



**GSC-023**

**21 a 26 de Outubro de 2001**

**Campinas - São Paulo - Brasil**

**GRUPO X**

**GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO (GSC)**

### **Modelagem e Visualização de Surtos em Linhas de Transmissão**

Antonio Felipe da Cunha de Aquino (\*)

Antonio Carlos Siqueira de Lima

Sandoval Carneiro Jr.

Operador Nacional do Sistema Elétrico

DEE/COPPE/UFRJ

#### **RESUMO**

Este trabalho apresenta um programa que permite visualizar a propagação de surtos em linhas de transmissão, sob a forma de animações gráficas. O algoritmo de cálculo dos perfis de tensão não está baseado na segmentação explícita da linha, o que é conveniente sob o ponto de vista computacional. O programa dispõe de interface amigável e permite que diversos casos sejam implementados, havendo flexibilidade na escolha da linha, da terminação e do surto incidente. A última versão do programa permite ainda que arquivos de saída do EMTP sejam convertidos de forma a gerar as animações correspondentes. Desta forma podem ser visualizadas animações de casos mais complexos tais como a energização de linhas e reatores de forma simultânea, considerando a saturação e as perdas.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Transitórios eletromagnéticos. Sobretensões. Propagação de surtos em linhas. Modelos digitais para sistemas de potência. Energização de linhas de transmissão.

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

O estudo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência constitui uma etapa fundamental para o correto dimensionamento dos níveis de isolamento de linhas de transmissão e subestações. Este tipo de análise foi muito beneficiada com o advento dos simuladores digitais. Tais programas proporcionam maior flexibilidade aos estudos e redução do tempo para execução dos mesmos.

Um problema que desperta bastante interesse nos estudos de transitórios eletromagnéticos refere-se aos surtos que se propagam em uma linha de transmissão, quando da ocorrência de algum distúrbio. Estes surtos podem ter origem em manobras no sistema ou ainda

em descargas atmosféricas. Quando estes surtos propagam-se na linha são atenuados e distorcidos devido à dependência de seus parâmetros longitudinais com a frequência. Este fenômeno tem sua origem principalmente no efeito pelicular, na resistividade do solo e no efeito coroa (para tensões elevadas). Para representar corretamente estes fenômenos em um estudo de transitórios eletromagnéticos devem ser utilizados modelos adequados para a linha de transmissão.

Os principais resultados de uma simulação de transitórios eletromagnéticos são as tensões ao longo do tempo em todas as subestações envolvidas no estudo. Geralmente as tensões nas linhas de transmissão são obtidas em seus terminais, ou seja, nos pontos de conexão com as subestações. Quando deseja-se obter o perfil de tensão ao longo da linha, o que se faz é segmentar a linha de transmissão e monitorar a tensão nos diversos pontos intermediários. Este procedimento mostra-se inadequado sob o ponto de vista computacional, pois sobrecarrega a simulação e pode apresentar erros cumulativos.

Este trabalho utiliza um método para o cálculo das tensões ao longo da linha que não está baseado na segmentação explícita da linha. O método em questão foi proposto inicialmente por L. Marti (1). De posse dos perfis de tensão para diversos instantes de tempo podem ser criadas animações computacionais. Estas animações mostram a propagação das ondas de tensão e corrente na linha de transmissão. Para executar esta tarefa foi desenvolvido um programa capaz de reproduzir estas animações na tela de um microcomputador. O objetivo é o de permitir a visualização dos diversos fenômenos envolvidos na propagação e uma melhor compreensão dos mesmos. O efeito de animação é conseguido através da impressão sucessiva de perfis de tensão na tela, permitindo a observação das ondas trafegantes.

Operador Nacional do Sistema Elétrico, DPP/GPE

Rua da Quitanda, 196 – 11º andar – Rio de Janeiro/RJ – Brasil – CEP 20091 005

Tel.: (21) 203 9563 – Fax: (21) 203 9411 – e-mail: [aquino@ons.org.br](mailto:aquino@ons.org.br)

O modelo de linha utilizado, além de considerar a dependência dos parâmetros com a frequência, propõe uma aproximação para a função de propagação que permite a utilização da recursividade na solução das integrais de convolução. Este procedimento acelera o cálculo dos perfis de tensão.

