbf{y} em (1) são dados por

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} v_{in1} \\ v_{in2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{y}^T = [i_{in1} \ i_{in2} \ v_{f1} \ v_{f2} \ i_{f1} \ i_{f2}], \quad (5)$$

sendo

$$\mathbf{x}_1^T = [i_{in1} \ i_{12} \ \dots \ i_{1n} \ i_{in2} \ i_{22} \ \dots \ i_{2n}] \quad (6a)$$

$$\mathbf{x}_2^T = [v_{11} \ v_{12} \ \dots \ v_{f1} \ v_{21} \ v_{22} \ \dots \ v_{f2}]. \quad (6b)$$

O vetor de entrada \mathbf{u} em (3) é $m \times 1$ e contém as fontes de tensão aplicadas nos terminais emissores das fases 1 e 2. O vetor de variáveis de estado \mathbf{x} em (4) é $2mn \times 1$ e contém as correntes e tensões de cada circuito L ao longo da LT bifásica. O vetor de saída \mathbf{y} é $3m \times 1$ em (5) e contém as correntes e tensões de entrada e saída da LT. m é a quantidade de fases da linha, e n é a quantidade de pares de circuitos L em cascata.

A matriz \mathbf{A} é $2mn \times 2mn$ e é constituída por 16 submatrizes quadradas com dimensões $n \times n$. A matriz \mathbf{B} é $2mn \times m$ e é constituída por 4 submatrizes cujas dimensões são $n \times m$. A matriz \mathbf{C} é $3m \times 2mn$ e possui 12 submatrizes com dimensões de $m \times n$. A matriz \mathbf{D} é $3m \times m$ e é nula, pois \mathbf{y} não depende de \mathbf{u} . As matrizes estão dadas por

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \dots & \mathbf{A}_4 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{13} & \dots & \mathbf{A}_{16} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_4 \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \dots & \mathbf{C}_4 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_9 & \dots & \mathbf{C}_{12} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

sendo

$$\mathbf{A}_1 = \text{diag}\{-E\}; \mathbf{A}_2 = \text{diag}\{-F\}; \quad (8)$$

$$\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} -H & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ H & -H & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & H & -H & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & H & -H \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -M & M & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -M & M & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -M & M \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{A}_5 = \text{diag}\{-E'\}; \mathbf{A}_6 = \text{diag}\{-F'\}; \quad (11)$$

$$\mathbf{A}_7 = \begin{bmatrix} H' & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -H' & H' & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -H' & H' & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -H' & H' \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$\mathbf{A}_8 = \begin{bmatrix} -M' & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ M' & -M' & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & M' & -M' & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & M' & -M' \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$\mathbf{A}_9 = \begin{bmatrix} P & -P & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P & -P & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -P \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$\mathbf{A}_{10} = \begin{bmatrix} T & -T & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T & -T & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -T \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\mathbf{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{l1}}P \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{l2}}T \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$\mathbf{A}_{13} = \begin{bmatrix} P' & -P' & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & P' & -P' & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & P' & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -P' \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & P' \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$\mathbf{A}_{14} = \begin{bmatrix} T' & -T' & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & T' & -T' & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & T' & \ddots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & -T' \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & T' \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{15} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{l1}}P' \end{bmatrix}; \mathbf{A}_{16} = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -\frac{1}{R_{l2}}T' \end{bmatrix}; \quad (19)$$

$$\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} H & -M \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} -H' & M' \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

As submatrizes \mathbf{B}_3 e \mathbf{B}_4 são nulas.

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \quad (21)$$

$$\mathbf{C}_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}; \quad (22)$$

$$\mathbf{C}_{11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 1/R_{l1} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 1/R_{l2} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

sendo R_{l1} e R_{l2} as cargas resistivas conectadas aos terminais receptores da LT. As submatrizes \mathbf{C}_3 , \mathbf{C}_4 , \mathbf{C}_5 , \mathbf{C}_6 , \mathbf{C}_9 e \mathbf{C}_{10} são matrizes nulas.

