



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos



**Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão
Considerando o Acoplamento entre Linhas
e o Efeito de Transposição**

Trabalho de Conclusão de Curso

Aluno: Ricardo Leite Lins

Orientador: Damásio Fernandes Júnior

Campina Grande, outubro de 2005.



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Departamento de Engenharia Elétrica - DEE
Grupo de Sistemas Elétricos - GSE

**Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão
Considerando o Acoplamento entre Linhas
e o Efeito de Transposição**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para
obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

Ricardo Leite Lins

Ricardo Leite Lins
Aluno

Damásio F. Júnior

Damásio Fernandes Júnior
Orientador

Campina Grande, outubro de 2005.

A Odilon Lins, Betanea, Rodrigo e Renata,
inestimável riqueza em minha vida, que
sempre me motivaram na realização de
meus sonhos.

Agradecimentos

A Deus, que sempre me acompanhou na busca de um sonho.

Ao amigo e orientador, Prof. Damásio Fernandes Júnior, pela satisfação e prazer de compartilhar conhecimentos.

Aos professores do DEE, pela dedicação prestada aos meus conhecimentos.

As madrinhas da Coordenação de Elétrica, Adail e Rosilda, pelo empenho em solucionar minhas dificuldades.

Aos professores do Laboratório de Física Experimental I pela experiência como monitor.

A família, pela presença constante em todos os momentos da realização desse trabalho.

Ao amigo e companheiro, Ramón José de Freitas Pino, pela amizade que construímos nesses cinco anos.

A todos os amigos e companheiros, que de alguma forma contribuíram para a realização desse sonho.

Sumário

Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
1. Apresentação.....	01
2. Programas Utilizados.....	02
2.1 Informações Gerais Sobre o ATP.....	02
2.2 Estudo e Programação em Fortran.....	02
3. Fundamentação Teórica.....	04
3.1 Regime Permanente.....	04
3.2 Circuito Pi Equivalente para Linha de Transmissão Não Transposta.....	06
3.3 Linhas de Transmissão Equilibradas.....	07
3.4 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo.....	11
3.4.1 Esquema de Transposição de Nove Seções de Circuitos Paralelos.....	12
3.4.2 Esquema de Transposição de Três Seções de Circuitos Paralelos.....	14
3.4.2.1 Transposição em Sentido Contrário.....	14
3.4.2.2 Transposição no Mesmo Sentido.....	17
4. Metodologia Implementada.....	18
4.1 Representação de uma Linha de Transmissão por uma Cascata de Circuitos Pi.....	18
4.2 Processo de Redução de Matrizes.....	18

4.3 Obtenção do Circuito Pi Equivalente e Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão.....	20
4.4 Representação dos Parâmetros Próprios e Mútuos em Programas de Fluxo de Potência.....	22
5. Simulações Digitais.....	24
6. Conclusões.....	27
Referências Bibliográficas.....	28

Lista de Figuras

Figura 3.1 – Terminais de uma linha de transmissão na representação como um quadripolo.....	04
Figura 3.2 – Seção do circuito pi nominal.....	06
Figura 3.3 – Circuito pi equivalente de uma linha de transmissão.....	07
Figura 3.4 – Esquema de transposição para um circuito trifásico.....	08
Figura 3.5 – Esquema de transposição de nove seções para uma linha de circuito duplo...	12
Figura 3.6 – Esquema de transposição de três seções (em sentido contrário) para uma linha de circuito duplo.....	15
Figura 3.7 – Esquema de transposição de três seções (no mesmo sentido) para uma linha de circuito duplo.....	17
Figura 4.1 – Conexão em cascata de dois circuitos pi representando uma linha de transmissão com duas seções.....	18
Figura 4.2 – Configuração de um sistema elétrico com a representação dos parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para estudo de fluxo de potência.....	22
Figura 5.1 – Configuração típica de uma linha de transmissão da CHESF de 230 kV em circuito duplo.....	24

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 – Parâmetros próprios de seqüência positiva.....	25
Tabela 5.2 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva.....	25

1. Apresentação

No estudo de cálculo de fluxo de potência é necessário que se saiba precisamente os parâmetros das linhas de transmissão que fazem parte do sistema a ser estudado visto que a grande maioria das simulações geralmente envolve linhas de transmissão como um de seus componentes básicos.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma metodologia para calcular os parâmetros de linhas de transmissão fisicamente próximas, levando em consideração o acoplamento eletromagnético entre linhas de transmissão e a maneira como os circuitos foram transpostos.

Inserindo-se nessa ótica, esse trabalho teve sua motivação na dissertação de mestrado [MONTEIRO, 2004], que trata do cálculo de parâmetros de linhas de transmissão para estudos de fluxo de potência considerando o efeito de outras linhas fisicamente próximas.

Para o cálculo dos parâmetros foi utilizada uma rotina do programa ATP (Alternative Transients Program) [LEUVEN EMTP CENTER, 1987], que faz parte do EMTP (Electromagnetic Transients Program) [DOMMEL, 1996], o qual é uma classe de programas de cálculo de transitórios eletromagnéticos.

Por fim, será apresentada a configuração de uma linha de circuito duplo com os seus parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva, levando-se em consideração o efeito de transposição das linhas.