A última versão do programa permite ainda que arquivos gerados no EMTP possam ser convertidos e lidos de forma a obter os perfis de tensão correspondentes. Desta forma, o usuário pode observar as ondas trafegantes resultantes de fenômenos mais complexos que envolvam outros equipamentos. Alguns exemplos seriam a energização conjunta da linha e de um transformador ou reator, considerando a saturação e as perdas.

O programa dispõe de interface amigável e proporciona facilidades na utilização. Diversos casos podem ser implementados uma vez que há flexibilidade na escolha da linha, das terminações e dos surtos incidentes.

O programa se destina à apresentação didática da propagação de surtos em linhas de transmissão, podendo ser empregado em disciplinas do curso de graduação em engenharia elétrica. Em última análise, o programa proporciona uma melhor compreensão dos principais fenômenos que devem ser considerados na coordenação do isolamento de sistemas elétricos.

## 2.0 CONCEITOS ENVOLVIDOS

A propagação de surtos em linhas de transmissão está baseada na teoria das ondas eletromagnéticas. Estas ondas resultam da interação entre os campos elétrico e magnético da linha.

As equações 1 e 2 relacionam a tensão e corrente da linha de transmissão com as variáveis espacial  $[x]$  e temporal  $[t]$ .

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 I}{\partial t^2} \quad (2)$$

As expressões acima constituem as equações de onda de uma linha de transmissão sem perdas e são denominadas Equações Telegráficas. A solução das mesmas foi obtida por D'Alembert em 1747. A forma geral da solução é apresentada nas equações 3 e 4.

$$V(x,t) = v^+ + v^- = f_1(x + nt) + f_2(x - nt) \quad (3)$$

$$I(x,t) = i^+ + i^- = \frac{1}{Z_C} f_1(x + nt) - \frac{1}{Z_C} f_2(x - nt) \quad (4)$$

onde,

$n = (\sqrt{LC})^{-1}$  → velocidade de propagação na linha;

$v^+$ ,  $i^+$  → ondas progressivas de tensão e corrente;

$v^-$ ,  $i^-$  → ondas regressivas de tensão e corrente.

As equações 3 e 4 sugerem que a tensão e a corrente na linha resultam da composição de duas ondas eletromagnéticas que viajam à velocidade  $[n]$ , em sentidos opostos. Intuitivamente pode-se provar a existência destas duas ondas trafegantes. Considere a tensão  $[v]$  como sendo composta apenas pela função  $[f_2(x-nt)]$ . Considere também um observador fictício que se desloca à velocidade  $[n]$ , no sentido positivo de  $[x]$ , de maneira que sua posição seja sempre igual a  $[nt]$ . Desta forma a expressão  $[x-nt]$  é sempre constante e para o observador em movimento a função  $[f_2(x-nt)]$  não varia. Portanto, no ponto onde se encontra o observador, a tensão  $[v]$  tem um valor constante. Todavia, um observador fixo em relação à linha observa uma onda de tensão que se desloca à velocidade  $[v]$ , no sentido positivo de  $[x]$ , denominada onda progressiva.

De forma análoga pode-se comprovar a existência de uma onda regressiva, ou seja, uma onda que se propaga na linha no sentido negativo de  $[x]$ . Deve-se para isso considerar a função  $[v]$  como sendo composta apenas pela função  $[f_1(x+nt)]$  e imaginar um observador que se desloca no sentido negativo de  $[x]$ , à mesma velocidade  $[n]$ .

A composição das ondas regressiva e progressiva dá origem à tensão em cada ponto da linha de transmissão. Da mesma forma, a corrente elétrica será formada a partir da composição das ondas regressiva e progressiva de corrente em cada ponto.