E , E' , F , F' , H , H' , M , M' , P , P' , T e T' em (8) - (20) são dados por

$$\begin{aligned} E &= \frac{L_2 R_1 - L_{12} R_{12}}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; E' = \frac{L_1 R_{12} - L_{12} R_1}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; \\ F &= \frac{L_2 R_{12} - L_{12} R_2}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; F' = \frac{L_1 R_2 - L_{12} R_{12}}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; \\ H &= \frac{L_2}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; H' = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; \\ M &= \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; M' = \frac{L_1}{L_1 L_2 - (L_{12}^2)}; \\ P &= \frac{C_2 + C_{12}}{C_1 C_2 + (C_2 + C_1) C_{12}}; \\ P' &= \frac{C_{12}}{C_1 C_2 + (C_2 + C_1) C_{12}}; \\ T &= \frac{C_{12}}{C_1 C_2 + (C_2 + C_1) C_{12}}; \\ T' &= \frac{C_1 + C_{12}}{C_1 C_2 + (C_2 + C_1) C_{12}}. \end{aligned} \quad (24)$$

Decorrente do sistema de equações de estado (1), são resultadas equações diferenciais, cuja solução pode ser encontrada com o uso de métodos de integração numérica como a regra trapezoidal, método de Heun, ODE 45, Runge-Kutta e outros. Nesse artigo o método de integração adotado foi a regra trapezoidal implícita, pois o sistema de equações de estado em (1) é linear.

3. RESULTADOS

Para a validação do modelo proposto, a LT bifásica de 100 km sem plano de simetria vertical da Fig. 2 é considerada. Cada fase contém 4 condutores *Grosbeak*.

Os parâmetros longitudinais e transversais são calculados a 60 Hz e consideram o efeito do solo e o efeito pelicular

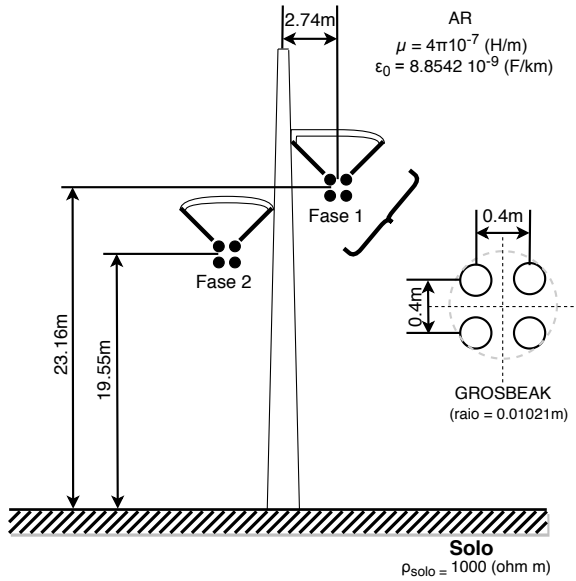


Figura 2. LT bifásica sem plano de simetria vertical.

Marti (1983). O solo considerado é ideal e uniforme. Os parâmetros utilizados são considerados constantes devido a análise realizada ser de baixa frequência. Esses parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros longitudinais e transversais por unidade de comprimento.

Resistência (Ω/km)	Indutância (mH/km)	Capacitância ($\eta F/km$)
R_1 0,0784	L_1 1,9441	C_1 7,6946
R_{12} 0,0582	L_{12} 1,2058	C_{12} 3,9228
R_2 0,0786	L_2 1,9435	C_2 7,7179

Os resultados são obtidos utilizando os seguintes modelos de LT.

Modelo proposto: A LT é representada por 100 pares de circuitos L acoplados conectados em cascata, onde as correntes e tensões ao longo da linha são calculadas diretamente no domínio do tempo, sem utilização de matrizes de transformação.

Modelo a parâmetros concentrados tradicional: A LT bifásica é decomposta em seus dois modos de propagação, os quais se comportam como duas linhas monofásicas desacopladas. Cada linha monofásica é representada por uma cascata de 100 circuitos L tradicional. As correntes e tensões de cada linha monofásica modal são calculadas e convertidas para o domínio das fases utilizando matrizes de transformação modal adequadas Wedepohl et al. (1996). Essas matrizes de transformação modal dependem da frequência, dessa forma as correntes e tensões são calculadas no domínio da frequência, e em seguida, convertidas para o domínio do tempo utilizando a transformada numérica discreta inversa de Laplace (IDNLT) Moreno and Ramirez (2008).

Modelo referência: A LT é decomposta em seus dois modos de propagação. As correntes e tensões de cada modo de propagação são calculadas com o uso das equações dos parâmetros de transmissão para LTs Budner (1970). Assim como no modelo a parâmetros concentrados tradicional, são utilizadas matrizes de transformação para converter

para o domínio das fases, como essas matrizes dependem da frequência, utiliza-se a transformada numérica discreta inversa de Laplace (IDNLT) para converter para o domínio do tempo.