2. Programas Utilizados

2.1 Informações Gerais Sobre o ATP

O ATP é um programa do tipo EMTP que permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método de características para elementos com parâmetros distribuídos e na regra trapezoidal para parâmetros concentrados.

Com esse tipo de programa é possível representar elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, não linearidades, etc [AMON FILHO e PEREIRA, 1994].

No ATP existe uma rotina interna auxiliar, conhecida como "LINE CONSTANTS", que é utilizada para o cálculo dos parâmetros de linhas de transmissão. Esta rotina calcula as matrizes, em componentes simétricas ou de fase, das resistências, indutâncias e capacitâncias de uma configuração arbitrária de cabos aéreos, de uma ou mais linhas de transmissão.

2.2 Estudo e Programação em Fortran

O Fortran [PRESS et al, 1992] será empregado para a obtenção do circuito equivalente de seqüência positiva da linha de transmissão que leva em conta o acoplamento entre linhas e o efeito de transposição.

Utilizando-se de uma rotina computacional já existente, a linha de transmissão é representada por uma cascata de circuitos π , através das matrizes de admitâncias de transferência e derivação para cada circuito π , considerando a maneira como o circuito foi transposto. Em seguida, a cascata é reduzida a um único circuito π equivalente cujas

matrizes são transformadas para componentes simétricos. Dessa forma, os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva são utilizados na representação de linhas de transmissão.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Regime Permanente

Para linhas de transmissão com circuitos paralelos cujas tensões são iguais ou superiores a 230 kV devemos levar em conta o efeito do acoplamento eletrostático e eletromagnético entre os dois circuitos por que a partir desse nível de tensão ambos passam a ter importante relevância no cálculo de parâmetros. Sendo assim, no cálculo das matrizes de impedância série e admitância em derivação estes acoplamentos não devem ser desprezados a menos que a distância entre os circuitos seja considerável.

A solução das equações gerais que determinam as tensões e correntes nos terminais de uma linha de transmissão é apresentada segundo o quadripolo da Figura (3.1):

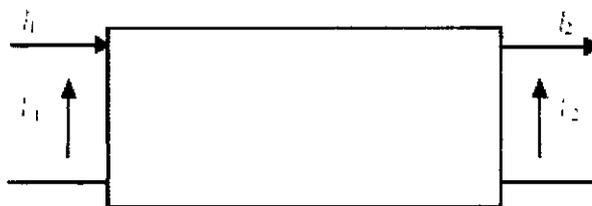


Figura 3.1 – Terminais de uma linha de transmissão na representação como um quadripolo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Em que,

Z_c é a impedância característica;

$\gamma = \alpha + j\beta$ é a constante de propagação;

α é a constante (ou fator) de atenuação;

β é a constante de fase (ou de distorção);

l é o comprimento da linha de transmissão.

Ao multiplicar os parâmetros de linha, que são definidos por unidade de comprimento, pelo comprimento l da linha, tem-se:

$$Zl = l (R_{\text{pos}} + jX_{\text{pos}})$$
$$Yl = l (G_{\text{pos}} + j\omega C_{\text{pos}}),$$

Sendo,

R_{pos} a resistência de seqüência positiva por unidade de comprimento, em Ω/km ;

X_{pos} é a reatância de seqüência positiva por unidade de comprimento, em Ω/km ;

G_{pos} é a condutância de seqüência positiva por unidade de comprimento, em S/km ;

C_{pos} é a capacitância de seqüência positiva por unidade de comprimento, em F/km .

A impedância característica e a constante de propagação são dadas por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Zl}{Yl}} \quad \text{e} \quad \gamma.l = \sqrt{Zl.Yl}.$$

Em estudos de regime permanente, as linhas de transmissão geralmente são modeladas segundo duas analogias: o circuito pi nominal e o circuito pi exato.

- *Circuito Pi Nominal*: a linha de transmissão é representada por resistores, indutores e capacitores, através de uma cascata de seções pi como ilustrado na Figura (3.2). Seus parâmetros, impedância série e admitância em derivação, são determinados por unidade de comprimento multiplicado pelo comprimento total da linha de transmissão.

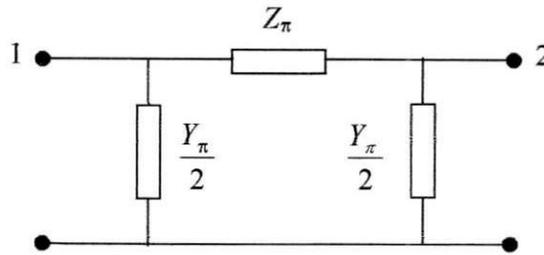


Figura 3.2 – Seção do circuito pi nominal.

- *Circuito Pi Exato*: a linha de transmissão é representada de forma exata por resistores, indutores e capacitores, através de uma única seção pi. Seus parâmetros, impedância série e admitância em derivação, são determinados a partir de equações hiperbólicas (Equação (3.2)).

$$Z_{\pi} = Z^* l \frac{\sinh(\gamma^* l)}{\gamma^* l} \quad \text{e} \quad \frac{Y_{\pi}}{2} = \left(\frac{\gamma^* l}{2} \right)^* \frac{\tanh\left(\frac{\gamma^* l}{2}\right)}{\left(\frac{\gamma^* l}{2}\right)} \quad (3.2)$$

3.2 Circuito Pi Equivalente para Linha de Transmissão Não Transposta

Para efeitos de estudo, representamos uma linha de transmissão por um conjunto de circuitos pi equivalentes, tal como mostrado na Figura (3.2), que descreve as condições de regime permanente nos terminais da linha.