### 2.1 Reflexão e Refração das Ondas Trafegantes

A solução da equação de onda sugere a existência de ondas de tensão e corrente que se propagam na linha. Estas relacionam-se por um parâmetro da linha denominado impedância característica. Quando estas ondas são submetidas a uma mudança de meio, ou seja, quando alcançam um meio cuja impedância característica é diferente, ocorrem modificações nas grandezas elétricas da linha. Isto ocorre porque a proporcionalidade entre as ondas de tensão e corrente não pode ser violada. Estes ajustes acontecem naturalmente nos terminais das linha ou em qualquer ponto onde ocorra mudança de impedância e dão origem a fenômenos importantes, sobretudo em estudos de coordenação do isolamento.

Quando a onda alcança um ponto de descontinuidade, um par de ondas são produzidas. Uma é a onda refletida que será superimposta a onda incidente. Outra, a onda refratada, prossegue em direção ao meio de impedância característica diferente. A intensidade destas ondas é função das impedâncias características dos meios envolvidos. Portanto, comportamentos bastante distintos são observados para as diferentes terminações ou meios.

As equações apresentadas anteriormente referem-se a uma linha de transmissão sem perdas. Todavia, o estudo das mesmas permite compreender os fenômenos correspondentes em uma linha real.

### 3.0 METODOLOGIA DE CÁLCULO DOS PERFIS

A representação das linhas de transmissão pelo modelo J.Marti permite a utilização de um algoritmo rápido e preciso no cálculo de tensões ao longo da linha. No programa optou-se pela implementação do algoritmo proposto por L.Marti (1), que permite o cálculo de tensões e correntes transitórias em um número qualquer de pontos intermediários de uma linha de transmissão. Além disso, leva em conta com grande precisão a dependência dos parâmetros longitudinais da linha com a frequência.

O efeito pelicular é um dos responsáveis pela variação dos parâmetros da linha com a frequência. A teoria básica do fenômeno está apresentada a seguir.

#### 3.1 Efeito Pelicular

O Efeito Pelicular é a distribuição não uniforme da corrente elétrica em um condutor. Como o nome propõe, a corrente elétrica tende a se estabelecer na periferia do condutor à medida em que a frequência aumenta, dando origem a uma fina película de condução.

A justificativa do fenômeno está na existência de propagação eletromagnética no sentido radial. Isto ocorre porque em condutores reais percorridos por corrente é verificada uma componente de campo elétrico tangencial. A interação desta componente com o campo magnético que circunda o condutor dá origem a uma onda que se propaga na direção radial. Desta forma, a área efetiva de condução de corrente é afetada pela frequência, fazendo com que os parâmetros da linha variem.

Em condutores ideais, a componente de campo elétrico tangencial inexistente, e conseqüentemente, não há propagação no sentido radial. Neste caso, em toda a seção do condutor seria verificada a mesma densidade de corrente.

#### 3.2 Modelo Marti no domínio da frequência

Considere uma linha de transmissão monofásica, ou ainda um modo de propagação qualquer de uma linha multifásica de comprimento "d" mostrada na Figura 1.

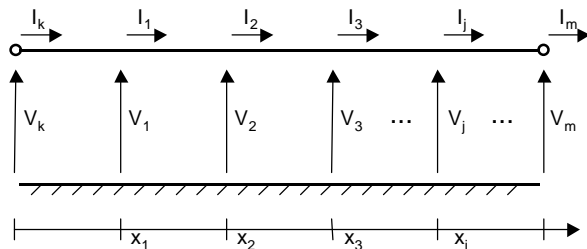


Figura 1 – Linha de Transmissão Monofásica

Seja  $[x_j]$  a distância de um ponto qualquer ao terminal  $[k]$  da linha. Pode-se escrever que  $[x_j = j \cdot \Delta x]$  e que  $[\Delta x = d/(N+1)]$ .

