

# MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO NA ANÁLISE DE SOBRETENSÕES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A. R. C. de Oliveira  
Univ. Taubaté

J. R. Cogo  
IEE - EFEI

Artigo apresentado no Seminário de Pesquisa EFEI - 1983

## RESUMO

Este artigo apresenta os modelos de linhas de transmissão disponíveis no programa EMTP, usado na análise de sobretensões, mostrando vantagens e desvantagens de cada modelo, e o caso onde melhor se aplicam.

## ABSTRACT

This paper present the models of transmission lines available in EMTP program, used for analysis of overvoltages, showing advantages and disadvantages of such model, and the case where better applied it.

## 1 - INTRODUÇÃO

Nos modelos de linhas de transmissão adotados nos estudos de transitórios tem-se uma grande variedade de opções. Pode-se dividir os modelos existentes basicamente em três tipos:

- modelos com parâmetros concentrados;
- modelos com parâmetros distribuídos;
- modelos com parâmetros dependentes da frequência.

Esses modelos são usados no programa EMTP (Eletro-Magnetic Transients Program).

A evolução da modelagem de linhas de transmissão encontra-se atualmente concentrada no desenvolvimento de modelos melhores que considerem a variação dos parâmetros com a frequência. Atualmente os modelos mais usados ainda são os modelos de parâmetros distribuídos.

A seguir faz-se uma descrição dos vários modelos e ao final apresentaremos as melhores aplicações para cada caso.

Toda a metodologia usada é baseada no método trapezoidal [1].

## 2 - MODELAGEM ATRAVÉS DE PARÂMETROS CONCENTRADOS

Neste modelo considera-se uma modelagem monofásica ou uma modelagem trifásica onde pode-se considerar o efeito do acoplamento entre as 3 fases:

### 2.1 - MODELAGEM MONOFÁSICA

Adota-se o modelo II como mostrado na Figura 1.

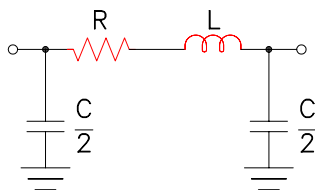


Fig. 1 - Modelo II usado na modelagem monofásica

Os valores R, L e C são grandezas escalares e constituem as características da linha.

### 2.2. MODELAGEM TRIFÁSICA

Usa-se o modelo II considerando-se o acoplamento entre as fases, como mostrado na Figura 2.

As grandezas [R], [L] e [C] envolvidas na Figura 2 são matrizes as quais contém a informação do acoplamento entre fases.

Pode-se desprezar a capacitância considerando - se a matriz [C] como nula, o que equivale a considerar a linha representada apenas pela impedância série.

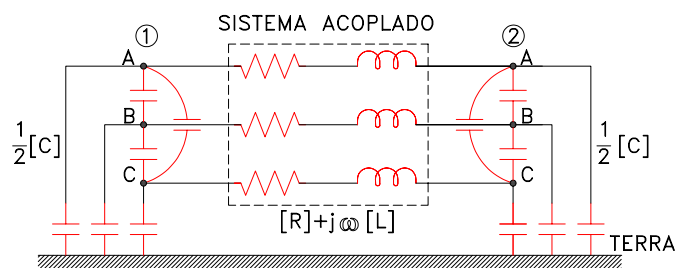


Figura 2 - Modelo II usado na modelagem trifásica

Todas as matrizes são simétricas e são obtidas da seguinte maneira:

- Elementos da diagonal

$R_{ii} + j\omega L_{ii}$  - impedância própria da fase  $i$ .

$C_{ii}$  - soma de todas as capacitâncias no terminal da fase  $i$ .

- Elementos fora da diagonal

$R_{ik} + j\omega L_{ik}$  - impedância mútua entre a fase  $i$  e a fase  $k$ . O valor  $R_{ik}$  será diferente de zero quando a resistividade da terra for diferente de zero (efeito da correção Carson).

2.3 - MODELO II EM CASCATA

Tanto para uma linha com modelagem monofásica como trifásica pode-se usar vários  $\pi$ 's para representar a linha ao invés de utilizar apenas um deles. Pode-se desta maneira, por exemplo, representar trechos de uma linha transposta como mostrado esquematicamente na Figura 3.

