

Desenvolvimento de um Modelo Direto no Domínio das Fases para Linhas de Transmissão Polifásica

N. V. S. Junior, C. G. Carvalho, S. Kurokawa, E. C. M. Costa, J. Pissolato

Abstract-- This research proposes a new multiconductor transmission line model developed directly in the phase domain based on the two-port representation in the frequency domain. The time-domain simulations are obtained using inverse transforms and convolutions. The model can be applied to model symmetrical and asymmetrical lines, without a vertical symmetry plane, and to simulate electromagnetic transients on unbalanced transmission systems with time-variable elements. The proposed model is validated based on frequency- and time-domain simulations obtained from well-established line models. Several time-domain simulations are carried out to test the proposed line model for fault and unbalanced situations.

Index Terms-- ABCD matrix, electromagnetic transients, frequency-time domain analyses, power systems modeling, transmission lines.

I. NOMENCLATURA

ULM - UNIVERSAL LINE MODEL.

Matlab® - MATrix LABoratory.

II. INTRODUÇÃO

No estudo e desenvolvimento de modelos de linhas de transmissão verifica-se diversas técnicas para simular transitórios eletromagnéticos. No entanto, a maioria desses modelos pode ser dividida em duas categorias principais com base na representação de linha: por parâmetros discretos e por parâmetros distribuídos. A segunda forma de representação da linha é diretamente dos parâmetros distribuídos em função da frequência. A partir dessa abordagem, a modelagem da linha e as simulações são basicamente efetuadas no domínio da

frequência e os resultados do domínio do tempo são obtidos usando transformações inversas [1,2].

Existem dois exemplos de modelos de linha representados por parâmetros distribuídos. O primeiro modelo clássico foi proposto por Budner em 1970 [2]. Este modelo foi desenvolvido no domínio da frequência por representação de quadripolos e as simulações de domínio de tempo são realizadas usando transformações inversas e convoluções [1].

O segundo modelo bem conhecido foi proposto por Morched et al. (1999), nomeado Modelo Linha Universal-ULM. Este modelo pode ser aplicado em linhas aéreas e cabos. Os parâmetros da linha variáveis na frequência são ajustados por uma função racional e os resultados no domínio do tempo são obtidos a partir de convoluções recursivas. A modelagem polifásica é possível a partir da representação modal usando uma matriz de transformação dependente da frequência [3].

A grande vantagem dos modelos da linha utilizando parâmetros distribuídos, em comparação aos modelos de elementos discretos, é a precisão nas simulações de transitórios lentos e rápidos compostos por uma ampla faixa de frequência. Por exemplo, os modelos desenvolvidos diretamente a partir dos parâmetros distribuídos são adequados para simulação de transitórios rápidos e impulsivos, compostos por uma vasta faixa de frequências, e também capazes de simular transitórios decorrentes de manobras na linha, compostos por frequências até 100 Hz.

Por outro lado, a grande limitação dos modelos de linha com parâmetros distribuídos é a modelagem e a inclusão de elementos de tempo variáveis em simulações. A maioria dos fenômenos eletromagnéticos e os componentes de energia em sistemas de transmissão são bem conhecidos no domínio do tempo, no entanto, os mesmos elementos de uma variável de tempo representam uma tarefa complexa, no domínio da frequência. Essa característica limita a aplicação de modelos de linha com parâmetros distribuídos para vários casos envolvendo condições transitórias associados a outros dispositivos de energia [4].

Algumas poucas pesquisas foram propostas até então sobre a inclusão de elementos não lineares, variáveis em função do tempo, na modelagem de linhas de transmissão. Na referência [5], um procedimento é proposto para inclusão de elementos não lineares em linhas de transmissão. Essa técnica é aplicada considerando um modelo de linha representado por parâmetros distribuídos e fazendo uso de transformada inversa de Laplace. Um chaveamento é modelado como condição inicial a partir de uma fonte de corrente enquanto para outros elementos não

Essa pesquisa foi apoiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

N. V. S. Junior - UNESP - Univ. Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil (e-mail: newtonvieirajr@yahoo.com.br).

C. G. Carvalho - FIU - Faculdades Integradas Urubupungá, Pereira Barreto, Brasil (e-mail: carol.gcarvalho@hotmail.com)

S. Kurokawa - UNESP - Univ. Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil (e-mail: kurokawa@dee.feis.unesp.com.br).