Duas expressões podem ser obtidas pela combinação linear das funções  $V(x,t)$  e  $Z_C \cdot I(x,t)$ . Uma delas é a

expressão da onda progressiva, doravante denominada  $F_x$ . Da mesma forma, pode-se obter uma expressão para a onda regressiva, doravante  $B_x$ . A tensão e a corrente em um ponto  $[x]$  podem ser expressas no domínio da frequência pelas equações 5 e 6.

$$V_x + Z_C \cdot I_x = F_x = A \cdot F_{x-\Delta x} \quad (5)$$

$$V_x - Z_C \cdot I_x = B_x = A \cdot B_{x+\Delta x} \quad (6)$$

onde,

$$A = e^{-\sqrt{Z} \cdot \Delta x} \rightarrow \text{função de propagação};$$

$$F_x \text{ e } B_x \rightarrow \text{funções progressiva e regressiva.}$$

A partir da soma e subtração das equações 5 e 6 obtém-se as equações 7 e 8.

$$2 \cdot V_x = F_x + B_x \quad (7)$$

$$2 \cdot Z_C \cdot I_x = F_x - B_x \quad (8)$$

Sejam  $F_0$  e  $B_D$  as funções progressiva e regressiva calculadas nos terminais da linha, isto é,  $F_0 = F_{x=0}$  e  $B_D = B_{x=D}$ . Se a solução nos terminais da linha é conhecida, pode-se então determinar  $F_0$  e  $B_D$ . As funções  $F_x$  e  $B_x$  podem então ser calculadas, utilizando-se os valores de  $F_0$  e  $B_D$ , a partir das seguintes expressões:

$$F_{\Delta x} = A \cdot F_0 \quad (9)$$

$$F_{j \cdot \Delta x} = A \cdot F_{(j-1) \cdot \Delta x} \quad (10)$$

$$B_{N \cdot \Delta x} = A \cdot B_D \quad (11)$$

$$B_{j \cdot \Delta x} = A \cdot B_{(j+1) \cdot \Delta x} \quad (12)$$

#### 3.3. Solução no domínio do tempo

No domínio do tempo, utilizando a transformada inversa de Fourier, as equações 9 a 12 tornam-se:

$$f_{\Delta x}(t) = a(t) * f_0(t) \quad (13)$$

$$f_{j \cdot \Delta x}(t) = a(t) * f_{(j-1) \cdot \Delta x}(t) \quad (14)$$

$$b_{N \cdot \Delta x}(t) = a(t) * b_D(t) \quad (15)$$

$$b_{j \cdot \Delta x}(t) = a(t) * b_{(j+1) \cdot \Delta x}(t) \quad (16)$$

A função de propagação para um segmento de linha de comprimento  $\Delta x$  pode ser aproximada por uma função racional, com a forma

$$A = k_{a,0} \cdot \frac{e^{-j\omega\tau}}{(j\omega + P_{a,m+1})} \prod_{k=1}^m \frac{(j\omega + Z_{a,k})}{(j\omega + P_{a,k})}$$

onde  $\tau$  é o tempo de propagação da componente de frequência mais elevada que se propaga na linha. Esta aproximação da função de propagação permite que as convoluções nas equações 14 e 16 sejam resolvidas de forma recursiva.

A tensão em um ponto qualquer da linha pode então ser obtida diretamente através da expressão:

$$2 \cdot v_x(t) = f_x(t) + b_x(t)$$

Para obter as correntes nos pontos intermediários, deve-se aproximar a impedância característica da linha por uma função racional do tipo

$$Z_c = k_{z,0} \prod_{k=1}^m \frac{(j\omega + Z_{z,k})}{(j\omega + P_{z,k})}$$

As correntes podem ser calculadas pelas relações

$$2.z_c(t) * i_x(t) = 2.e_x(t) = f_x(t) - b_x(t)$$

$$e_x(t) = z_{eq} i_x(t) + h_x(t - \Delta t)$$

$$i_x(t) = \frac{f_x(t) - b_x(t) - 2.h_x(t - \Delta t)}{2.z_{eq}}$$

onde  $Z_{eq}$  é uma constante e  $h_x$  depende dos valores históricos.

O modelo descrito apresenta vantagens sobre os utilizados convencionalmente no cálculo de transitórios. As principais são a velocidade de processamento dos cálculos e a precisão na obtenção dos resultados, uma vez que o modelo não utiliza a segmentação explícita da linha.

