



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 28  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO X  
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**DESEMPENHO DOS MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO  
NO CÁLCULO DE TENSÕES E CORRENTES INDUZIDAS**

<b>Alécio B. Fernandes*</b>	<b>Antonio C. Siqueira de Lima</b>	<b>Washington L. A. Neves</b>	<b>Roberval M. da Silva</b>
<b>ONS</b>	<b>UFRJ</b>	<b>UFCG</b>	<b>ONS</b>

**RESUMO**

No atual estágio de desenvolvimento, existem essencialmente duas classes de modelos computacionais utilizados para representar linhas de transmissão em estudos de transitórios eletromagnéticos: modelos no domínio modal e no domínio de fases. No presente trabalho, faz-se uso destes modelos para o cálculo de tensões e correntes induzidas em sistemas de transmissão fisicamente próximos. Verifica-se que os modelos modais (convencionais) podem ter precisão limitada para sistemas acoplados devido à proximidade física, enquanto os modelos no domínio de fases produzem resultados mais coerentes com os teoricamente esperados, se mostrando mais precisos. Simulações no domínio do tempo permitem analisar aspectos importantes dos modelos em análise, possibilitando ainda a validação de um modelo no domínio de fases desenvolvido. Analisa-se o desempenho destes modelos sob os aspectos precisão, estabilidade numérica e eficiência computacional.

**PALAVRAS-CHAVE**

Modelos computacionais, Linhas de transmissão, Domínio modal, Domínio de fases, Tensões e correntes induzidas.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Várias ferramentas têm sido usadas ao longo dos anos para estudos de transitórios eletromagnéticos. Devido ao alto grau de complexidade dos sistemas reais, o uso de métodos computacionais é bastante atrativo, mas não é uma tarefa simples.

Dentre as técnicas desenvolvidas para simulação digital de sistemas elétricos, os programas tipo EMTP (*Electromagnetic Transients Program*) têm se destacado, pois permitem uma solução direta no domínio do tempo, possibilitam a consideração de mudanças súbitas na configuração do sistema (como defeitos, abertura e fechamento de disjuntores, etc.) e a consideração de elementos não lineares (1).

Dentre os modelos computacionais disponibilizados nos programas tipo EMTP, as linhas de transmissão se destacam por duas particularidades: seus parâmetros são distribuídos ao longo de sua extensão e apresentam forte dependência da frequência. Devido a estas peculiaridades, as linhas de transmissão podem ser modeladas de diferentes formas, de acordo com a precisão e a eficiência necessárias (1), (2).

Existem essencialmente duas classes de modelos computacionais utilizados para representar linhas de transmissão em estudos de transitórios eletromagnéticos: modelos no domínio modal e modelos no domínio de fases.

\* Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS  
Núcleo Norte/Nordeste - Rua 15 de Março, 50, Sala A 205, Torrões – 50761-901, Recife, PE, Brasil  
Tel.: (81) 3227-8941 - Fax: (81) 3227-8909 - e-mail: alecio@ons.org.br

No presente trabalho, apresenta-se o estado da arte sobre modelos de linhas de transmissão no domínio de fases. Tem-se como enfoque os modelos de linhas de transmissão no domínio de fases disponibilizados pelos programas tipo EMTP, e um modelo desenvolvido em um trabalho de doutorado, por um dos autores (2).

Na apresentação do modelo desenvolvido, destacam-se as principais contribuições, enfatizando as características que garantem, teoricamente, maior precisão e eficiência computacional.

Utilizando os programas ATP (*Alternative Transients Program*) e PSCAD/EMTDC, apresentam-se situações nas quais os modelos modais (convencionais) se mostram limitados em precisão.

Analisa-se o desempenho dos referidos modelos no cálculo de tensões e correntes induzidas em sistemas de transmissão fisicamente próximos, frente a situações transitórias e em regime permanente.

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que os modelos modais podem ter precisão limitada para determinadas configurações, a depender da situação transitória em consideração.

Especificamente no cálculo de tensões e correntes induzidas em linhas de transmissão fisicamente próximas, os modelos no domínio de fases produzem resultados coerentes com os teoricamente esperados, se mostrando mais precisos que os modelos convencionais.

Simulações no domínio do tempo permitem analisar aspectos importantes dos modelos citados, possibilitando ainda a validação do modelo proposto.

## 2.0 - MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Devido às suas particularidades, as linhas de transmissão podem ser modeladas de diferentes formas, de acordo com a precisão e a eficiência necessárias.

Quanto à natureza distribuída de seus parâmetros, as linhas de transmissão podem ser representadas por modelos a parâmetros concentrados ou a parâmetros distribuídos, nos quais a natureza distribuída dos parâmetros é levada em consideração, modelando com maior precisão o fenômeno da propagação de ondas.

Quanto à dependência de seus parâmetros com a frequência, distinguem-se duas classes de modelos de linhas de transmissão: modelos a parâmetros constantes na frequência e a parâmetros dependentes da frequência, nos quais se consideram os efeitos da frequência sobre os parâmetros.