E. M. C. Costa - USP - Univ. de São Paulo, São Paulo, Brasil (e-mail: educosta@pea.usp.br).

J. Pissolato - UNICAMP - Univ. Estadual de Campinas, Campinas, Brasil (e-mail: pisso@dsce.fee.unicamp.br).

lineares, uma aproximação linear por partes é proposta para reduzir a inclusão de outros elementos não lineares a uma sequência de chaveamentos [5].

Gómes e Uribe (2009) propuseram um trabalho de revisão sobre a utilização de transformada de Laplace no cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência com elementos lineares e não lineares. Um processo baseado na técnica de sobreposição de incluir elementos não-lineares no domínio da frequência também é descrita em detalhes. No entanto, uma das principais contribuições dadas por Gómez e Uribe (2009), a partir de sua revisão em transformada de Laplace, é o algoritmo computacional apresentado no apêndice final do trabalho, o que torna pública sua rotina computacional para simulação de transitórios eletromagnéticos utilizando transformadas inversas [1].

Recentemente, Costa et al. (2013) publicaram um modelo no domínio da frequência para linhas polifásicas não uniformes excitados por uma descarga atmosférica próxima [6]. O mesmo procedimento proposto na referência [5] é considerado para incluir elementos não lineares no domínio da frequência, também por meio da aproximação linear por partes e com o princípio da sobreposição. A abordagem por aproximação linear por partes apresentaram bons resultados para aplicações específicas, envolvendo elementos variáveis no tempo, no entanto, a questão principal é se o mesmo procedimento pode ser aplicado para muitas outras condições não-lineares, que as linhas de transmissão estão sujeitas.

A partir das descrições anteriores sobre as restrições de modelagem de linha com parâmetros distribuídos, este trabalho propõe um modelo de linha desenvolvido diretamente no domínio das fases a partir da representação de quadripolos para linhas polifásicas. Desse modo, o modelo de linha é apresentado como uma função dos parâmetros longitudinais e transversais, variáveis na frequência, e por meio da matriz ABCD. Essa abordagem é possível a partir da utilização implícita de uma matriz de transformação, variável na frequência, utilizada nas transformações fase-modo-fase.

O modelo proposto pode ser aplicado para simular linhas polifásicas sem um plano de simetria vertical, e também situações assimétricas envolvendo condições desequilibradas de carga, por exemplo: falta fase-fase ou fase-terra e cargas desequilibradas. Simulações considerando condições altamente assimétricas ou desequilibradas não são possíveis para muitos modelos no domínio do tempo e da frequência utilizando uma matriz real e constante. No entanto, a partir da utilização implícita de uma matriz de transformação variável na frequência, o modelo proposto é capaz de simular transitórios eletromagnéticos em condições assimétricas e com graves desequilíbrios em sistemas de transmissão.

Outro atributo do modelo proposto consiste na inclusão e simulação de várias condições não-lineares, por meio da entrada e de saída de vetores (tensões e correntes) associados com a representação da matriz ABCD. Simulações no domínio do tempo e da frequência são efetuadas ao longo deste trabalho, possibilitando uma visão completa e de análise do potencial real deste modelo alternativo para linhas desenvolvido diretamente no domínio de fase.

III. REPRESENTAÇÃO DA LINHA POR UM QUADRIPOLO (MATRIZ ABCD)

Considere, inicialmente, uma linha monofásica com comprimento ℓ , representada como um circuito quadripolo como mostrado na Fig. 1. As tensões nos terminais emissor e receptor são V_A e V_B respectivamente. As correntes nesses terminais são descritos como I_A e I_B .



Figura 1 - Representação de quadripolos.

Para a linha representada na Fig. 1, as correntes e tensões, no domínio da frequência, em ambos os terminais são expressos como [2]:

$$V_A = V_B \cosh(\gamma \ell) - I_B Z_C \sinh(\gamma \ell) \quad (1)$$

$$I_A = V_B \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma \ell) - I_B \cosh(\gamma \ell) \quad (2)$$

Em (1) e (2), γ é a função de propagação da linha e Z_C é a impedância característica [7,8]. Ambos os termos são expressos como uma função dos parâmetros longitudinal e transversal da linha.

As equações (1) e (2) podem ser reescritas sob a forma de matriz:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (3)$$

O conceito de matriz ABCD é primeiramente exemplificado, no presente trabalho, tal como descrito em (3).