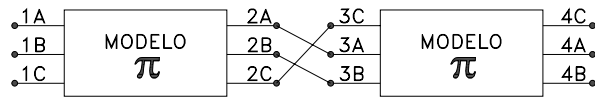


Figura 3 - Modelo II em cascata

3 - MODELAGEM ATRAVÉS DE PARÂMETROS DISTRIBUÍDOS

Da mesma forma vista para modelagem por parâmetros concentrados pode-se usar uma modelagem monofásica e uma modelagem trifásica.

3.1 - MODELAGEM MONOFÁSICA

Pode-se ter dois modelos: um que não considera perdas e outro que considera perdas. Existe ainda um outro modelo de linha citado nas referências e conhecido como modelo sem distorção.

3.1.1 - Modelo Sem Perdas

Desprezando as perdas, as equações que descrevem o comportamento da linha são dadas por:

$$\frac{\partial e}{\partial x} = -L' \frac{\partial i}{\partial t} \tag{1}$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -C' \frac{\partial e}{\partial t} \tag{2}$$

onde  $L'$  e  $C'$  são valores de indutância e capacitância por unidade de comprimento. Com a aplicação do método das características de Bergeron e o método trapezoidal [3, 4, 5] obtêm-se as equações (3) a (6).

$$i_{12}(t) = \frac{1}{Z} e_1(t) + I_1(t-\tau) \tag{3}$$

$$i_{21}(t) = \frac{1}{Z} e_2(t) + I_2(t-\tau) \tag{4}$$

$$I_1(t-\tau) = -\frac{1}{Z} e_2(t-\tau) - i_{21}(t-\tau) \tag{5}$$

$$I_2(t-\tau) = -\frac{1}{Z} e_1(t-\tau) - i_{12}(t-\tau) \tag{6}$$

onde  $\tau$  é o tempo necessário para a propagação da onda para ir do nó 1 ao nó 2 e  $Z$  é a impedância de surto da linha, e são dados por:

$$\tau = \frac{d}{v} = d L' C'$$

$$Z = L' / C'$$

onde  $d$  é o comprimento da linha e  $v$  é a velocidade da onda viajando na linha. Essas equações representam a linha mostrada na Figura 4, e compreendem o circuito equivalente mostrado na Figura 5.

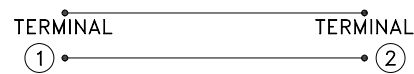


Figura 4 - Represent. da linha de transmissão sem perdas

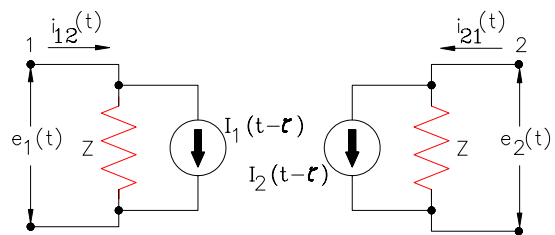


Figura 5 - Circuito equivalente representativo da linha de transmissão sem perdas

Desta forma ao invés de utilizar-se as equações diferenciais, trabalha-se com equações algébricas [1].

3.1.2 - Modelo com perdas (ou com resistência concentrada)

Normalmente em um estudo de sobretensões é conveniente considerar as perdas, já que estas poderão influir nos níveis de tensão. As perdas podem ser inseridas no modelo anterior através da colocação de valores de resistências concentradas. Entre as alternativas possíveis a Figura 6 ilustra uma bastante utilizada [2].

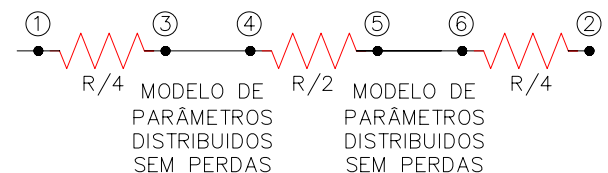


Fig. 6 - Circuito representativo da linha de transmissão com consideração das perdas

Na Figura 6 nota-se que a linha é dividida em duas partes, adotando-se o modelo de parâmetros distribuídos para cada uma delas e concentrando R/4 nos extremos e R/2 no meio das linhas através dos nós adicionais 3, 4, 5 e 6.

Um equacionamento semelhante ao usado para o modelo anterior e com o auxílio do método trapezoidal elimina-se os nós adicionais e obtém-se uma equação que descreve a linha como situada apenas entre os nós 1 e 2.

### 3.2 - MODELAGEM TRIFÁSICA

Na modelagem de linhas trifásicas é necessário levar em consideração o acoplamento entre as fases. Trabalhando-se com quantidades de fases esse tipo de consideração torna-se muito complexo. Dessa forma, usa-se quantidades modais, o que poderia ser considerado equivalente a decompor o sistema trifásico em três sistemas monofásicos de fácil resolução. Ao final do estudo efetua-se o processo inverso e determina-se as quantidades de fases novamente.