O circuito pi equivalente para um linha multifásica é caracterizado por uma matriz de admitâncias de transferência $[Y_{transf}]$ do terminal 1 para o terminal 2 e uma matriz de admitâncias em derivação $[Y_{deriv}]$ em ambos os terminais, conforme pode ser observado na Figura (3.3).

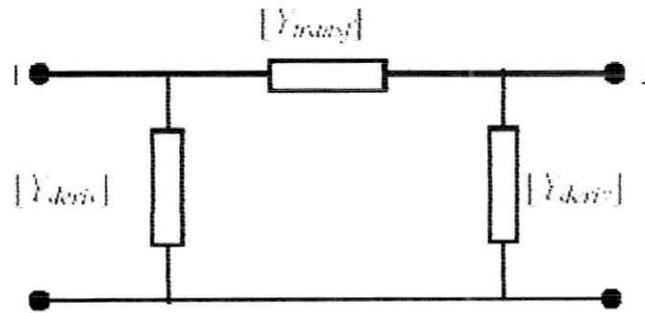


Figura 3.3 – Circuito pi equivalente de uma linha de transmissão

O que corresponde a seguinte equação nodal:

$$\begin{bmatrix} [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] & -[Y_{transf}] \\ -[Y_{transf}] & [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Sabendo que $[V_1]$, $[V_2]$, $[I_1]$, $[I_2]$ são vetores de tensão e corrente nos terminais de uma seção pi equivalente, se a linha possui m fases, então $[Y_{transf}]$ e $[Y_{deriv}]$ são matrizes $m \times m$ e a Equação (3.3) é um sistema de $2m$ equações.

3.3 Linhas de Transmissão Equilibradas

Uma maneira de se definir uma linha de transmissão equilibrada é quando todos os elementos da diagonal principal das matrizes $[Z'_{fase}]$ e $[C'_{fase}]$ são iguais entre si, e todos os elementos fora da diagonal principal são iguais entre si,

$$[Z'_{fase}] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & \dots & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & \dots & Z'_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_m & Z'_m & \dots & Z'_s \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[C'_{fase}] = \begin{bmatrix} C'_s & C'_m & \dots & C'_m \\ C'_m & C'_s & \dots & C'_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C'_m & C'_m & \dots & C'_s \end{bmatrix}$$

No caso real, em que essa definição não se aplica satisfatoriamente, uma linha de transmissão torna-se aproximadamente equilibrada quando se utiliza o artifício da transposição, conforme figura abaixo.

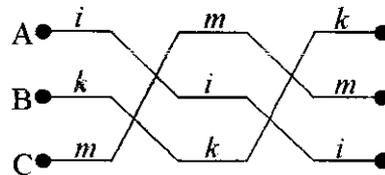


Figura 3.4 – Esquema de transposição para um circuito trifásico

No esquema de transposição da Figura (3.4), um ciclo completo do esquema de transposição foi realizado com três seções e o seu comprimento deve ser menor que o comprimento de onda da linha de transmissão na frequência envolvida para o estudo que está sendo realizado.

Se o comprimento de um ciclo de transposição é muito menor que um comprimento de onda da linha de transmissão, as impedâncias séries podem ser calculadas como a média das impedâncias nas três seções e as capacitâncias em derivação também podem ser calculadas como a média das três seções [DOMMEL, 1996].

Nesse caso, o cálculo para as impedâncias da linha de transmissão é dado por

$$\begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left[\begin{bmatrix} Z'_{ii} & Z'_{ik} & Z'_{im} \\ Z'_{ki} & Z'_{kk} & Z'_{km} \\ Z'_{mi} & Z'_{mk} & Z'_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{mm} & Z'_{mi} & Z'_{mk} \\ Z'_{im} & Z'_{ii} & Z'_{ik} \\ Z'_{km} & Z'_{ki} & Z'_{kk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{kk} & Z'_{km} & Z'_{ki} \\ Z'_{mk} & Z'_{mm} & Z'_{mi} \\ Z'_{ik} & Z'_{im} & Z'_{ii} \end{bmatrix} \right] \quad (3.5)$$

Sendo,

$$Z'_s = \frac{1}{3}(Z'_{ii} + Z'_{kk} + Z'_{mm}) \quad \text{e} \quad Z'_m = \frac{1}{3}(Z'_{ik} + Z'_{km} + Z'_{mi}) \quad (3.6)$$

Em que,

Z_s' – impedância própria

Z_m' – impedância mútua

Analogamente ao cálculo de impedâncias de linha de transmissão, realizamos o processo de cálculo para as capacitâncias em derivação.

A determinação das tensões e correntes de uma linha trifásica equilibrada pode ser estudada mais facilmente se realizada através de componentes simétricas, porque as três equações no domínio de fase,

$$-\left[\frac{dV_{fase}}{dx}\right] = \begin{bmatrix} Z_s' & Z_m' & Z_m' \\ Z_m' & Z_s' & Z_m' \\ Z_m' & Z_m' & Z_s' \end{bmatrix} [I_{fase}] \quad (3.7)$$

tornam-se três equações desacopladas em componentes simétricas,

$$\begin{aligned} \frac{-dV_0}{dx} &= Z_0' I_0 \\ \frac{-dV_+}{dx} &= Z_+' I_+ \\ \frac{-dV_-}{dx} &= Z_-' I_- \end{aligned} \quad (3.8)$$

em que os símbolos “0”, “+” e “-” representam as seqüências zero, positiva e negativa, respectivamente. Sendo assim, entende-se que um sistema trifásico pode ser estudado como se fossem três sistemas monofásicos.