Os elementos A, B, C e D são, então, expresso como:

$$A = \cosh(\gamma \ell) \quad (4)$$

$$B = -Z_C \sinh(\gamma \ell) \quad (5)$$

$$C = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma \ell) \quad (6)$$

$$D = -\cosh(\gamma \ell) \quad (7)$$

A representação por um circuito quadripolo está bem estabelecida na literatura técnica. Os modelos de linha no domínio da frequência de Budner (1970) e Snelson (1972) foram desenvolvidos com base na representação de quadripolos para uma linha de transmissão monofásica [2, 9]. No entanto, o modelo de linha polifásico proposto neste trabalho é desenvolvido a partir dos conceitos básicos da representação de quadripolos, o que é ainda mais extrapolado para a representação de linhas de transmissão de n fases.

IV. DESACOPLAMENTO MODAL APLICADO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO POLIFÁSICAS

Para a linha polifásica de n fases, no domínio da frequência, a impedância longitudinal e a admitância transversal, por unidade de comprimento, são escritas, respectivamente, na forma:

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \cdots & z_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{n1} & y_{n2} & \cdots & y_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

As correntes e tensões em ambos os terminais da linha pode ser expressa na forma de vetor para as n fases.

Para calcular as correntes e tensões de fase em ambos os terminais, técnicas de desacoplamentos modais são amplamente utilizadas por muitos modelos da linha [4, 10-14]. A transformação modal consiste em desacoplar as n fases da linha em n modos de propagação totalmente independentes. Esse procedimento pode ser realizado utilizando matrizes de transformação modal variáveis na frequência ou então uma abordagem que utiliza uma matriz real e constante [3, 4, 10-14]. A relação entre a fase e modo é expressa da seguinte forma:

$$[Z_m] = [T_V]^{-1} [Z] ([T_V]^{-1})^t \quad (10)$$

$$[Y_m] = [T_V]^t [Y] [T_V] \quad (11)$$

As matrizes $[Z_m]$ e $[Y_m]$ são, respectivamente, a impedância modal e admitância modal para os n modos de propagação. A matriz $[T_V]$ é uma matriz de transformação variável na da frequência, cujas colunas são autovetores associados aos autovalores do produto matricial $[Z][Y]$. As matrizes $[T_V]^{-1}$ e $[T_V]^t$ são a inversa e a transposta de $[T_V]$, respectivamente. Assim, $[Z_m]$ e $[Y_m]$ são expressas como duas matrizes diagonais [5].

As características de propagação de um modo genérico k são representadas pela impedância modal z_{mk} e admitância modal y_{mk} . Uma vez que o k -ésimo modo de propagação é completamente independente dos outros modos, esse pode ser representado e modelado como uma linha monofásica [4, 11]. Desta forma, o modo de propagação k pode ser representado como um circuito de quadripolos (Fig. 1), onde as correntes e as tensões modais em ambos os terminais são expressos de forma análoga como em (1) e (2):

$$V_{Amk} = V_{Bmk} \cosh(\gamma_{mk} \ell) - I_{Bmk} Z_{Cmk} \sinh(\gamma_{mk} \ell) \quad (12)$$

$$I_{Amk} = V_{Bmk} \frac{1}{Z_{Cmk}} \sinh(\gamma_{mk} \ell) - I_{Bmk} \cosh(\gamma_{mk} \ell) \quad (13)$$

Em (12) e (13), γ_{mk} e Z_{mk} são, respectivamente, a função de propagação e a impedância característica de um modo genérico k . Os termos I_{Amk} e V_{Amk} são as correntes e as tensões no terminal emissor no domínio modal. Os termos I_{Bmk} e V_{Bmk} são as correntes e tensões no terminal receptor no domínio modal. Desde que as correntes e as tensões modais sejam conhecidas, as correntes e tensões de fase podem ser calculadas a partir das seguintes relações [12]:

$$[V] = [T_V] [V_m] \quad (14)$$

$$[I] = [T_V]^t [I_m] \quad (15)$$

A maioria dos modelos de linha citada neste trabalho utiliza o procedimento fase-modo-fase apresentado nesta seção para simular transitórios eletromagnéticos no domínio da frequência. Com base na mesma teoria modal, o modelo proposto neste trabalho será desenvolvido nas seguintes seções.

V. MODELO DE LINHAS POLIFÁSICAS DESENVOLVIDO DIRETAMENTE NO DOMÍNIO DAS FASES

Nesta seção, duas situações são apresentadas: o desenvolvimento no domínio da frequência para a representação polifásica pela matriz ABCD e a aplicação de transformadas inversas para simulações no domínio do tempo.

Inicialmente, a formulação usando a matriz ABCD é estendida para uma representação polifásica diretamente no domínio das fases. Depois disso, as transformações e convoluções inversas são consideradas para se obter as simulações no domínio do tempo a partir da entrada e saída de vetores contendo as correntes e tensões da linha.