Cada um dos três sistemas monofásicos pode ser tratado pela forma definida pela modelagem monofásica: considerando as perdas ou não.

Para este caso têm-se duas situações diferentes: linhas balanceadas e linhas não transpostas.

#### 3.2.1 - Linhas Balanceadas

Linhas balanceadas são linhas onde todos os valores de impedância série e capacitância própria e todos os valores de impedância série e capacitância mútua são iguais. As matrizes são de forma:

$$Z'_{11} \quad Z'_{M} \quad Z'_{M}$$

$$Z'_{M} \quad Z'_{22} \quad Z'_{M} \quad Z'_{11} = Z'_{22} = Z'_{33}$$

$$Z'_{M} \quad Z'_{M} \quad Z'_{33}$$

$$C'_{11} \quad C'_{M} \quad C'_{M}$$

$$C'_{M} \quad C'_{22} \quad C'_{M} \quad C'_{11} = C'_{22} = C'_{33}$$

$$C'_{M} \quad C'_{M} \quad C'_{33}$$

Os índices indicam valores por unidade de comprimento.

Para este tipo de linha a matriz de transformação das quantidades de fase para quantidades modais é definida por Karrembauer [3, 4, 5], e apresenta o mesmo valor para tensão e corrente.

Para linhas balanceadas é usado também a transformação  $\alpha\beta 0$  [6].

#### 3.2.2 - Linhas Não Transpostas

Neste caso a transformação de quantidades de fases em quantidades modais não é tão simples como no caso anterior. A matriz de transformação tanto para tensões como para correntes deve ser obtida para cada linha. Portanto, torna-se necessário calcular autovalores e autovetores para obtenção da matriz de transformação, o que torna o processo mais demorado.

### 4 - MODELAGEM COM PARÂMETROS DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA

Existem basicamente cinco modelos que consideram a variação dos parâmetros com a frequência:

- Modelo Weighting [7]
- Modelo Semlyen [8]
- Modelo Ametani [9]
- Modelo Hauer [6]
- Modelo Marti [10]

Todos os modelos usam o processo de convolução, sendo que a diferença básica entre esses métodos é a forma com que a integral de convolução é calculada.

O desenvolvimento de cada um desses métodos foi feito para suprir falhas do método anterior. O modelo inicialmente desenvolvido foi o Weighting [7], após veio o Semlyen [8]. Já os modelos Ametani [9] e Hauer [6] surgiram da necessidade de solucionar problemas nos dois primeiros. O modelo Marti [10] é o mais recente e ainda não se tem um conhecimento exato do seu comportamento.

### 5 - CONSIDERAÇÕES ACERCA DA UTILIZAÇÃO DE CADA MODELO

O modelo II concentrado pode ser usado para linhas curtas. Pode-se também usar esse modelo em cascata para representar trechos de linhas não transposta nas quais não são muito aceitáveis a suposição de transposição admitida para o modelo de parâmetros distribuídos. Usando-se trechos pequenos de II em cascata pode-se também representar linhas longas transpostas, sendo que as transposições são consideradas de um II para outro na definição dos dados de entrada para o programa, como está mostrado na Figura 3. Além disso, pode-se considerar o efeito dessa transposição representando-a por um elemento adequado [2, 6]. Não existe qualquer critério de definição do número de II's em cascata que deve ser usado para um determinado comprimento de linha, essa escolha deve ser feita em função da experiência do usuário. Recomenda-se não dividir a linha em muitos II's, pois os erros provocados pelo primeiro II

se propagarão através dos outros com tendência a aumentar, principalmente se os II's forem definidos da mesma maneira. Dessa forma os resultados obtidos para a linha serão bem mascarados.

Para o modelo de parâmetros distribuídos deve-se sempre tratar a linha como uma única linha devido aos erros que podem surgir devidos as interpolações a serem feitas caso o tempo de viagem da onda na linha ( $\tau$ ) não ser um múltiplo do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) usado no processo de integração [3, 4].

O modelo de parâmetros distribuídos com resistências concentradas é o modelo mais utilizado e apresenta resultados bastante satisfatórios.