As componentes simétricas podem ser obtidas das quantidades de fases através da seguinte transformação linear

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

sendo,

$$[S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \text{ com } a = e^{j120^\circ}. \quad (3.10)$$

A transformação inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

em que [S] tem a forma:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

A Equação (3.8) pode ser facilmente verificada transformando-se a Eq. (3.7) do domínio da fase para o domínio das componentes simétricas, através da seguinte transformação:

$$-\left[\frac{dV_{sim}}{dx} \right] = [S]^{-1} [Z'_{fase}] [S] [I_{sim}] = [Z'_{sim}] [I_{sim}] \quad (3.13)$$

Tendo como resultado a seguinte forma:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} Z'_s + 2Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_s - Z'_m & 0 \\ 0 & 0 & Z'_s - Z'_m \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

em que os elementos da matriz são definidos como:

Z_s' – impedância própria;

Z_m' – impedância mútua;

$Z_0' = Z_s' + 2 Z_m'$ – componente de seqüência zero

$Z_+ = Z_- = Z_s' - Z_m'$ – componentes de seqüência positiva e negativa

3.4 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo

Foi visto que para o caso trifásico as impedâncias série e as capacitâncias em derivação poderiam ser calculadas como a média das três seções. Para o caso de circuito duplo o processo da média das seções é o mesmo, exceto que as matrizes agora serão 6x6. As matrizes em componentes simétricas são obtidas a partir de:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} [S]^{-1} & 0 \\ 0 & [S]^{-1} \end{bmatrix} [Z'_{fase}] \begin{bmatrix} [S] & 0 \\ 0 & [S] \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

sendo $[S]^{-1}$ e $[S]$ definidas conforme as equações (3.10) e (3.12), respectivamente.

Em circuitos paralelos podem existir acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos entre circuitos. Por exemplo, correntes de seqüência positiva em um circuito podem induzir tensões de seqüência positiva ou negativa no outro circuito dependendo do esquema de transposição [DOMMEL, 1996].

3.4.1 Esquema de Transposição de Nove Seções de Circuitos Paralelos

Em seções anteriores vimos que para uma linha de transmissão tornar-se aproximadamente equilibrada dever-se-ia utilizar o artifício da transposição.

Nesta seção, mostramos o esquema de transposição de nove seções da Figura 3.5, cujo desempenho em termos de desacoplamento de uma seqüência com outra é o melhor dentre os esquemas de transposição estudados.

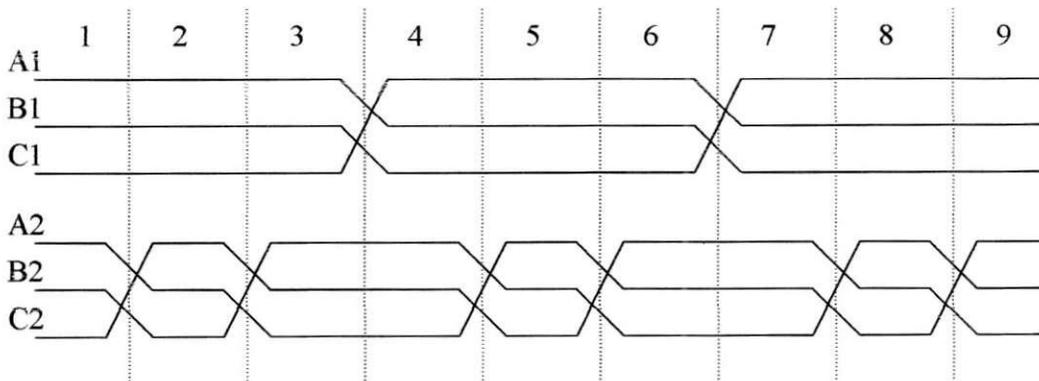


Figura 3.5 – Esquema de transposição de nove seções para uma linha de circuito duplo.

A média das impedâncias das nove seções é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{9} \{ [Z'_{fasedaprimeiraseção}] + [Z'_{fasedasegundaseção}] + \dots + [Z'_{fasedanonaseção}] \} \quad (3.16)$$

ou, em forma matricial,

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ \hline Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

em que os elementos de $[Z'_{fase}]$ foram calculados como:

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} & Z'_{m1} &= Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \\ Z'_{p2} &= Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} & Z'_{m2} &= Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64} \end{aligned} \quad (3.18)$$

e

$$Z'_m = Z'_{14} + Z'_{15} + Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{25} + Z'_{26} + Z'_{34} + Z'_{35} + Z'_{36} \quad (3.19)$$

com as seguintes definições:

Z'_{p1} : impedância própria do circuito 1

Z'_{p2} : impedância própria do circuito 2

Z'_m : impedância mútua entre os circuitos, sabendo-se que $Z'_{ik} = Z'_{ki}$.