Linhas de transmissão polifásicas, podem ainda ser modeladas no domínio modal ou no domínio de fases. Os modelos modais fazem uso da técnica da transformação modal (3). Através do cálculo de autovalores e autovetores das matrizes que caracterizam a linha, as  $n$  fases de uma linha polifásica podem ser desacopladas em  $n$  linhas monofásicas independentes (1), (4).

Os modelos modais, propostos na década de 1960, têm grande utilização embora, no estágio atual, não possam ser utilizados com a mesma precisão para todos os tipos e configurações de linhas, restringindo a aplicação destes (2), (5). São bastante precisos no caso de linhas de transmissão aéreas simétricas, mas perdem em precisão, quando aplicados a linhas aéreas com alto grau de assimetria, linhas em configurações de circuitos múltiplos e cabos subterrâneos (2), (5), (6), (7).

Os modelos no domínio de fases surgiram a partir de meados da década de 1990, objetivando um modelo preciso e sem restrições. Apesar do grande interesse despertado, tais modelos ainda têm aplicação limitada, e poucos programas tipo EMTP os disponibilizam (8), (9).

Estes recentes modelos se mostram precisos quando os modelos convencionais (modais), da forma que estão implementados, se mostram limitados (2).

Os modelos no domínio de fases visam uma representação matemática sem restrições quanto à geometria ou natureza das linhas de transmissão.

## 3.0 - MODELOS NO DOMÍNIO DE FASES: ESTADO DA ARTE

Dentre os diversos modelos de linhas de transmissão desenvolvidos ao longo dos anos, o modelo modal proposto por J. Martí (4) se destaca por ter fundamentado uma metodologia, na qual a linha de transmissão é completamente caracterizada no domínio da frequência pela admitância característica  $Y_c(j\omega)$ , e pelo fator de propagação  $A(j\omega)$ , estando implementado nos principais programas tipo EMTP (9), (10).

Dentre os programas EMTP, o programa PSCAD/EMTDC (9) disponibiliza um modelo de linhas de transmissão no domínio de fases, denominado Modelo Universal (*Universal Line Model*), conforme proposto por Morched et al (9). Versões recentes do programa ATP (10) também disponibilizam um modelo de linhas de transmissão no domínio de fases, denominado modelo IARMA (*Interpolated Auto-Regressive Moving Average*), conforme proposto por Noda et al (6).

Aprimoramentos de modelos de linhas de transmissão no domínio de fases foram apresentados, por um dos autores em um trabalho de doutorado (2), (11), (12), realizado na UFPB (atualmente UFCG).

Detalham-se a seguir os principais aspectos dos modelos de linhas de transmissão no domínio de fases supracitados.

### 3.1 Modelo IARMA

Noda et al (6) apresentam um modelo no domínio de fases, definido no plano  $z$ , denominado modelo IARMA (*Interpolated Auto-Regressive Moving Average*).

No modelo IARMA,  $Y_c(j\omega)$  e  $A(j\omega)$  no domínio de fases são aproximados por funções racionais no plano  $z$ , reescritas na forma linear:

$$G(z) = a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2} + \dots + a_n \cdot z^{-n} - G(z) \cdot [b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2} + \dots + b_m \cdot z^{-m}]. \quad (1)$$

A transição para o domínio do tempo é direta e sem originar convoluções no domínio do tempo, pois da Equação (1) tem-se:

$$v(t) = a_0 \cdot i(t) + a_1 \cdot i(t - \Delta t) + a_2 \cdot i(t - 2\Delta t) + \dots + a_n \cdot i(t - n\Delta t) - b_1 \cdot v(t - \Delta t) - b_2 \cdot v(t - 2\Delta t) - \dots - b_m \cdot v(t - m\Delta t). \quad (2)$$

O ajuste de funções racionais no plano  $z$  tem suscitado discussões quanto à sua praticidade, uma vez que está diretamente associado ao intervalo de tempo  $\Delta t$  utilizado na transição para o domínio  $z$  (discretização).

Teoricamente, o passo de tempo  $\Delta t$  deve ser o mesmo utilizado na discretização do modelo IARMA e nas simulações com programas EMTP. Ao alterar o passo de tempo, o usuário deve obter novas aproximações.

Usando interpolação, o modelo IARMA permite o uso de um passo de tempo nas simulações diferente do utilizado na síntese do modelo, e desta forma, supera-se (teoricamente) este grande inconveniente da síntese no plano  $z$ .

O maior problema fica a cargo da estabilidade do modelo (13). Critérios distintos de estabilidade são estabelecidos para a admitância característica e o fator de propagação no domínio de fases. No entanto, segundo Noda e Ametani (8), estes critérios ainda não foram implementados na rotina NODA SETUP do programa ATP.

O modelo IARMA é disponibilizado em versões recentes do programa ATP (10).