As linhas DC são os melhores exemplos de linhas balanceadas, porém as linhas transpostas são consideradas aproximadamente balanceadas e normalmente utilizam esse modelo com resultados plenamente satisfatórios. O modelo balanceado é satisfatório para estudos de chaveamento, havendo apenas uma exceção segundo a BPA (Boneville Power Administration) e a B.C. Hydro (British Columbia Hydro) o caso da configuração horizontal, mesmo sendo transposta deve ser tratado como uma linha não transposta.

O modelo não transposto produz resultados satisfatórios principalmente em estudos de descargas considerando também o modelo de parâmetros distribuídos sem perdas, já que nesse tipo de estudo considera-se apenas poucas torres. Em estudos de chaveamento para linhas não transpostas deve-se usar o modelo de parâmetros distribuídos com resistência concentrada.

Os modelos de parâmetros dependentes da frequência devem ser usados principalmente em estudos de chaveamento, onde se conheça os valores de seqüência zero, já que a variação de frequência [4, 6] produz maiores alterações nos valores de seqüência zero que nos valores para seqüência positiva. Quando se tem apenas os valores de seqüência positiva é mais conveniente usar o modelo de parâmetros distribuídos com resistência concentrada já que a variação de frequência é menos importante para os parâmetros de seqüência positiva.

O maior inconveniente dos modelos com parâmetros dependentes da frequência reside no fato do processo de solução ser mais lento devido à necessidade de resolver uma integral de convolução. Além disso, embora esses modelos sejam convenientes, os seus resultados ainda não são tão confiáveis como os obtidos através do modelo de parâmetros distribuídos com resistência concentrada que é o modelo mais utilizado. Nesta consideração não se inclui o modelo Marti, sobre o qual ainda não se conhece informações a respeito dos resultados obtidos (não implantado no EMTP, por enquanto).

## 6 - CONCLUSÕES.

Definidos todos esses modelos a escolha sobre qual modelo deve-se usar é baseada nos seguintes critérios:

- Tipo de estudo
- Exatidão desejada

O desenvolvimento de novos modelos é um processo contínuo e surge principalmente da necessidade de suprir problemas e deficiências de modelos já existentes. Além do desenvolvimento de novos modelos que levam em consideração a variação de parâmetros com a frequência como o mais recente o modelo Marti, existe também a tendência a incorporar outros efeitos da linha nesses modelos, como o efeito corona.

Outro problema desses modelos é a verificação dos resultados obtidos. Essa verificação deve ser feita através de comparação com testes de campo e estudos em TNA [11].

Deve-se observar também que em TNA's a representação de sistemas não é muito exata pela dificuldade em se obter um ajuste correto de componentes.

Um outro bom critério de avaliação é a comparação dos modelos com resultados obtidos com outros programas.

## 7 - BIBLIOGRAFIA.

- [1] - OLIVEIRA, A. R. C.; COGO, J. R. - "Aplicação do Método de Integração Trapezoidal em Sistemas Elétricos", Seminário de Pesquisa, EFEI 1983;
- [2] - DOMMEL, H. W.; DOMMELL, I. I. - "Transients Program User's Manual", The University of British Columbia, Vancouver, Canadá, 1976;
- [3] - DOMMEL, H.W. - "A Method for Solving Transient Phenomena in Multiphase Systems", Proceedings Power Systems Computation Conference, 1966;
- [4] - DOMMEL, H. W. - "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, pg 388-395, Abril-1969;
- [5] - DOMMELL, H. W.; MEYER, W. S. - "Computation of Electromagnetic Transients", Proc. IEEE, Vol. 62, pg 983-993, junho, 1974;
- [6] - EMTP User's Manual, BPA, Setembro, 1980;

- [7] - MEYER, W. S.; DOMMEL, H. W. - “Numerical Modeling of Frequency Dependent Transmission Line Parameters in na Electromagnetic Transients Program”, IEEE-PAS Vol. 93 Setembro, 1974;
- [8] - SEMLYEN, A.; DABULEANU, A - “Fast and Accurate with Ground Switching Transients Calculations in Transmission Line with Grounding Returning Recursive Convolutions” IEEE-PAS, Vol. 94, nº 2, Março/Abril, 1975;
- [9] - AMETANI, A. - “A Highly Efficient Method for Calculating Transmission Line Transients”, IEEE-PAS- Vol. 95, nº 5, Setembro/Outubro, 1976;
- [10] - MARTI, J. R. - “Accurate Modelling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations”, IEEE-PAS Vol. 101, janeiro, 1982;
- [11] - Curso de Aplicação do EMTP-Furnas Eletrobrás, Rio de Janeiro - Julho, 1983.