#### 4.0 O PSLT (PROPAGAÇÃO DE SURTOS EM LT's)

O PSLT 2.0 foi desenvolvido em linguagem Pascal para Windows (DELPHI), sendo a sua interface bastante amigável.

Para compor a simulação, o usuário deve seguir os seguintes passos:

- Escolha da linha de transmissão – neste passo o usuário deve informar a configuração geométrica da linha e comprimento da mesma.
- Aproximação da função de propagação – o usuário deve adotar uma aproximação racional para a função de propagação. Esta aproximação permite que as integrais de convolução sejam resolvidas de forma recursiva, conforme mencionado anteriormente. Os programas de cálculo de parâmetros de linhas (LINECONSTANTS e FDDATA) determinam facilmente os coeficientes da função de propagação aproximada.
- Escolha do tipo de surto – o usuário deve escolher o tipo de surto que incidirá no terminal da linha no instante inicial da simulação ( $t=0$ ). As opções disponíveis na última versão são o DEGRAU, o PULSO e o SURTO (bi-exponencial).
- Escolha da terminação – o usuário deve escolher o tipo de terminação que será conectada no terminal da linha. As opções disponíveis são as seguintes: LINHA ABERTA, LINHA EM CURTO, REATOR, CAPACITOR e RESISTOR.
- Configuração da simulação – neste passo o usuário informa o tempo de simulação e o nome do arquivo de dados de saída. Neste arquivo o programa irá gravar os dados para gerar as animações. Além disso, o usuário deve optar por considerar ou não a dependência dos parâmetros com a frequência e as perdas.

(f) Visualização das ondas trafegantes – após o término da simulação o usuário pode visualizar as ondas de tensão que se propagam na linha. Alguns controles de parada e aceleração das animações estão disponíveis. Deve ficar claro que uma vez feita a simulação, as animações podem ser visualizadas sem a necessidade de nova simulação.

(g) Visualização das curvas V vs. t – o programa permite que a tensão ao longo do tempo em qualquer ponto da linha seja visualizada.

Os passos (a) e (b) são os mais complexos de serem realizados. Isto porque envolvem conhecimentos específicos de linhas de transmissão e de programas da família EMTP. Para contornar este problema, foram incluídas no pacote do programa algumas aproximações para configurações geométricas usuais de linhas de transmissão. Desta forma o usuário menos experiente pode optar pela utilização de funções de propagação já aproximadas.

A última versão do programa permite ainda que a visualização das ondas possa ser feita a partir de simulações feitas no EMTP. Desta forma, se o usuário deseja estudar fenômenos mais complexos envolvendo mais elementos da rede, ele pode executar o estudo no EMTP e visualizar as animações no PSLT. Este procedimento necessita da segmentação explícita a linha de transmissão. A Figura 2 apresenta o fluxo de dados utilizados pelo programa.

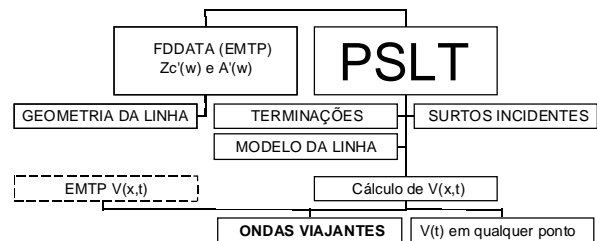


Figura 2 – Fluxograma dos dados utilizados pelo PSLT

#### 5.0 RESULTADOS

Os resultados que melhor representam o programa referem-se às próprias animações computacionais. Por motivos óbvios, estas não puderam ser incluídas neste trabalho. Todavia, optou-se por apresentar algumas figuras que dão uma idéia do que se pode ver na tela do microcomputador.

O primeiro caso simulado refere-se a energização de uma linha de transmissão de 300km, 345kV. Em  $t=0$  é aplicado um degrau de tensão em um dos terminais da linha. O outro terminal permanece aberto durante todo o processo de energização. Nesta simulação foram consideradas as perdas e a dependência dos parâmetros da linha com a frequência. Foram calculadas as tensões em 50 pontos da linha de transmissão.