### 3.2 Modelo Universal

Morched et al (5) apresentam um modelo de linhas de transmissão no domínio de fases, denominado de Modelo Universal (*Universal Line Model*). Esse modelo faz uso do método de ajuste vetorial, para obter aproximações racionais para  $Y_c(j\omega)$  e  $A(j\omega)$  no domínio de fases (7).

Inicialmente, a matriz fator de propagação no domínio modal é aproximada por funções racionais, na forma:

$$A_{\text{mod}-i}(j\omega) \cong P_i(j\omega) \cdot e^{-j\omega \cdot \tau_i}, \quad (3)$$

sendo:  $A_{\text{mod}-i}(j\omega) = e^{-\alpha_i(j\omega) \cdot d} \cdot e^{-j\beta_i(j\omega) \cdot d}$ , modo  $i$  do fator de propagação, com módulo ( $e^{-\alpha_i(j\omega) \cdot d}$ ) e fase ( $-\beta_i(j\omega) \cdot d$ ) na frequência  $\omega$ ;  $P_i(j\omega)$  = função polinomial racional de fase mínima;  $\tau_i$  = tempo de propagação (ou de trânsito) da mais veloz componente de frequência do modo  $i$ .

No referido modelo, os modos com tempos de propagação muito próximos são agupados no intuito de tornar o modelo mais eficiente. Este artifício reduz o número de convoluções no tempo, contribuindo com um ganho em eficiência computacional, traduzido na redução do tempo de processamento.

De posse dos pólos calculados no domínio modal, os elementos de  $A(j\omega)$  no domínio de fases são calculados de modo a compartilharem de todos os pólos calculados no domínio modal, e assim:

$$A_{ij}(s) \cong \sum_{k=1}^n \left[ \left( \sum_{m=1}^{N_k} \frac{c_{mk-ij}}{s - p_{mk}} \right) \cdot e^{-s \cdot \tau_k} \right], \quad (6)$$

sendo:  $A_{ij}(s)$  = elemento ( $i, j$ ) da matriz  $A(s)$  no domínio de fases;  $p_{mk}$  = pólos da função racional aproximada para o modo  $k$ ;  $\tau_k$  = tempo de trânsito do modo  $k$ ;  $N_k$  = ordem da aproximação racional para modo  $k$ ;  $c_{mk-ij}$  = resíduo da função racional para o modo  $k$ ;  $n$  = número de modos (ou grupos, caso haja agrupamento de modos).

Nota-se que a cada elemento da matriz fator de propagação estão associados  $n$  tempos de propagação modal. O compartilhamento de pólos contribui para um aumento na eficiência computacional em simulações no domínio do tempo.

Como as aproximações racionais para os  $n$  modos  $A_{\text{mod}-i}(j\omega)$  são obtidas de forma independente, eventualmente, alguns pólos de diferentes modos podem estar muito próximos. Se isto ocorre em baixas frequências, os respectivos resíduos da função racional aproximada no domínio de fases podem ter valores elevados com sinais opostos. Isto pode levar a instabilidades numéricas em simulações no tempo. A probabilidade disto ocorrer é proporcional à ordem do ajuste.

Os elementos da admitância característica  $Y_c(j\omega)$ , por sua vez, são aproximados diretamente no domínio de fases, também compartilhando os mesmos pólos,

$$Y_{c-ij}(s) \cong d_{ij} + \sum_{k=1}^n \frac{c_{k-ij}}{s - p_k}, \quad \text{para } s = j\omega, \quad (7)$$

sendo:  $Y_{c-ij}(s)$  = elemento ( $i, j$ ) da matriz  $Y_c(s)$  no domínio de fases.

O modelo proposto por Morched et al (5) é disponibilizado no programa PSCAD/EMTDC (9).

### 3.3 Modelo computacional desenvolvido

No modelo proposto por Fernandes (2), as matrizes admitância característica  $Y_c(j\omega)$  e fator de propagação  $A(j\omega)$  no domínio de fases (matrizes cheias), são obtidas por:

$$\begin{aligned} Y_c(j\omega) &= T_i(j\omega) \cdot Y_{c-\text{mod}}(j\omega) \cdot T_i(j\omega)^T \\ A(j\omega) &= T_i(j\omega) \cdot A_{\text{mod}}(j\omega) \cdot T_i(j\omega)^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

sendo:  $Y_{c-mod}(j\omega)$  a matriz admitância modal,  $A_{mod}(j\omega)$  a matriz fator de propagação modal e  $T(j\omega)$  a matriz de transformação modal.

Ao contrário do usual, neste modelo a matriz transformação modal é considerada como complexa e dependente da frequência, incluindo-se as condutâncias em derivação (11), (12).

Normalmente, em uma linha de transmissão polifásica com  $n$  fases, tem-se  $n$  tempos de propagação modais. No modelo computacional desenvolvido, uma vez calculados os  $n$  tempos de propagação modais, encontra-se o menor tempo de trânsito  $\tau_{min}$ , dentre todos os modos, tal que  $\tau_{min} \leq \tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Faz-se então  $\tau = \tau_{min}$ , e extrai-se o tempo de trânsito mínimo de todos os modos do fator de propagação.