A. Representação da matriz ABCD para uma linha polifásica

A partir das equações de quadripolos apresentadas anteriormente em (12) e (13), para um modo genérico k , a mesma formulação pode ser estendida para uma linha de transmissão de n fases com n modos de propagação:

$$[V_{Am}] = [M_1] [V_{Bm}] + [M_2] [I_{Bm}] \quad (16)$$

$$[I_{Am}] = [M_3] [V_{Bm}] + [M_4] [I_{Bm}] \quad (17)$$

Em (16) e (17), as matrizes $[M_1]$, $[M_2]$, $[M_3]$ e $[M_4]$ são dadas por:

$$[M_1] = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{m1} \ell) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_{m2} \ell) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cosh(\gamma_{mn} \ell) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$[M_2] = \begin{bmatrix} -Z_{Cm1} \sinh(\gamma_{m1} \ell) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -Z_{Cm2} \sinh(\gamma_{m2} \ell) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -Z_{Cmn} \sinh(\gamma_{mn} \ell) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[M_3] = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{Cm1}} \sinh(\gamma_{m1} \ell) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{1}{Z_{Cm2}} \sinh(\gamma_{m2} \ell) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{Z_{Cmn}} \sinh(\gamma_{mn} \ell) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$[M_4] = -[M_1] \quad (21)$$

As correntes e tensões, no domínio modal, são obtidas a partir de (16) e (17). Considerando as relações fase-modo mostradas nas equações (14) e (15), fazendo algumas manipulações, tem-se:

$$[V_A] = [T_V][M_1][T_V]^{-1}[V_B] + [T_V][M_2][T_V]^T[I_B] \quad (22)$$

$$[I_A] = [T_V][M_3][T_V]^{-1}[V_B] + [T_V]^{-T}[M_4][T_V]^T[I_B] \quad (23)$$

Em (22) e (23), os vetores de $[V_A]$ e $[I_A]$ são compostos de n elementos, que são as tensões e correntes de fase no terminal emissor de uma linha polifásica, respectivamente. Os termos $[V_B]$ e $[I_B]$ contêm as tensões e correntes de fase no terminal receptor, respectivamente.

Seguindo a mesma linha de representação por um quadripolo, apresentado em (3), as equações no domínio das fases descritas em (22) e (23) são reestruturadas como:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ I_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A] & [B] \\ [C] & [D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_B \\ I_B \end{bmatrix} \quad (24)$$

onde:

$$[A] = [T_V][F_1][T_V]^{-1} \quad (25)$$

$$[B] = [T_V][F_2][T_V]^T \quad (26)$$

$$[C] = [T_V][F_3][T_V]^{-1} \quad (27)$$

$$[D] = [T_V]^{-T}[F_4][T_V]^T \quad (28)$$

Em (24), uma linha de n fase é modelada diretamente no domínio fase baseada na representação por matriz ABCD. As sub-matrizes quadradas representadas por $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$ tem dimensão n enquanto que a matriz ABCD em (23) tem dimensão $2n$.

É importante salientar que a representação da matriz apresentada em (24) é completamente descrita no domínio das fases em função, unicamente, dos parâmetros longitudinais e transversais da linha.

B. Aplicação do modelo proposto para as simulações no domínio da frequência e do tempo

Os resultados no domínio do tempo para o modelo de linha proposto são obtidos utilizando as transformadas de Laplace e convoluções recursivas, a partir de um procedimento semelhante abordado nas referências [1] e [2]. No entanto, o procedimento adaptado para esta pesquisa considera a transformação frequência/tempo para $2n$ equações de correntes e tensões representadas em (24). Enfatizando que, diferentemente do desenvolvimento clássico apresentado por Budner (1970), as expressões individuais em (24) são compostas por parâmetros próprios e mútuos da linha e também de autovalores da matriz de transformação modal $[T_V]$ em (25) - (28). Isto significa que existem $2n$ equações com vários termos dependentes da frequência, o que representa uma aplicação mais complexa do que previamente apresentado pela referência [2].

As simulações no domínio do tempo apresentados neste trabalho são realizadas com base em algumas adaptações na rotina computacional apresentado na referência [1], onde os resultados no domínio do tempo são obtidos exclusivamente a partir das correntes e tensões no domínio da frequência. Assim, os transitórios, no domínio do tempo, são calculados somente a partir dos dados de entrada e de saída representados

pelas correntes e tensões de fase em ambos os terminais da linha, sem o desenvolvimento analítico de cada equação representada em (24).