Para analisar o comportamento das correntes e tensões ao longo da LT bifásica, são consideradas as estruturas da Fig. 3, da Fig. 4 e da Fig. 5. Os terminais emissores da fase 1 das LTs da Fig. 3 e da Fig. 4 são conectados no instante $t = 0$ a uma fonte CC de 440 kV e da Fig. 5 a uma fonte senoidal dada por

$$v(t) = v_{in1} \cos(2\pi ft), \quad (25)$$

onde v_{in1} é o valor da tensão de 440 kV, f é a frequência de 60 Hz e t é o tempo de 20 ms.

Os terminais emissores da fase 2 das 3 Figs. estão aterrados. A Fig. 3 tem seus terminais receptores em aberto, a Fig. 4 em curto circuito e a Fig. 5 com cargas de 1000 Ω cada fase.

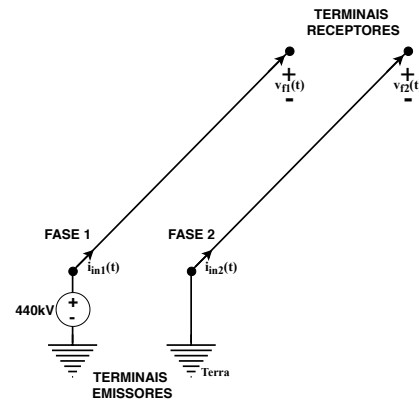


Figura 3. LT bifásica com os terminais receptores em aberto.

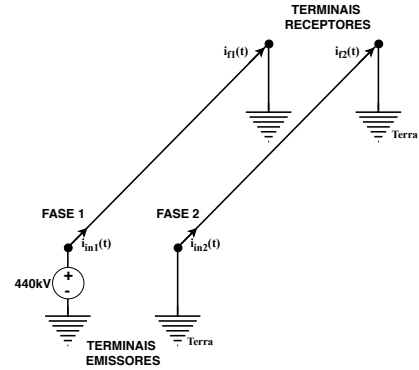


Figura 4. LT bifásica com os terminais receptores em curto circuito.

O comportamento da tensão nos terminais receptores das fases 1 e 2 para a estrutura da linha da Fig. 3 durante condições transitórias é mostrado na Fig. 6 e na Fig. 7, respectivamente.

Na Fig. 8 é indicado o comportamento da corrente no terminal receptor da fase 1 e na Fig. 9 na fase 2, ambas com a estrutura da Fig. 4, em condições transitórias.

As Figs. 10 e 11 mostram o comportamento das tensões das fases 1 e 2 dos terminais receptores em condições transitórias para a estrutura da Fig. 5.

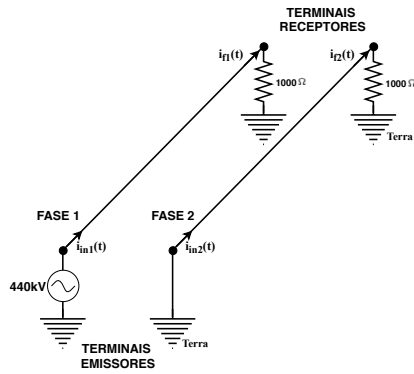


Figura 5. LT bifásica com os terminais receptores com cargas de 1000Ω em cada fase.

As curvas vermelhas exibem os resultados adquiridos com o modelo a parâmetros concentrados tradicional nas fases 1 e 2, as curvas pretas os resultados obtidos com o modelo referência nas fases 1 e 2, e as curvas azuis os resultados obtidos com o modelo proposto nas fases 1 e 2, respectivamente.

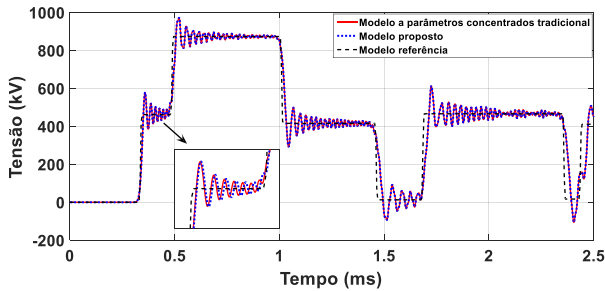


Figura 6. Tensão no terminal receptor da fase 1.