Com o agrupamento de diferentes tempos de propagação no cálculo de  $A(j\omega)$  no domínio de fases, é possível associar um único tempo de propagação a todos os elementos desta matriz. Assim, todos os elementos da matriz  $A(j\omega)$  no domínio de fases têm um tempo de propagação comum e único.

Na obtenção do modelo desenvolvido, todos os elementos das matrizes  $Y_c(j\omega)$  e  $A(j\omega)$  são sintetizados por funções racionais precisas de baixa ordem, diretamente no domínio de fases, em uma única etapa, fazendo-se uso do método de ajuste vetorial (9). Destaca-se a possibilidade de se obter funções polinomiais racionais aproximadas, para todos os elementos de um vetor ou uma matriz de uma só vez, o que é um diferencial deste método de ajuste para a aplicação aqui estudada, em que se têm matrizes cheias (domínio de fases). O método de ajuste vetorial possibilita ainda o compartilhamento de pólos pelas funções racionais aproximadas, o que contribuiu para uma maior eficiência do modelo.

O modelo computacional proposto tem se mostrado preciso, eficiente e numericamente estável em simulações no domínio do tempo, podendo ser utilizado em conjunto com o programa PSCAD/EMTDC.

#### 4.0 - ESTUDO DE CASOS: DESEMPENHO DOS MODELOS COMPUTACIONAIS

Com a expansão dos sistemas elétricos de potência é cada vez mais freqüente a construção de linhas de transmissão próximas a outras já existentes, bem como a de novas linhas compartilhando as mesmas torres, em uma configuração de circuitos múltiplos. O uso de linhas de transmissão em alta tensão e corrente contínua (HVDC – *High Voltage Direct Current*), e a aplicação da tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), são outras alternativas encontradas para aumentar a capacidade de transmissão.

Tais alternativas, no entanto, resultam em sistemas mais complexos e linhas em configurações com alto grau de assimetria, compartilhando uma mesma faixa de servidão, formando os “corredores de potência”.

Nestes sistemas, imprecisões na representação das linhas de transmissão podem comprometer os resultados de diversos estudos via simulação digital, e até mesmo resultar em valores teoricamente incoerentes para a correta avaliação das solicitações transitórias e dimensionamento dos sistemas de proteção.

Usando os programas EMTDC e ATP, apresenta-se a seguir um estudo de casos, nos quais se destacam aspectos importantes dos modelos em análise, quando aplicados a sistemas de transmissão fisicamente próximos. Nas simulações, adotou-se um valor de  $1.0 \times 10^{-9}$  S/km para a condutância de dispersão (ou *shunt*) em todos os modelos obtidos, e a freqüência de 1,2 kHz para o cálculo da matriz transformação nos modelos modais.

##### 4.1 Linhas de transmissão fisicamente próximas: Cálculo de tensões induzidas

Considere o sistema de transmissão da Figura 1, composto por duas linhas de transmissão trifásicas, horizontais, não transpostas e fisicamente próximas.

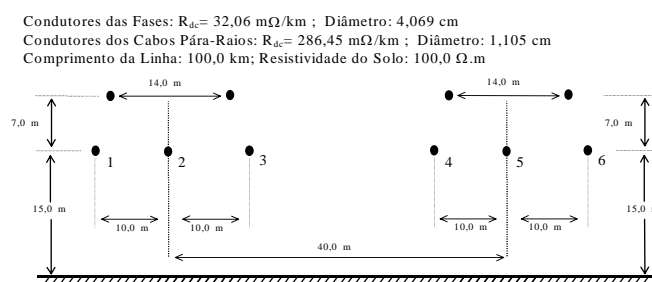


FIGURA 1 – Sistema de transmissão composto por duas linhas de transmissão trifásicas, horizontais, não transpostas e fisicamente próximas.

Este sistema foi modelado nos programas EMTDC e ATP, fazendo uso dos modelos nos domínios modal e de fases implementados nestes programas. Um quarto modelo também foi obtido, conforme o modelo computacional desenvolvido.

Utilizando os modelos em estudo, simulou-se inicialmente no programa EMTDC a energização do sistema da Figura 1 por uma fonte de tensão senoidal, trifásica e equilibrada (1,0 p.u., 60 Hz), aplicada nas fases 1, 2 e 3, estando os demais terminais em aberto. Nas referidas simulações, utilizou-se um passo de tempo de 1,0  $\mu$ s.

Teoricamente, as tensões induzidas nas fases em aberto (4, 5 e 6) devem estar em fase, uma vez que todas as fases energizadas contribuem no mesmo instante para a indução. Adicionalmente, devido à disposição geométrica

dos condutores, as tensões induzidas devem ter valores distintos de magnitude, sendo a maior amplitude na fase 4 (mais próxima das fases energizadas), seguida das fases 5 e 6, respectivamente. Apresentam-se nas figuras 2 a 5 as tensões induzidas, transitórias e em regime permanente, nas fases 4, 5 e 6, obtidas com os modelos modal e de fases disponibilizados no programa EMTDC.