VI. MODELAGEM DE UMA LINHA POLIFÁSICA NÃO TRANSPOSTA USANDO O MODELO PROPOSTO

Para validar o modelo proposto para uma linha polifásica, foi considerado, como exemplo, uma linha bifásica representada na Fig. 2:

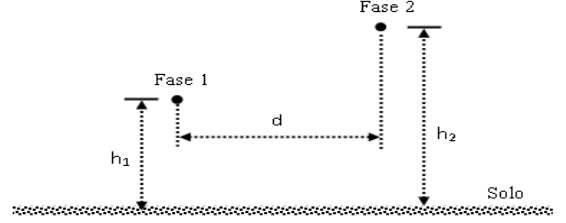


Figura 2. Linha bifásica não transposta

Na Fig. 2, a linha representada é uma linha bifásica não transposta sem plano de simetria vertical, d é a distância entre as fases 1 e 2. Essas características representam as restrições na utilização de vários modelos de linha, especialmente aqueles desenvolvidos diretamente no domínio de tempo [4, 14]. Além disso, se $h_1 = h_2$, o modelo da linha proposto pode ser aplicado para uma ligação HVDC.

As matrizes de impedância e admitância para a linha da Fig. 2 são expressas como:

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{12} & z_{22} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{12} & y_{22} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Uma vez que as matrizes $[Z]$ e $[Y]$, no domínio da frequência, são conhecidas, a matriz de transformação modal é obtida a partir do produto $[Z][Y]$:

$$[Z][Y] = [Q] = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{21} & \beta_{22} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Seguindo o método de desacoplamento modal apresentado na seção 3, os autovalores λ_1 e λ_2 de $[Q]$ são calculados como:

$$\lambda_1 = \frac{(\beta_{11} + \beta_{22}) + \sqrt{(\beta_{11} - \beta_{22})^2 + 4\beta_{12}\beta_{21}}}{2} \quad (32)$$

$$\lambda_2 = \frac{(\beta_{11} + \beta_{22}) - \sqrt{(\beta_{11} - \beta_{22})^2 + 4\beta_{12}\beta_{21}}}{2} \quad (33)$$

Embora os autovalores de uma matriz com $n = 2$ são analiticamente expresso por (32) e (33), os autovalores para $n \geq 2$ podem ser rápida e facilmente obtidos por meio de uma linha de comando única usando o Matlab® ou qualquer outro software semelhante [14]. Calculando os autovalores, a matriz de transformação modal $[T_V]$ pode ser obtida:

$$[T_V] = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde:

$$t_{11} = -\frac{\beta_{12}}{\sqrt{\beta_{12}^2 + (\beta_{11} - \lambda_1)^2}} \quad (35)$$

$$t_{21} = -\frac{\beta_{11} - \lambda_1}{\sqrt{\beta_{12}^2 + (\beta_{11} - \lambda_1)^2}} \quad (36)$$

$$t_{12} = -\frac{\beta_{12}}{\sqrt{\beta_{12}^2 + (\beta_{11} - \lambda_2)^2}} \quad (37)$$

$$t_{22} = \frac{\beta_{11} - \lambda_2}{\sqrt{\beta_{12}^2 + (\beta_{11} - \lambda_2)^2}} \quad (38)$$

Uma vez que a matriz de transformação modal é conhecida, as matrizes modais $[Z_m]$ e $[Y_m]$ pode ser calculadas por (10) e (11). Para o modelo de linha polifásica proposto, as matrizes $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$ são calculadas por (25) - (28) com base nas matrizes $[M_1]$, $[M_2]$, $[M_3]$ e $[M_4]$, (18) - (21), que são obtidos a partir da matriz de transformação modal $[T_v]$.

Assim, a representação da matriz polifásica ABCD em (24) pode ser descrita em detalhes como se segue:

$$\begin{bmatrix} V_{A1} \\ V_{A2} \\ I_{A1} \\ I_{A2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & b_{11} & b_{12} \\ a_{21} & a_{22} & b_{21} & b_{22} \\ c_{11} & c_{12} & d_{11} & d_{12} \\ c_{21} & c_{22} & d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{B1} \\ V_{B2} \\ I_{B1} \\ I_{B2} \end{bmatrix} \quad (39)$$

Em 38, os elementos a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} e d_{ij} são os elementos das sub-matrizes $[A]$, $[B]$, $[C]$ e $[D]$, respectivamente.

Desta forma, a partir de (39), é possível obter as correntes e tensões de fase para a linha mostrada na Fig. 2. O mesmo procedimento apresentado para a representação de uma linha bifásica pode ser facilmente estendido para uma linha de transmissão de n fases com ou sem plano de simetria vertical, para linhas transpostas ou não transpostas.