A Figura 3 apresenta a tensão ao longo da linha, para diversos instantes de tempo (caso 1). Observa-se que a curva negra refere-se a condição verificada após a

reflexão no terminal aberto da linha. Cabe ressaltar que ocorre reflexão total quando a linha de transmissão está aberta. A Figura 4 apresenta a tensão ao longo do tempo no terminal aberto e no meio da linha de transmissão.

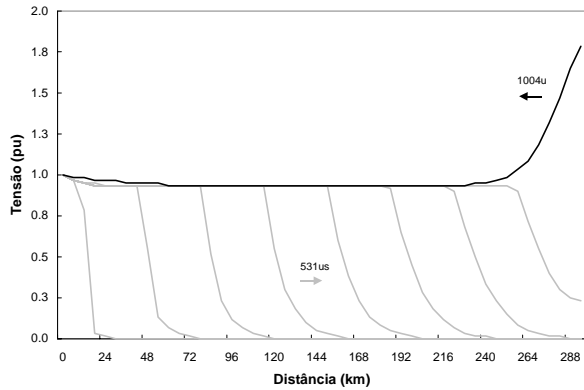


Figura 3 –  $V(x)$  para diversos instantes (caso 1)

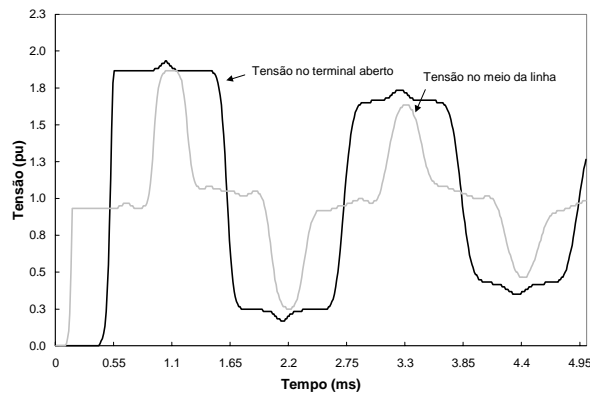


Figura 4 –  $V(t)$  no meio e fim da linha (caso 1)

O segundo caso simulado refere-se a energização da mesma linha de transmissão de 300km, 345kV. Nesta simulação considera-se a linha curto-circuito. Em  $t=0$  é aplicado um degrau de tensão. Nesta simulação também foram consideradas as perdas e a dependência dos parâmetros da linha com a frequência.

A Figura 5 apresenta a tensão ao longo da linha, para diversos instantes de tempo. A curva negra refere-se a condição verificada após a reflexão no terminal em curto-circuito. Neste caso a condição de contorno no terminal em curto impõe tensão nula neste ponto durante toda a simulação.

Como mencionado anteriormente, a visualização de resultados do EMTP permite que o programa analise a propagação de ondas em configurações mais complexas. Apresenta-se aqui três casos: energização de uma linha de transmissão com dois pára-raios (um no meio e outro no final de linha) (caso 3), energização da linha de transmissão em conjunto com o transformador onde o mesmo tem representada a saturação (caso 4) e um teste de cargas aprisionadas onde a alimentação da linha é retirada (caso 5). Nestes

casos o tempo de simulação usado foi de 10ms com um passo de cálculo de  $1 \mu s$ .

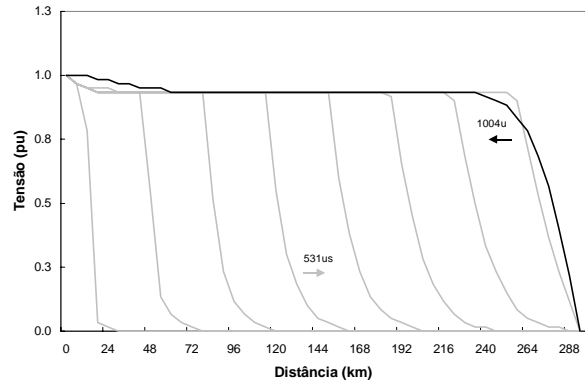


Figura 5 –  $V(x)$  para diversos instantes (caso 2)