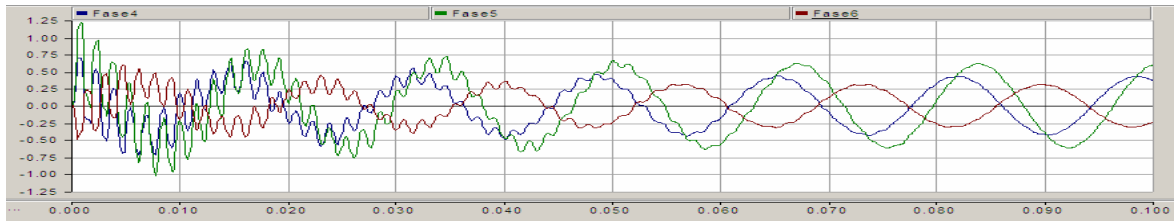


FIGURA 2 – Tensões transitórias induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 da linha da Figura 1 – Modelo modal EMTDC.

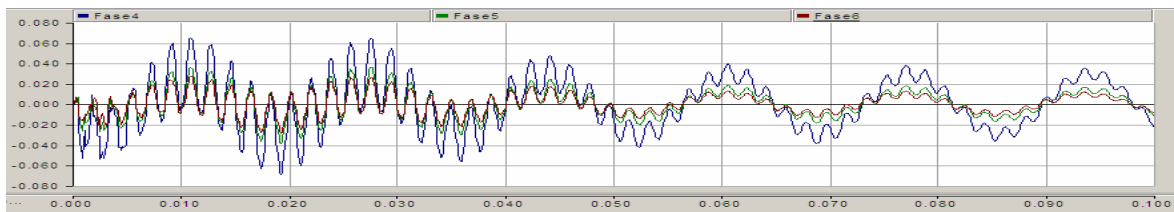


FIGURA 3 – Tensões transitórias induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 da linha da Figura 1 – Modelo no domínio de fases do EMTDC.

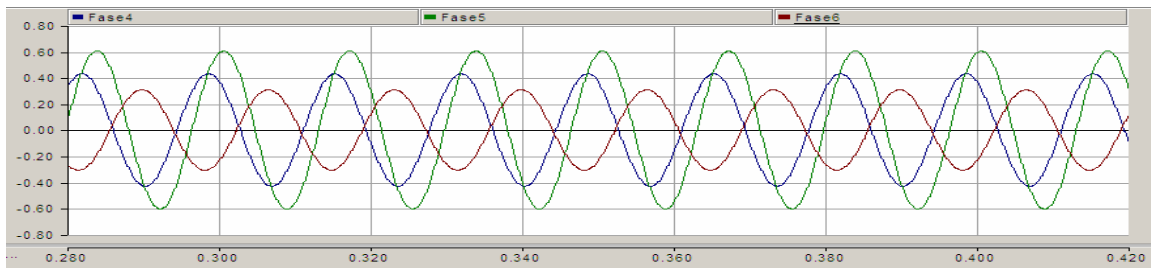


FIGURA 4 – Tensões em regime permanente induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 da linha da Figura 1 – Modelo modal do EMTDC.

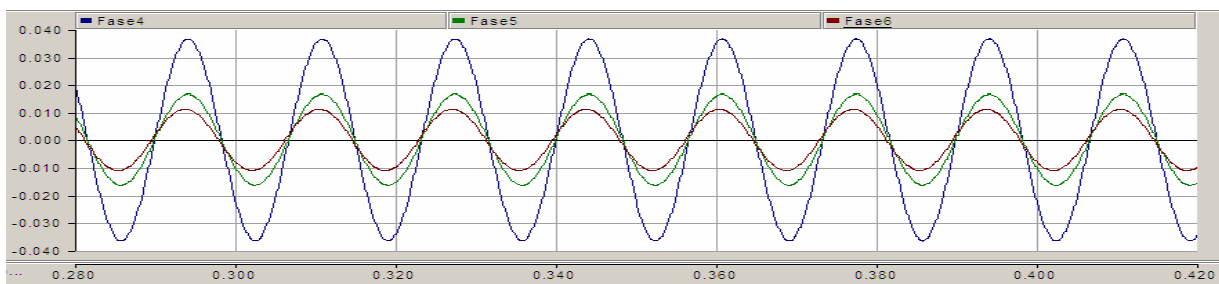


FIGURA 5 – Tensões em regime permanente induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 da linha da Figura 1 – Modelo no domínio de fases do EMTDC.

Verifica-se que as tensões transitórias e em regime permanente, induzidas nas fases em aberto (4, 5 e 6), estão em fase apenas quando se faz uso do modelo no domínio de fases. Adicionalmente, apenas nos resultados obtidos com o modelo no domínio de fases, as tensões induzidas apresentam valores distintos de magnitude, sendo a maior amplitude na fase 4 (mais próxima das fases energizadas), seguida das fases 5 e 6, respectivamente, conforme teoricamente esperado.