VII. VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Para avaliar o desempenho do modelo proposto para uma linha polifásica genérica, o sistema bifásico apresentado na Fig. 2 é tomado como exemplo. As alturas h_1 e h_2 são 24 m e 36 m, respectivamente. A distância horizontal entre as duas fases é 9,5 m. A resistividade do solo é de 1000 ohm, m e o comprimento da linha que é de 200 km. Os parâmetros longitudinais e transversais da linha foram calculados levando em consideração os efeitos do solo e pelicular uma faixa de frequências de 0,01 Hz a 1 MHz.

Para analisar o comportamento da linha bifásica, foram considerados o processo de energização da linha e o efeito de uma descarga atmosférica na mesma fase, como mostrado nas Fig. 3 e 4, respectivamente.

A Fig. 3 mostra o processo de energização da linha bifásica considerando uma tensão de 1 p.u aplicado no terminal emissor da fase 1 com o terminal receptor em aberto.

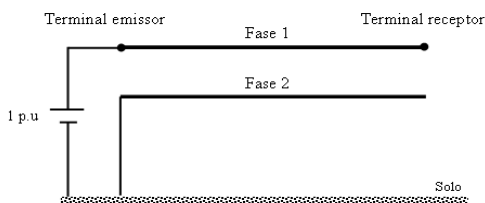


Figura 3. Processo de energização.

Na fig. 4, considerou-se a incidência de uma descarga atmosférica no terminal emissor da fase 1 da linha, considerando o terminal receptor em aberto.

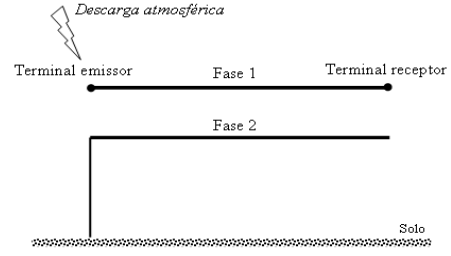


Figura 4. Descarga atmosférica.

C. Resultados no domínio da frequência

A fig. 5 mostra o módulo da corrente no terminal emissor da fase 2 da linha bifásica considerando o processo de energização da linha. A curva 1 representam tensão obtida pelo modelo proposto e a curva 2, o método clássico, descrito na seção 3.

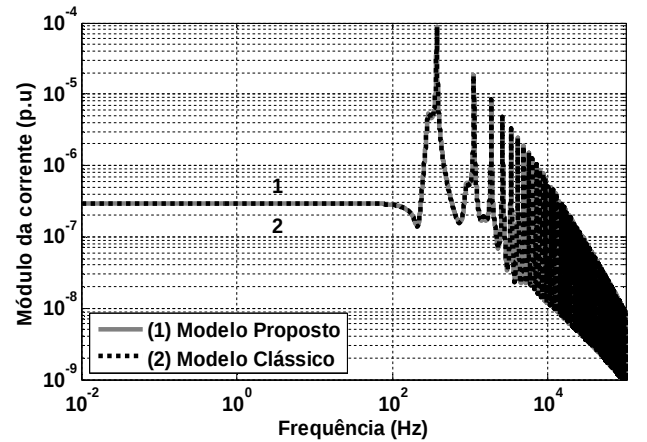


Figura 5. Módulo de corrente no terminal emissor da fase 2.

A Fig. 6 mostra o módulo da tensão no terminal receptor da fase 1 da linha bifásica considerando a incidência de uma descarga atmosférica. A curva 1 representa a corrente obtida pelo modelo proposto e a curva 2, pelo método clássico.

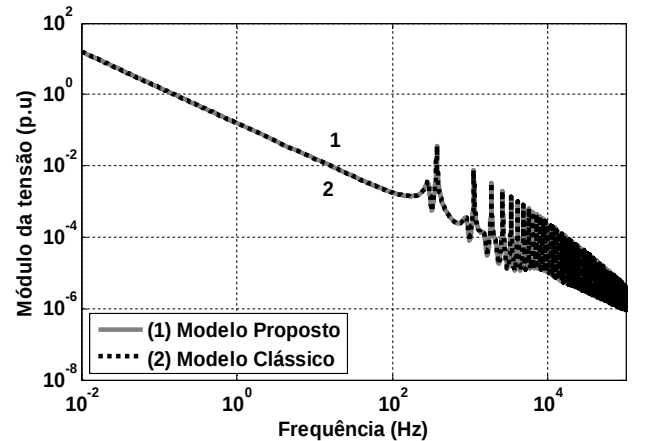


Figura 6. Tensão no terminal receptor da fase 1.