Para o caso de energização direta da linha (caso 3) utilizou-se um circuito de 230kV de configuração horizontal, condutor Drake (795 MCM), cabo pára-raios de 3/8 EAR. A linha foi segmentada em 50 elementos iguais sendo todos representados pelo modelo JMarti que representa a variação da frequência da impedância característica e da matriz de propagação no domínio modal. Este modelo está instalado em diversas versões do EMTP e pode ser considerado preciso para configurações de circuito horizontal onde a matriz de transformação entre o domínio modal e de fase pode ser considerada constante. Os pára-raios são de ZnO sem *gap* representados no ATP/EMTP por duas exponenciais que permitem representar a característica não linear deste equipamento. Neste caso a tensão de condução é de cerca de 1,98pu. A Figura 6 mostra o resultado obtido neste caso.

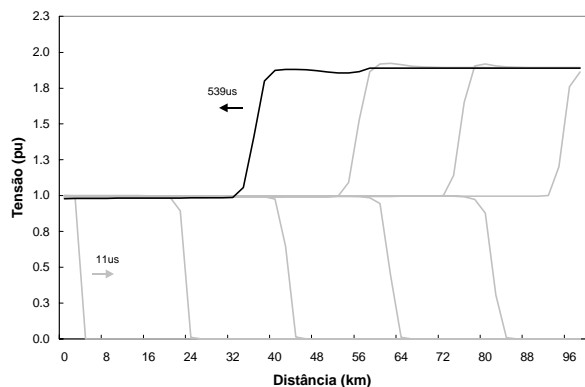


Figura 6 –  $V(x)$  para diversos instantes (caso 3)

A mesma linha de transmissão também é usada para o caso de energização do transformador de 500MVA, 230/500kV (caso 4). No modelo do transformador são representadas as resistências e reatâncias dos enrolamentos, bem como a característica não linear da saturação do núcleo. Do resultado apresentado na Figura 7 nota-se que há agora uma interação entre a linha de transmissão e o transformador. Esta interação dá origem a oscilações superimpostas. A Figura 7 apresenta a tensão ao longo da linha. A Figura 8

apresenta a tensão ao longo do tempo no meio da linha de transmissão e no transformador.

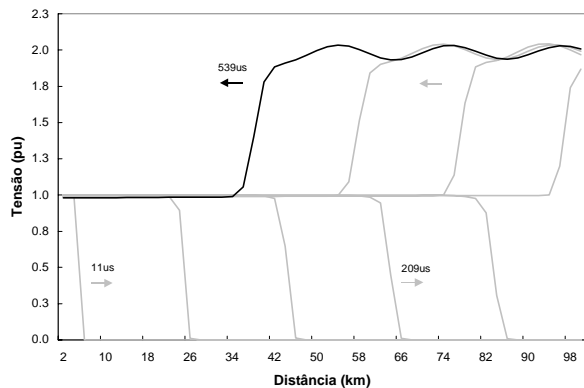


Figura 7 –  $V(x)$  para diversos instantes (caso 4)

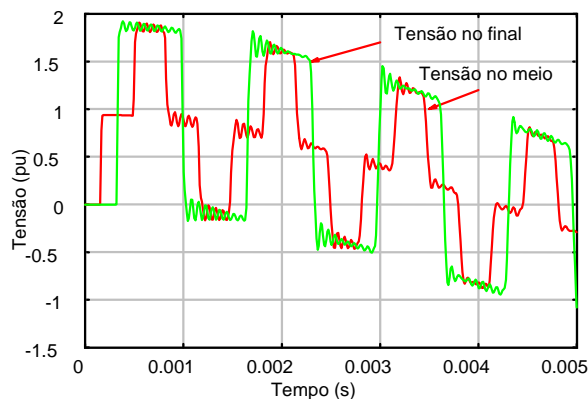


Figura 8 –  $V(t)$  no meio da linha e no transf. (caso 4)

Para o terceiro teste a linha está em regime para  $t < 0s$  e 1ms após o início da simulação a alimentação das três fases é retirada (caso 5). Este teste também é interessante para analisar a estabilidade numérica do modelo. Dependendo das frequências escolhidas para o ajuste das admitância característica e da matriz de propagação, modos instáveis podem ser obtidos invalidando o modelo.