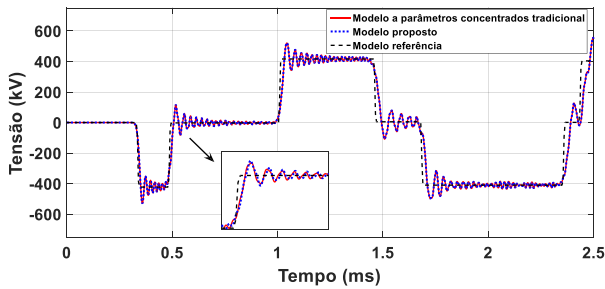


Figura 7. Tensão no terminal receptor da fase 2.

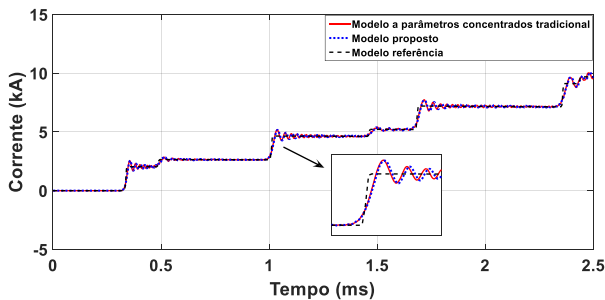


Figura 8. Corrente no terminal receptor da fase 1.

Em todos os casos, as curvas adquiridas tanto por meio do modelo proposto, quanto pelos modelos a parâmetros concentrados tradicional e referência possuem o mesmo

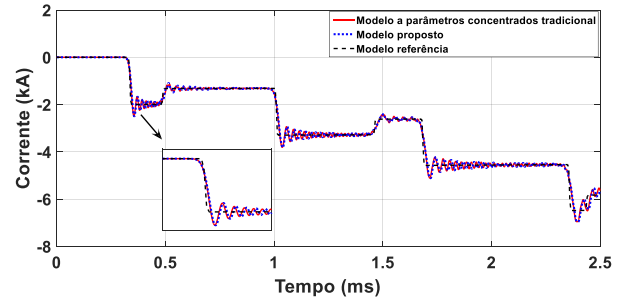


Figura 9. Corrente no terminal receptor da fase 2.

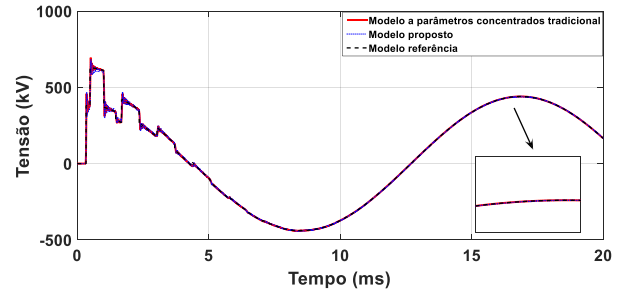


Figura 10. Tensão no terminal receptor da fase 1.

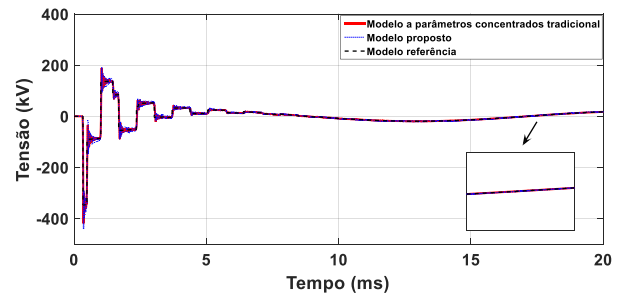


Figura 11. Tensão no terminal receptor da fase 2.

comportamento, *i.e.*, os três modelos possuem a mesma resposta transitória. Os modelos a parâmetros concentrados tradicional e o proposto possuem oscilações espúrias que o modelo referência não possui. Isso ocorre devido a concentração de parâmetros.

As Figs. 10 e 11 mostram que os 3 modelos entram em regime permanente, comprovando que o modelo proposto é estável.

Na Tabela 2 é possível observar o erro comparando o modelo proposto ao modelo a parâmetros concentrados tradicional e ao modelo referência.

Tabela 2. Erro entre os modelos %.

	Referência	Parâmetros concentrados tradicional
Proposto	7.614	2.5

Verifica-se que o erro comparando o modelo proposto aos outros dois modelos não excede 7.614 %, sendo que esse erro é em comparação ao modelo referência, *i.e.*, ao modelo que não possui oscilações. E 2.5 % é em comparação ao modelo a parâmetros concentrados tradicional que também possui oscilações.