Transformando em componentes simétricas através da transformação (3.15),
obtem-se:

$$[Z'_{sim}] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{Z'_{p1} + 2Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_m}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} + 2Z'_{m2}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} \end{array} \right] \quad (3.20)$$

A Equação (3.20) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & 0 \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Pode-se observar que o esquema de transposição da Figura 3.5, desacopla perfeitamente as quantidades de seqüência positiva e negativa em cada circuito trifásico e também entre os circuitos, exceto para a seqüência zero.

3.4.2 Esquema de Transposição de Três Seções de Circuitos Paralelos

Foi visto anteriormente que o esquema de transposição de nove seções é o esquema que melhor desacopla as componentes simétricas, no entanto, a um custo muito alto com oito torres de transposição. Mais adiante, veremos um esquema no qual são necessárias apenas duas torres de transposição, porém a um custo no desacoplamento das componentes simétricas.

3.4.2.1 Transposição em Sentido Contrário

Outra forma de se minimizar o acoplamento de uma seqüência com outra é aquela em que a rotação das fases do circuito 2 se dá na direção oposta a do circuito 1, como na Figura 3.6, cujo resultado é um esquema de transposição mais simples e econômico. Contudo, continua existindo o acoplamento de uma seqüência de um circuito com a mesma seqüência do outro circuito. Em outras palavras, uma corrente de seqüência positiva no circuito 2 induzirá uma queda de tensão de seqüência positiva no circuito 1, mas correntes de seqüência positiva não produzirão quedas de tensão nas componentes de seqüência zero ou negativa [MONTEIRO et al, 2005].

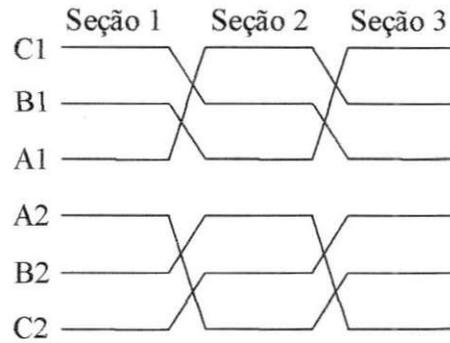


Figura 3.6 – Esquema de transposição de três seções (em sentido contrário) para uma linha de circuito duplo.

Desprezando-se o efeito capacitivo, a média da matriz de impedância das três seções é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_k & Z'_l & Z'_m \\ Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_m & Z'_k & Z'_l \\ Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_l & Z'_m & Z'_k \\ \hline Z'_k & Z'_m & Z'_l & Z'_{p2} & Z'_{m2} & Z'_{m2} \\ Z'_l & Z'_k & Z'_m & Z'_{m2} & Z'_{p2} & Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_l & Z'_k & Z'_{m2} & Z'_{m2} & Z'_{p2} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

em que os elementos de $[Z'_{fase}]$ foram calculados como:

$$Z'_{p1} = Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} \quad Z'_{m1} = Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \quad (3.23)$$

$$Z'_{p2} = Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} \quad Z'_{m2} = Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64}$$

e

$$\begin{aligned} Z'_k &= Z'_{14} + Z'_{25} + Z'_{36} \\ Z'_l &= Z'_{15} + Z'_{26} + Z'_{34} , \\ Z'_m &= Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{35} \end{aligned} \quad (3.24)$$

com as seguintes definições:

Z'_{p1} : impedância própria do circuito 1

Z'_{p2} : impedância própria do circuito 2

Z'_{m1} : impedância mútua do circuito 1

Z'_{m2} : impedância mútua do circuito 2

Transformando em componentes simétricas através da transformação (3.15),
obtém-se:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} \frac{Z'_{p1} + 2Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + Z'_l + Z'_m}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + a^2Z'_l + aZ'_m}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + aZ'_l + a^2Z'_m}{3} \\ \hline \frac{Z'_k + Z'_l + Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} + 2Z'_{m2}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_k + aZ'_l + a^2Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_k + a^2Z'_l + aZ'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

A Equação (3.25) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

A Equação (3.26) indica que existe um acoplamento para cada seqüência entre os circuitos 1 e 2.

3.4.2.2 Transposição no Mesmo Sentido

Se a rotação de fases do circuito 2 é realizada na mesma direção do circuito 1, como na Figura 3.7, o resultado em componentes simétricas apresentará algumas diferenças, comparadas com a Equação (3.26), conforme a Equação (3.27), em que “X” representa um valor diferente de zero. A Equação (3.27) indica que correntes de seqüência positiva em um circuito induzem queda de tensão de seqüência negativa no outro circuito. Portanto, mudanças no esquema de transposição como na Figura 3.7 criarão leves desequilíbrios.

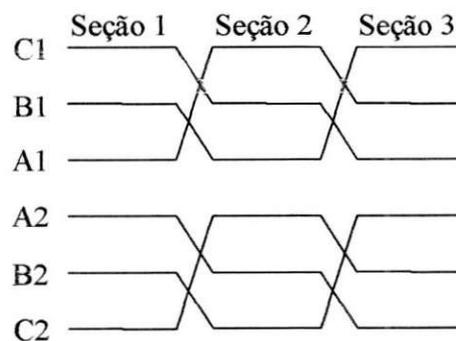


Figura 3.7 – Esquema de transposição de três seções (no mesmo sentido) para uma linha de circuito duplo.