D. Resultados no domínio do tempo

Na Fig. 7, as curvas 1 e 2 mostram a corrente no terminal

receptor da fase 2 da linha. A curva 1 mostra a resposta obtida com o modelo proposto e a curva 2 mostra o resultado obtido com o modelo clássico.

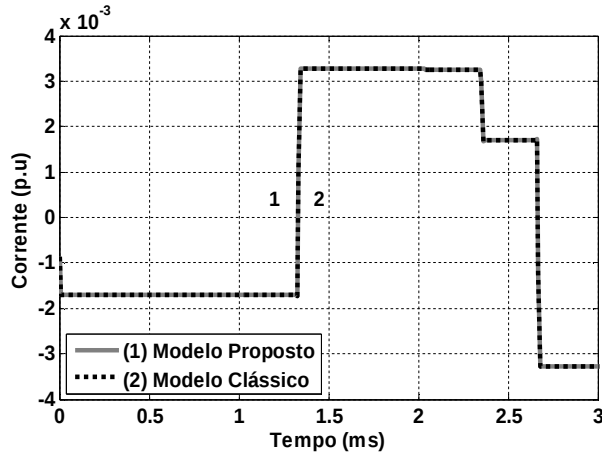


Figura 7. Resposta do degrau unitário da linha no domínio do tempo.

Na Fig. 8, é mostrada a resposta de uma descarga atmosférica no terminal emissor da fase 1. A curva 1 mostra a resposta obtida com o modelo proposto e a curva 2 mostram resultado obtido com o modelo clássico.

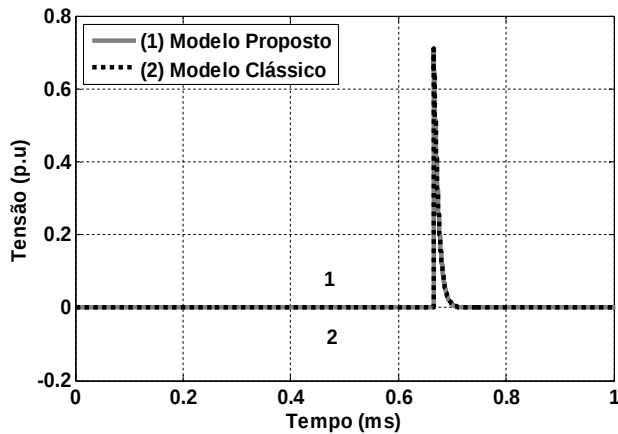


Figura 8. Resposta da descarga atmosférica da linha no domínio do tempo.

Em todos os gráficos, verificou-se que as curvas 1 e 2 têm o mesmo comportamento. Assim, podemos dizer que o modelo desenvolvido no domínio fase (modelo proposto), apresenta resultados idênticos aos resultados obtidos através de um modelo desenvolvido no domínio modal (modelo clássico). Portanto, este modelo pode ser usado para obter as correntes e tensões de linha bifásica diretamente no domínio das fases, sem utilizar o processo de conversão modal.

VIII. CONCLUSÃO

O artigo proposto descreve um modelo de linhas de transmissão polifásicas direto no domínio da fases, fazendo uso da representação por quadripolo e matriz ABCD. A contribuição original do desenvolvimento é representação por quadripolo aplicada a linhas com n fases, com ou sem plano de simetria vertical e capaz de simular transitórios compostos por uma ampla faixa de frequências. Outros atributos do modelo proposto são: simulação de sistemas desbalanceados

(e.g., curto-circuito fase-terra ou entre fases) e diversas condições variáveis em função do tempo (inserção de elementos não lineares na modelagem).

O modelo proposto direto no domínio da fases foi validado com base no modelo clássico fazendo uso de decomposição modal e representação por quadripolo de cada modo de propagação individualmente. O modelo foi validado no domínio da frequência e do tempo levando em conta um degrau unitário e um impulso, dessa forma validando o modelo para uma ampla faixa de frequências. Os resultados obtidos pelos dois modelos são idênticos, validando o modelo proposto sem o uso explícito de transformação modal.

O exemplo adotado na validação do modelo proposto representa um sistema assimétrico com duas fases. No entanto, essa representação pode ser facilmente extrapolada para linhas trifásicas simples ou com circuito duplo, variando apenas a dimensão da matriz ABCD e dos vetores de corrente e tensão nos terminais. Além disso, o modelo possibilita a inserção de diversos elementos não lineares por meio de simples adaptações nos vetores com as tensões e correntes nos terminais da linha.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem grupo GATE - Grupo de Análises de Transitórios Eletromagnéticos - por toda a cumplicidade e colaboração.