Os resultados obtidos com o modelo modal apresentam ainda valores de amplitude para as tensões transitórias induzidas da ordem de 1,25 pu, sendo muito superiores aos valores obtidos com o modelo no domínio de fases (0,07 pu), teoricamente mais coerentes, em virtude da distância com a linha energizada (40,0 m centro a centro). O modelo computacional proposto apresentou resultados similares aos obtidos com o modelo no domínio de fases do EMTDC (Modelo Universal), tanto no regime transitório quanto no permanente.

Utilizando o modelo IARMA, simulou-se em seguida no programa ATP a energização do sistema da Figura 1 por uma fonte de tensão senoidal, trifásica e equilibrada (1,0 p.u., 60 Hz), aplicada nas fases 1, 2 e 3, estando os demais terminais em aberto. Nas referidas simulações, utilizou-se um passo de tempo de 1,0  $\mu$ s.

Apresentam-se nas figuras 6 e 7, as tensões transitórias obtidas com o modelo IARMA disponibilizado no programa ATP.

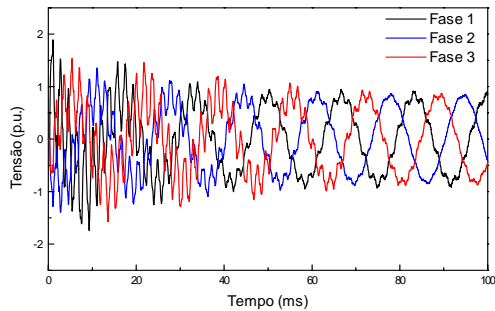


FIGURA 6 – Tensões transitórias nos terminais receptores das fases 1, 2 e 3 da linha da Figura 1 – Modelo IARMA do ATP.

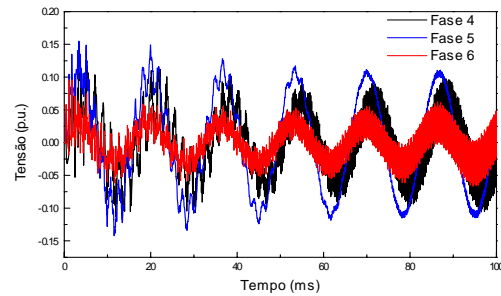


FIGURA 7 – Tensões transitórias induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 da linha da Fig. 1 – Modelo IARMA do ATP.

Conforme se pode observar, verificam-se problemas de oscilação numérica para as tensões induzidas nos terminais receptores das fases 4, 5 e 6 (Figura 7). As tensões transitórias nos terminais receptores das fases 1, 2 e 3, por sua vez, não apresentam problemas numéricos (Figura 6).

Quanto ao esforço computacional (traduzido no tempo de processamento), um resumo é apresentado na Tabela 1, para um passo de cálculo de 1,0  $\mu$ s com 20ms de tempo de simulação. Apesar de se tratar de um sistema de pequeno porte, as diferenças entre os tempos de processamento são expressivas. O modelo IARMA do ATP apresentou um desempenho intermediário entre o desempenho do Modelo Universal do EMTDC e o modelo desenvolvido.

TABELA 1 – ESFORÇO COMPUTACIONAL QUANTIZADO EM TERMOS DO TEMPO DE PROCESSAMENTO.  
PASSO DE TEMPO: 1,0  $\mu$ S. TEMPO MÁXIMO DE SIMULAÇÃO: 20,0MS.

IARMA	Modelo Universal	Modelo Proposto
16,103 s	18,326 s	14,095 s

#### 4.2 Linhas de transmissão fisicamente próximas: Validação do modelo computacional desenvolvido

A comparação entre resultados de medições em campo e resultados de simulações digitais é seguramente o melhor parâmetro para validar um dado modelo computacional. No caso de linhas de transmissão, no entanto, não se dispõe de muitos resultados de medições em campo dadas às dificuldades inerentes a tais medições.

Na falta destes, comumente na literatura, faz-se uso de um programa tipo FDTP (*Frequency Domain Transients Program*), em conjunto com um modelo de linhas de transmissão no domínio da frequência. Os resultados obtidos com estes programas são tidos como teoricamente corretos, pois as dependências dos parâmetros das linhas com a frequência são consideradas, sem quaisquer simplificações ou aproximações (5), (6). Assim, estes resultados têm servido de base para a validação de modelos computacionais em programas tipo EMTP.

Visando validar o modelo proposto, simulou-se a energização do sistema de transmissão da Figura 1, através de um programa tipo FDTP, conforme ilustrado na Figura 8. Nas simulações no domínio do tempo, utilizou-se um passo de tempo de 1,0  $\mu$ s.

As tensões induzidas no terminal receptor da fase 6, obtidas com os modelos em estudo, são apresentadas nas figuras 9 e 10.