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ \hline X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

4. Metodologia Implementada

4.1 Representação de uma Linha de Transmissão por uma Cascata de Circuitos Pi

Em estudos de fluxo de potência, a representação de uma linha de transmissão é feita por uma cascata de circuitos pi, onde cada pi representa uma seção de linha entre duas torres de transposição. A Figura 4.1 ilustra a conexão de dois circuitos pi, representando uma linha com duas seções.

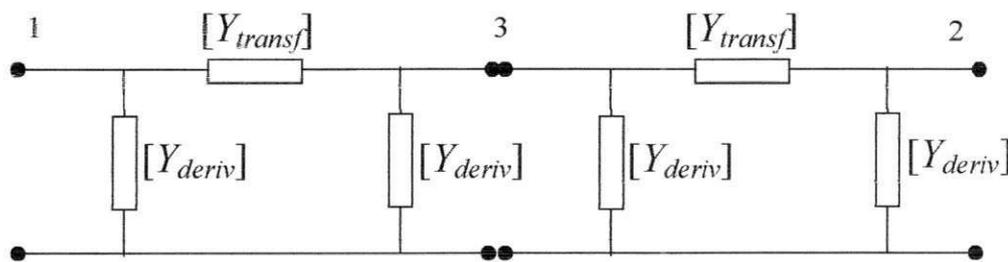


Figura 4.1 – Conexão em cascata de dois circuitos pi representando uma linha de transmissão com duas seções.

A metodologia apresentada neste trabalho mostra que é possível através de uma transformação delta-estrela em cada circuito pi de uma conexão em cascata com duas seções, reduzir um sistema de $3m$ equações nodais em um sistema com $2m$ equações.

4.2 Processo de Redução de Matrizes

Inicialmente, consideremos o seguinte sistema de equações lineares

$$[A][x] = [b] \quad (4.1)$$

sendo $[A]$ uma matriz $n \times n$ e $[b]$ um vetor com n componentes. Os valores são divididos nos subconjuntos 1 e 2. A matriz $[A]$ é dividida da forma correspondente, ou seja,

$$\begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [x_1] \\ [x_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b_1] \\ [b_2] \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) também pode ser escrita como,

$$[A_{11}][x_1] + [A_{12}][x_2] = [b_1] . \quad (4.3a)$$

$$[A_{21}][x_1] + [A_{22}][x_2] = [b_2] . \quad (4.3b)$$

Resolvendo a Equação (4.3b) para $[x_2]$, tem-se:

$$- [A_{22}]^{-1} [A_{21}][x_1] + [A_{22}]^{-1}[b_2] = [x_2] . \quad (4.4)$$

Substituindo a Equação (4.4) na Equação (4.3a) obtém-se,

$$[A_{11}][x_1] - [A_{12}][A_{22}]^{-1} [A_{21}][x_1] + [A_{12}] [A_{22}]^{-1}[b_2] = [b_1] . \quad (4.5)$$

A Equação (4.5) representa o sistema reduzido de equações para o subconjunto 1 e pode ser escrita conforme a expressão a seguir:

$$\{ [A_{11}] - [A_{12}][A_{22}]^{-1} [A_{21}] \} [x_1] = [b_1] - [A_{12}] [A_{22}]^{-1}[b_2] . \quad (4.6)$$

Finalmente,

$$[A_{11}^{reduzida}][x_1] = [b_1] + [D_{12}][b_2] . \quad (4.7)$$

Em que

$$[A_{11}^{reduzida}] = [A_{11}] - [A_{12}][A_{22}]^{-1} [A_{21}] . \quad (4.8)$$

$$[D_{12}] = -[A_{12}] [A_{22}]^{-1}. \quad (4.9)$$

Para um sistema de equações lineares com uma matriz simétrica $[A]$ $n \times n$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} & \vdots & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mm} & \vdots & \cdots & A_{mn} \\ \hline & \cdots & & & \cdots & \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} & \vdots & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Nesse processo, as variáveis x_{m+1}, \dots, x_n são eliminadas e a matriz $[A]$ é reduzida para a dimensão $m \times m$. Após a execução, a matriz original é substituída nas primeiras m linhas e colunas pela matriz $[A_{11}^{\text{reduzida}}]$ de acordo com a Equação (4.7). O resultado final é:

$$\begin{bmatrix} [A_{11}^{\text{reduzida}}] & -[D_{12}] \\ \hline -[D_{12}]^T & [A_{22}]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

4.3 Obtenção do Circuito Pi Equivalente e Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão

Assim, foi desenvolvida uma rotina computacional em Fortran para obtenção e cálculo de parâmetros de linha de transmissão, para uma linha com n circuitos pi entre os

nós 1 e 2 considerando o efeito da transposição e do acoplamento. O algoritmo pode ser descrito como segue abaixo:

1. Entrar com as matrizes de admitâncias de transferência e derivação para cada circuito pi com sua transposição, obtidas a partir da rotina de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão do programa ATP;
2. Montar a matriz de admitância entre os dois primeiros circuitos pi;
3. Calcular os circuitos pi equivalente;
4. Montar a matriz de admitância entre o equivalente obtido e o próximo circuito pi. Retornar para o passo 3;
5. Repetir os passos 3 e 4 até o final da cascata;
6. Calcular as matrizes de admitâncias de transferência e derivação do circuito pi equivalente, reduzido entre os nós 1 e 2;
7. Transformar as matrizes de admitâncias de transferência e derivação em componentes simétricas, de acordo com a Equação (3.15).