REFERÊNCIAS

- [1] F. Rachidi, S. V. Tkachenko. "Electromagnetic field interaction with transmission lines: from classical theory to HF radiation effects", WIT Press, 2008.
- [2] Budner, A. Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program. IEEE Trans. Power App. And Systems, New York, v. PAS-89, n. 1, p. 88-97, jan. 1970.
- [3] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, A. J. Prado, J. Pissolato. "Proposal of an alternative transmission line model for symmetrical and asymmetrical configurations", Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, n. 8, pp.1375-1383, 2011.
- [4] W. Mingli, F. Yu. "Numerical calculations of internal impedance of solid and tubular cylindrical conductors under large parameters". IEE Proc. Gener. Transm. Distrib, vol. 151, n. 1, pp. 67-72, 2004.
- [5] L. M. Wedephol, H. V. Nguyen, G. D. Irwin. "Frequency-dependent transformation matrices for untransposed transmission lines using Newton-Raphson method". IEEE Trans. Power Systems, vol. 11, n. 3, pp. 1538-1546, 1996.
- [6] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, A. J. G. Pinto, B. Kordi, J. Pissolato. "Simplified computational routine to correct the modal decoupling in transmission lines and power systems modeling". IET Science Measur. Tech., vol. 7, pp. 7-15, 2013.
- [7] Marti, L. "Low-order approximation of transmission line parameters for frequency dependent models", IEEE Trans. Power App. and Systems, vol. PAS-102, no 11, pp. 3582 - 3589, nov.1983.
- [8] Chipman, R. A., "Teoria e problemas de linhas de transmissão". Ed. McGraw-Hill from Brazil, São Paulo, 1972
- [9] Snelson, J. K. Propagation of travelling waves on transmission lines: frequency dependent parameters. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, New York, v. PAS-91, n. 1, p. 85-91, 1972.
- [10] H. W. Dommel. "Electromagnetic Transient Program Reference Manual (EMTP theory book)", Vancouver, Canada: Dept. Electrical Engineering, University of British Columbia, 1989.
- [11] P. Gómes, F. A. Uribe, "The numerical Laplace transform: an accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system

devices". *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, n. 2-3, pp.116-123, 2009.

- [12] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi. "A universal model for accurate calculation of electromagnetic transients on overhead lines and underground cables". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1032-1038, 1999.
- [13] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, J. Pissolato, A. J. Prado. "Efficient procedure to evaluate electromagnetic transients on three-phase transmission lines". *IET Gener. Trans. & Distr.*, vol. 4, n. 9, pp. 1069-1081, 2010.
- [14] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, A. A. Shinoda, J. Pissolato. "Digital filtering of oscillations intrinsic to transmission line modeling based on lumped parameters". *Int. Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 44, pp.908-915, 2013.



Newton Vieira de Souza Junior Graduado em Matemática (2007). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, em 2015. Suas pesquisas se concentram na área de transitórios

eletromagnéticos.



Carolina Goulart de Carvalho Graduada em Matemática (2004). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP). Doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (UNESP), Ilha Solteira, São Paulo, Brasil, em 2013. Suas pesquisas se concentram na área de transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia elétrica.



Sérgio Kurokawa é mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia UFU (1994) e doutor pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP (2003). Atualmente é Professor Adjunto no Depto. de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista DEE/FEIS/UNESP. Seus principais temas de pesquisa são: transmissão de energia elétrica e modelagem de sistemas de potência para o estudo de transitórios eletromagnéticos.



Eduardo C. Marques Costa é mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista FEIS/UNESP (2009) e doutor pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP (2013). Atualmente é Professor Doutor no Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PEA/EPUSP. Seus principais temas de pesquisa são: transmissão de energia elétrica, modelagem de sistemas de potência para o estudo de transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.



J. Pissolato Graduado em Engenharia Elétrica (1977). Obteve o título de doutor em Engenharia Elétrica - Université de Toulouse III (Paul Sabatier). Atualmente é professor titular da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas e assessor institucional de relações internacionais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente em: sistemas de potência e técnicas em alta tensão; modelagem computacional de linha de transmissão; transitórios em sistemas de potência, ATP-EMTP, coordenação de isolamento; descargas atmosféricas; coordenação de isolamento, compatibilidade eletromagnética; entre outros.