Por se tratar de um sistema de transmissão desbalanceado (matriz transformação com forte dependência da frequência) (2), (12), os resultados obtidos com o modelo modal (modelo convencional) diferem significativamente dos demais. Neste caso, as tensões induzidas se mostram amplificadas quando se faz uso do modelo modal. Pode-se observar a concordância entre os resultados obtidos com o modelo teoricamente exato (modelo FDTP) e o modelo proposto no domínio de fases.

O modelo no domínio de fases do EMTDC (ULM – *Universal Line Model*) quando comparado ao modelo teoricamente correto, não produziu resultados tão precisos quanto os produzidos pelo modelo proposto.

Diante dos resultados das simulações apresentados, valida-se o modelo proposto. Destaca-se ainda o melhor desempenho computacional do mesmo.

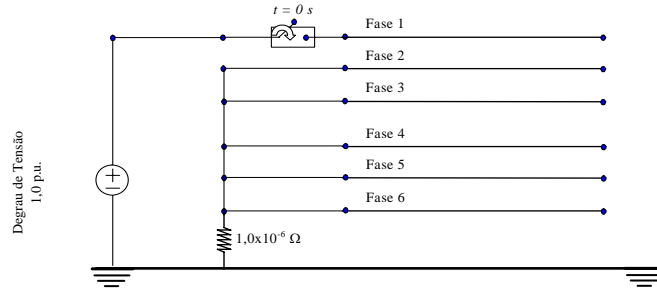


FIGURA 8 – Energização da fase 1 por um degraú de tensão unitário (1,0 p.u.) – Sistema de transmissão da Figura 1.

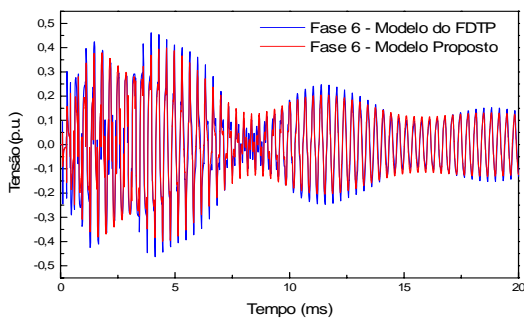


FIGURA 9 – Tensão transitória induzida no terminal receptor da fase 6 – Modelo do FDTP (Resposta teoricamente exata) e Modelo Proposto.

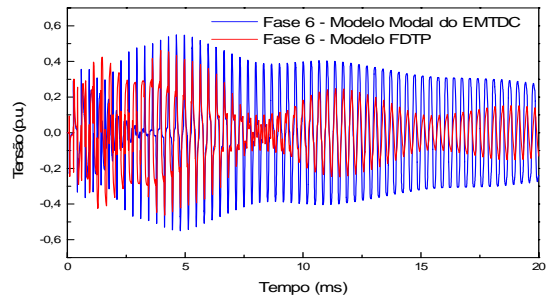


FIGURA 10 – Tensão transitória induzida no terminal receptor da fase 6 – Modelo do FDTP (Resposta teoricamente exata) e Modelo modal do EMTDC (Modelo Convencional).

#### 4.3 Linhas de transmissão AC-DC fisicamente próximas: Cálculo de correntes induzidas

Considere o sistema assimétrico da Figura 11, composto por uma linha DC (*Direct Current*) em paralelo a uma linha AC (*Alternate Current*) trifásica.

Utilizando o programa EMTDC (9), modelou-se o sistema da Figura 11 fazendo uso dos modelos modal e no domínio de fases disponibilizados por este.

Em seguida, simulou-se no EMTDC a energização da linha DC da Figura 11, conforme o circuito da Figura 12, por uma fonte de corrente (Figura 13) aplicada ao terminal emissor da fase 1. Em todas as simulações utilizou-se um passo de tempo  $\Delta t = 10,0\mu s$ .

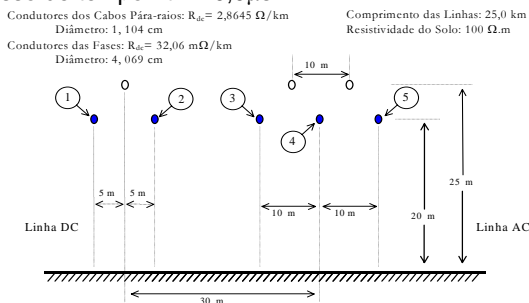


FIGURA 11 – Linhas de transmissão AC-DC fisicamente próximas e paralelas.

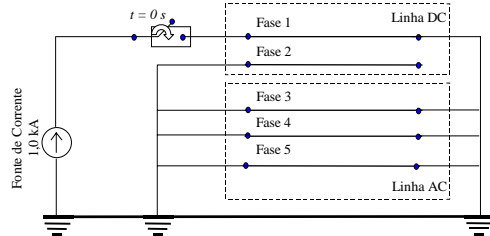


FIGURA 12 – Energização por uma fonte de corrente em uma das fases da linha DC.

Teoricamente, a fonte de corrente (Figura 13) deve induzir correntes na linha AC durante o intervalo de 0,0 a 1,0s apenas. Em regime permanente ( $t > 2,0s$ ), as correntes na linha AC devem se manter em um valor estacionário bem próximo nas três fases. Estando a fase 1 em curto, a maior parte da corrente injetada no terminal emissor deve retornar pelo solo e uma pequena parcela através da linha AC.