Em linhas de transmissão de circuito duplo, o segundo e o quinto elementos da diagonal principal da matriz de admitância de transferência em componentes simétricas invertidos diz respeito a impedância de seqüência positiva do circuito 1 e do circuito 2, respectivamente.

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

A impedância mútua de seqüência positiva entre o circuito 1 e o circuito 2 é determinada a partir do elemento localizado na 2ª linha e 5ª coluna da matriz de admitâncias de transferência em componentes simétricas, conforme pode ser observado da Equação (4.12). Para a determinação da impedância mútua de seqüência positiva entre o circuito 2 e o circuito 1, utiliza-se o elemento da 5ª linha e 2ª coluna [MONTEIRO et al, 2005].

4.4 Representação dos Parâmetros Próprios e Mútuos em Programas de Fluxo de Potência

Neste trabalho a representação de parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva em programas de fluxo de potência é realizada de acordo com a configuração do sistema elétrico mostrado na Figura 4.2.

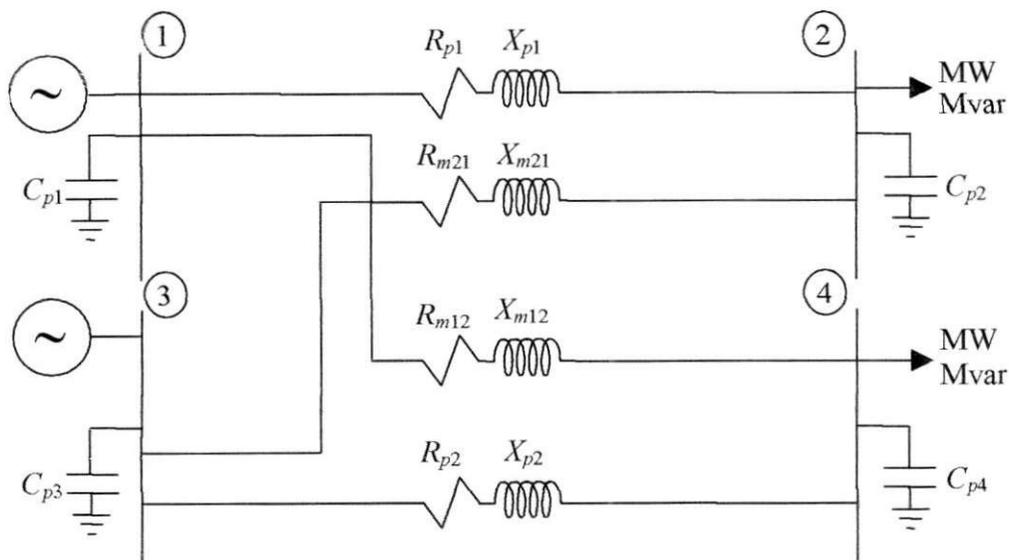


Figura 4.2 – Configuração de um sistema elétrico com a representação dos parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para estudo de fluxo de potência.

Da literatura consultada, observou-se que nas configurações típicas do sistema elétrico não se representava o efeito do acoplamento entre linhas de transmissão fisicamente próximas como descrito na Figura (4.2). Assim, considerou-se as resistências e reatâncias próprias do circuito 1 (R_{p1} e X_{p1}) e do circuito 2 (R_{p2} e X_{p2}) como na literatura

vigente, e foi acrescentado dois ramos com resistências e reatâncias mútuas, um entre os circuitos 1 e 2 (R_{m12} e X_{m12}) e o outro entre os circuitos 2 e 1 (R_{m21} e X_{m21}) para estudos de fluxo de potência em linhas de transmissão com forte acoplamento. Essa consideração adicional provavelmente representará de forma mais adequada o acoplamento entre linhas de transmissão fisicamente próximas.

5. Simulações Digitais

As simulações digitais realizadas dizem respeito à configuração de uma linha de transmissão da CHESF com tensão de 230 kV e extensão de 300km em circuito duplo, conforme Figura 5.1 para o esquema de transposição de três seções.

Condutores de Fase: $R_{dc} = 0,098 \Omega/\text{km}$; Diâmetro: 2,515 cm

Condutores dos Cabos Pára-Raios: $R_{dc} = 0,605 \Omega/\text{km}$; Diâmetro: 0,934 cm

Comprimento da Linha: 300 km ; Resistividade do Solo: 457 $\Omega.\text{m}$

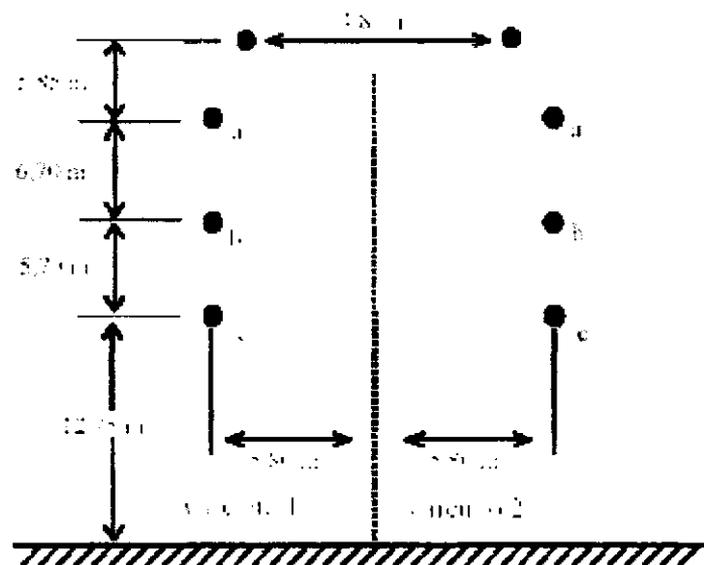


Figura 5.1 – Configuração típica de uma linha de transmissão da CHESF de 230 kV em circuito duplo.