Os modelos a parâmetros concentrados tradicional e o modelo de referência fazem o uso da transformada nu-

mérica inversa de Laplace, para transformar os resultados do domínio da frequência para o domínio do tempo. Já o modelo proposto não necessita dessas transformadas, os resultados são obtidos diretamente no domínio do tempo.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi proposto um modelo que faz uma representação de LT bifásicas por meio de parâmetros concentrados diretamente no domínio do tempo e das fases. Esse modelo foi desenvolvido levando em conta que uma LT de comprimento d , pode ser representada por n pares de circuitos L acoplados conectados em cascata.

No modelo proposto, os resultados são obtidos diretamente no domínio do tempo, sem a utilização de transformadas inversas de Fourier ou Laplace. Além disso, nesse modelo não é necessário o desacoplamento das LTs e principalmente das cargas ligadas ao terminal receptor, e a não dependência de matrizes de decomposição modal.

O modelo proposto é descrito pelo sistema de equações de estado ordinárias (ODEs). O sistema de ODEs é resolvido por meio de métodos numéricos de integração. Neste artigo, a regra trapezoidal implícita foi utilizada.

As tensões e correntes obtidas com o modelo proposto foram comparadas com as obtidas com os modelos de referência e a parâmetros concentrados tradicional. O modelo de referência soluciona a LT no domínio da frequência e transforma os resultados para o domínio do tempo utilizando a transformada numérica discreta inversa de Laplace (IDNLT). O modelo a parâmetros concentrados tradicional decompõe a LT nos seus modos de propagação e soluciona cada modo utilizando a cascata a parâmetros concentrados.

O modelo proposto comparado ao modelo a parâmetros concentrados tradicional possui um erro inferior a 2.5% e ao modelo referência a 7.614 %. Sendo que o modelo proposto dispensa a utilização da transformada modal.

Relacionando os resultados do modelo referência aos resultados dos modelos proposto e a parâmetros concentrados tradicional, tem-se que os três dispõem do mesmo comportamento. O que os diferenciam são as oscilações espúrias que aparecem devido a representação em cascata, que foi adotado para solucioná-las.

Dessa maneira, o modelo proposto se torna mais viável e menos complexo, pois obtém resultados satisfatórios sem a necessidade da utilização de transformada modal e/ou transformada inversa de Laplace.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) ao apoio recebido para o desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

Budner, A. (1970). Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients pro-

- gram. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89 (1), 88–97.
- Dommel, H. (1996). *EMTP theory book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia.
- Dommel, H. and Meyer, W. (1974). Computation of electromagnetic transients. *Proceedings of the IEEE*, 62 (7), 983–993.
- Duesterhoeft, W., Schulz, M., and Clarke, E. (1951). Determination of instantaneous currents and voltages by means of alpha, beta, and zero components. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 70 (2), 1248–1255.
- Macías, J., Expósito, A., and Soler, A. (2005). A comparison of techniques for state-space transient analysis of transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (2), 894–903.
- Mamis, M. (2003). Computation of electromagnetic transients on transmission lines with nonlinear components. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 150 (2), 200–204.
- Mamis, M. and Meral, M. (2005). State-space modeling and analysis of fault arcs. *Electric Power Systems Research*, 76, 46–51.
- Marti, L. (1983). Low-order approximation of transmission line parameters for frequency-dependent models. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (3), 1099–1110.
- Marti, L. (1988). Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-102 (11), 3582–3589.
- Martinez, J., Gustavsen, B., and Durbak, D. (2005). Parameter determination for modeling system transients - part i: overhead lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (3), 2038–2044.
- Moreno, P. and Ramirez, A. (2008). Implementation of the numerical laplace transform: A review. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23 (4), 2599–2609.
- Pana, A. and Baloi, A. (2015). Numerical evaluation of the effects of the impedances and admittances asymmetry at a double circuit hvac overhead line. *Proc. Int. Conf. on Computer as a Tool*, 1–7.
- Ramírez, A., Naredo, J., Moreno, P., and Guardado, L. (2001). Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics. *Electric Power and Energy Systems*, 23 (3), 179–188.
- Schulze, R., Schegner, P., and Zivanovic, R. (2011). Parameter identification of unsymmetrical transmission lines using fault records obtained from protective relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2), 1265–1272.
- Wedepohl, L., Nguyen, H., and Irwin, G. (1996). Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using newton-raphson method. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11 (3), 1538–1546.