As correntes transitórias observadas nos terminais receptores nas fases 3, 4 e 5 (sentido fase-terra), são apresentadas na Figura 14.

Na simulação com o modelo modal, no entanto, observa-se uma corrente positiva em regime permanente no sentido fase-terra no terminal receptor em uma das fases, com as demais no sentido terra-fase sem que haja alguma razão física para tal distinção. O modelo no domínio de fases, por sua vez, apresentou resultados teoricamente mais coerentes.

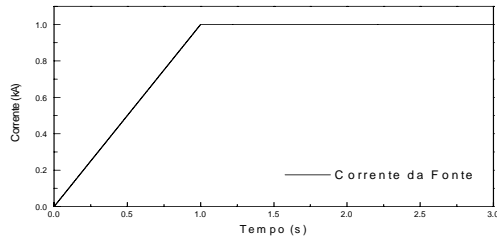


FIGURA 13 – Fonte de Corrente aplicada ao terminal emissor da fase 1 da linha da Figura 11.

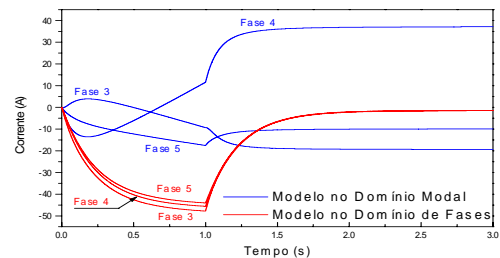


FIGURA 14 – Correntes induzidas nos terminais receptores das fases 3, 4 e 5 da linha da Figura 11.

## 5.0 - CONCLUSÕES

A aplicação dos modelos no domínio de fases sob análise revela aspectos importantes relativos à precisão, eficiência computacional e estabilidade numérica. Os resultados obtidos com o Modelo Universal (EMTDC) e o modelo computacional proposto, se mostraram teoricamente coerentes e concordantes entre si.

O modelo IARMA (ATP), por sua vez, pode apresentar problemas tanto de estabilidade quanto de oscilação numéricas. Estudos detalhados do processo de ajuste por funções racionais revelam evidências que podem justificar tais problemas.

Um programa FDTP, que produz resultados tidos como teoricamente corretos, serve de referência para validação do modelo desenvolvido.

Sob os aspectos precisão e eficiência computacional, o modelo proposto apresentou o melhor desempenho. Deve se ressaltar que mesmo sem simplificações em relação às grandezas dependentes com a frequência, o modelo proposto ainda se mostrou mais eficiente.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dr. Bjorn Gustavsen (SINTEF, Noruega) que forneceu os resultados das simulações obtidos com um programa FDTP.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dommel, H. W., Electromagnetic Transients Program Reference Manual, Vancouver: Department of Electrical Engineering, The University of British Columbia, Canada, 2004.
- (2) Fernandes, A. B., Linhas de Transmissão: Um Modelo no Domínio de Fases Preciso e Eficiente. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 2001.
- (3) Wedepohl, L. M., Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in Polyphase Systems, Proc. IEE, Vol. 110, No. 12, pp. 2200-2212, 1963.
- (4) Martí, J. R., Accurate Modelling of Frequency-Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulations. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1, pp. 147-157, January 1982.
- (5) Morched, A., Gustavsen, B., Tartibi, M., A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, Iss. 3, pp. 1032-1038, July 1999.
- (6) Noda, T., Nagaoka, N., Ametani, A., Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Model in Terms of Convolution, Steady-State Initialization, and Stability. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No.3, pp. 1327-1334, July 1997.
- (7) Gustavsen, B., Irwin, G., Mangelrod, R., Brandt, D., Kent, K., Transmission Line Models for the Simulation of Interaction Phenomena between AC and DC Overhead Lines. Proceedings of the IPST'99 - International Conference on Power Systems Transients, Budapest, Hungary, pp. 61-67, June 1999.
- (8) Noda, T., Ametani, A., User Instructions of Noda Setup in ATP. Japan, 1998.
- (9) Manitoba HVDC Research Centre, PSCAD/EMTDC Simulation Program - V3.8 Personal Edition, Winnipeg, Canada, 2004.
- (10) Leuven EMTP Center, ATP - Alternative Transient Program - Rule Book, Herverlee, Belgium, 1987.
- (11) Fernandes, A. B., Neves, W. L. A., Frequency-Dependent Transformation Matrices for Phase-Domain Transmission Line Models, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2001, Vancouver, Canada, pp. 1782-1787, 2001.
- (12) Fernandes, A. B., Neves, W. L. A., Phase-Domain Transmission Line Models Considering Frequency-Dependent Transformation Matrices, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 2, pp. 708-714, April 2004.
- (13) Gustavsen, B., Semlyen, A. (2001), Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No.1, February: 97-104.