Para tanto, nossas simulações foram baseadas nos esquemas de transposição das Figuras 3.6 e 3.7. Assim, os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva obtidos através da rotina computacional já existente de acordo com o esquema de transposição foram representados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

Tabela 5.1 – Parâmetros próprios de seqüência positiva.

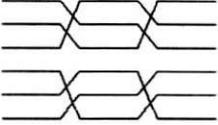
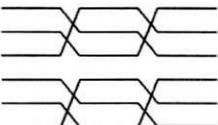
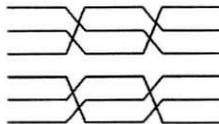
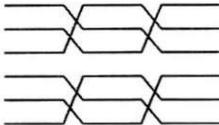
Esquema de Transposição	Circuito 1				Circuito 2			
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$C(\mu F)$ esquerda	$C(\mu F)$ direita	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$C(\mu F)$ esquerda	$C(\mu F)$ direita
 Sentido contrário	27,0	143,1	1,344	1,290	27,0	143,1	1,308	1,302
 Mesmo sentido	27,0	143,1	1,311	1,416	27,0	143,1	1,308	1,302

Tabela 5.2 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva.

Esquema de transposição	Entre os circuitos 1 e 2		Entre os circuitos 2 e 1	
	$R(k\Omega)$	$X(k\Omega)$	$R(k\Omega)$	$X(k\Omega)$
 Sentido contrário	2,083	5,979	2,088	5,932
 Mesmo sentido	3,300	9,283	3,243	9,281

Observando-se a Tabela 5.1 verificou-se algumas alterações nas capacitâncias em derivação visto que estas dependem da geometria das linhas de transmissão. Por outro lado, observando-se a Tabela 5.2 verificou-se que as impedâncias mútuas de seqüência positiva entre os circuitos 1 e 2 eram diferentes para ambos os esquemas de transposição, o que

poderia resultar em fluxos de potência reativa bastante distintos em um estudo de fluxo de cargas.

A inclusão de parâmetros mútuos de seqüência positiva tende a tornar mais realista o cálculo de fluxo de potência, especialmente em situações em que haja forte acoplamento entre as linhas de transmissão.

6. Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia simples, no entanto, inovadora para o processo de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão de circuito duplo considerando o efeito do acoplamento magnético e a maneira como os circuitos foram transpostos.

Inicialmente, o ATP foi utilizado como ferramenta para modelar as linhas de transmissão, considerando-se a geometria da linha para se obter os parâmetros que descrevem as condições de regime permanente de cada seção π da linha.

Posteriormente, uma rotina em Fortran foi utilizada para se obter o circuito π equivalente de seqüência positiva de uma linha de transmissão polifásica a partir de uma cascata de seções π , cujas seções foram reduzidas, dois a dois, a uma única seção π independente do número de circuitos π .

Por fim, representou-se o acoplamento dos parâmetros de seqüência positiva utilizados em programas de fluxo de potência na forma de uma linha de transmissão entre a barra emissora do circuito 1 e a barra receptora do circuito 2.

Como resultados da metodologia apresentada neste trabalho, verificou-se que os parâmetros mútuos de seqüência positiva entre as linhas de transmissão acopladas podem ter efeitos significativos em estudos de fluxo de potência. Assim, a utilização da metodologia proposta nos permite obter resultados mais confiáveis para o cálculo de fluxo de potência em estudos que possuam forte acoplamento entre linhas de transmissão.

É importante salientar ainda que dando continuidade ao trabalho realizado, será desenvolvido em outro TCC uma interface gráfica e algumas mudanças na rotina Fortran existente, de tal modo a tornar o processo de cálculo de parâmetros de seqüência positiva mais dinâmico e amigável ao usuário.

Referências Bibliográficas

AMON FILHO, J e PEREIRA, M. P. *ATP - Alternative Transients Program - Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*, São Paulo, outubro 1994.

DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Second Edition, Vancouver B. C., Canada, April 1996.

LEUVEN EMTP CENTER. *ATP - Alternative Transients Program - Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.

MONTEIRO, J. S. *Cálculo dos Parâmetros de Linhas de Transmissão para Estudos de Fluxo de Potência Considerando o Efeito de Outras Linhas Fisicamente Próximas*, Dissertação de Mestrado, UFCG, julho 2004.

MONTEIRO, J. S., NEVES, W. L. A., FERNANDES Jr., D., SOUZA, B. A., FERNANDES, A. B. "Computation of Transmission Line Parameters for Power Flow Studies", *Proceedings of the 18th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Saskatoon, Canada, 2005.

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T. and FLANNERY, B. P. *Numerical Recipes in Fortran - The Art of Scientific Computing*. Second Edition. New York: Cambridge University Press, 1992.