A Figura 9 apresenta a tensão ao longo da linha, para diversos instantes de tempo (caso 5). A Figura 10 apresenta a tensão ao longo do tempo no meio e no final da linha de transmissão.

## 7 CONCLUSÕES

O trabalho apresentou um programa capaz de produzir animações computacionais que mostram a propagação de ondas em linhas de transmissão. Estas animações são produzidas a partir de perfis de tensão que no programa são calculados utilizando a metodologia proposta por Marti.

O programa mostrou-se adequado para a visualização dos principais fenômenos relacionados com os estudos de transitórios eletromagnéticos. Os resultados obtidos são compatíveis com a teoria da propagação de surtos em linhas de transmissão.

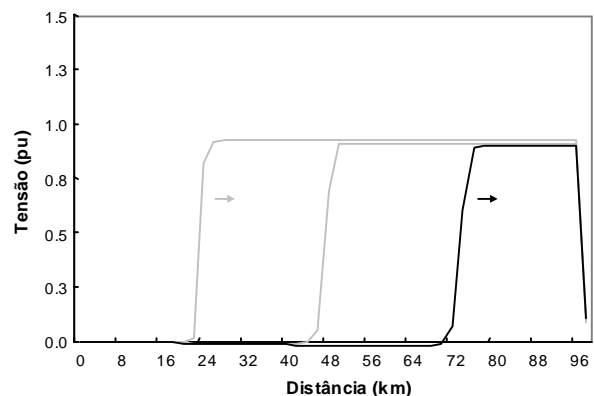


Figura 9 –  $V(x)$  para diversos instantes (caso 5)

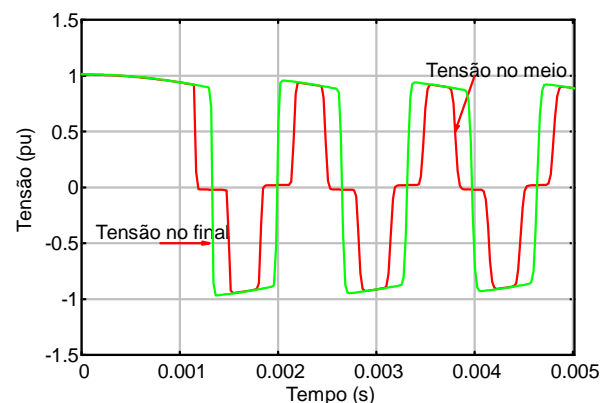


Figura 10 –  $V(t)$  no meio e no final da linha (caso 5)

No caso da energização da linha em conjunto com o transformador nota-se o surgimento de uma oscilação superimposta a onda de energização. Este fenômeno se deve a interação entre a capacitância da linha com a indutância do transformador. A não linearidade deste indutor (núcleo do transformador) é responsável pelo alto amortecimento desta oscilação. Uma representação linear do ramo de magnetização produziria uma oscilação de mesma frequência mas de menor amortecimento.

## 8 REFERÊNCIAS

- (1) MARTI, L., DOMMEL, H., "Calculation of Voltage Profiles Along Transmission Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.12, no.2, April 1997.
- (2) DOMMEL, H., "Electromagnetic Transients Program Reference Book (EMTP Theory Book)", Bonneville Power Administration, Portland, USA, 1986.
- (3) MARTI, J. "The Problem of Frequency Dependence Transmission Line Model", Ph.D. dissertation, University of British Columbia, Canada, 1981.
- (4) GREENWOOD, A. "Electrical Transient in Power Systems", Wiley-Interscience, 1971.
- (5) Stevenson, Jr., W., "Elements of Power System Analysis", McGraw-Hill, 1982.