



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

**Linhas de Transmissão com Acoplamento Mútuo:  
Cálculo de Parâmetros para Estudos de  
Fluxo de Carga**

**Trabalho de Conclusão de Curso**

**Aluno: Marcus Vinícius de Medeiros Nóbrega  
Orientador: Damásio Fernandes Júnior**

**Campina Grande  
Outubro de 2008**



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

## Linhas de Transmissão com Acoplamento Mútuo: Cálculo de Parâmetros para Estudos de Fluxo de Carga

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentada 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.*

---

Marcus Vinícius de Medeiros Nóbrega  
Aluno

---

Damásio Fernandes Júnior  
Orientador

Campina Grande  
Outubro de 2008

## *Agradecimentos*

A Deus que me deu saúde e forças estando sempre comigo nos momentos difíceis.

Ao professor e orientador Damásio Fernandes Júnior, por passar com clareza os conhecimentos necessários para a realização deste trabalho, pela disponibilidade e pela paciência.

Ao colega Wilker Victor, pelo auxílio prestado à realização das simulações digitais necessárias para concretização deste trabalho.

Aos meus amados pais, Vandick e Margarida, e minha irmã Vannucia, pelo apoio, amor e incentivo incondicionais, me estimulando a superar com sucesso todas as dificuldades nestes cinco anos de curso .

A minha irmã Vanessa, que compartilhou comigo todos os bons e maus momentos em Campina Grande, sendo sempre carinhosa, atenciosa e prestativa.

A minhas queridas tias, Terezinha e Matilde, pela dedicação e apoio mostrado durante esses cinco anos de jornada.

A minha namorada Leila e todos os meus amigos, um sincero obrigado por serem honestos e verdadeiros, sempre me incentivando a lutar para a realização desse sonho.

# *Sumário*

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Motivação</b>	<b>3</b>
<b>1.2 Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
<b>2.1 Representações de uma Linha de Transmissão em Regime Permanente</b>	<b>6</b>
<b>2.2 Linhas de Transmissão Equilibradas</b>	<b>8</b>
<b>2.3 Esquema de Transposição de Três Seções com Circuitos Paralelos</b>	<b>9</b>
<b>2.4 Circuito pi Equivalente para Linhas de Transmissão Não Transpostas</b>	<b>11</b>
<b>3. METODOLOGIA IMPLEMENTADA</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Redução de Matrizes</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Obtenção do Circuito pi Equivalente e Determinação dos Parâmetros de Linhas de Transmissão</b>	<b>15</b>
<b>4. SOFTWARES UTILIZADOS</b>	<b>16</b>
<b>4.1 ATP - Alternative Transients Program</b>	<b>16</b>
<b>4.2 GSE</b>	<b>16</b>
<b>4.2.1 Descrição do Software</b>	<b>16</b>
<b>4.2.2 Entrada de Dados</b>	<b>17</b>
<b>4.2.3 Utilizando o GSE</b>	<b>18</b>
<b>4.3 Power World® Simulator</b>	<b>21</b>
<b>5. SIMULAÇÕES E ESTUDO DE CASOS</b>	<b>21</b>
<b>5.1 Estudo de Casos</b>	<b>21</b>
<b>5.2 Obtenção dos Parâmetros das Linhas de Transmissão</b>	<b>23</b>
<b>5.3 Simulações do Fluxo de Potência</b>	<b>26</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b>	<b>31</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>32</b>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Em meados de 1990, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) deparou-se com um problema localizado na área norte do seu sistema de transmissão, onde está situada a região metropolitana de Fortaleza. Tal área apresentou um aumento considerável em suas cargas, tornando-se necessário checar várias alternativas de reforço ao atendimento às cargas daquela região. A solução mais adequada do ponto de vista técnico-econômico foi a implantação de dois circuitos entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza concebidos para operar em circuito duplo horizontal, com dois cabos por fase, cujos condutores foram dispostos na estrutura típica da Figura 1.1 [MONTEIRO, 2004].

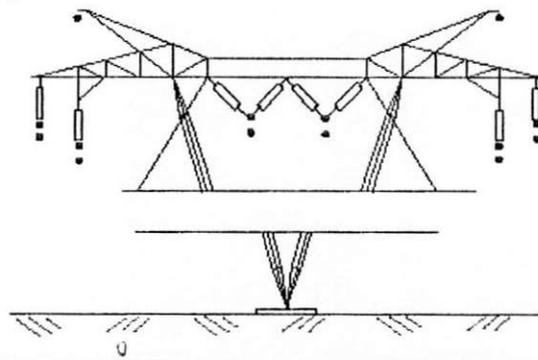


Figura 1.1 – Estrutura típica da linha de transmissão 2x230 kV transformável para 500 kV.

Este trecho da linha de transmissão foi denominado "LT transformável" por começar a operar na tensão nominal de 230 kV, no entanto montado em uma estrutura de 500 kV. Em seguida estes circuitos operariam na tensão nominal de 500 kV através do rearranjo dos condutores, resultando em um circuito simples de 500 kV com quatro condutores por fase, conforme Figura 1.2 [MONTEIRO, 2004].

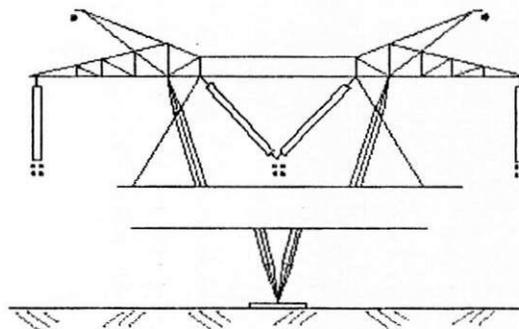


Figura 1.2 – Estrutura típica da linha de transmissão na tensão nominal de 500 kV.

Em 1996, a região metropolitana de Fortaleza era abastecida por cinco circuitos a partir de Paulo Afonso, conforme ilustra a Figura 1.3 [MONTEIRO, 2004].

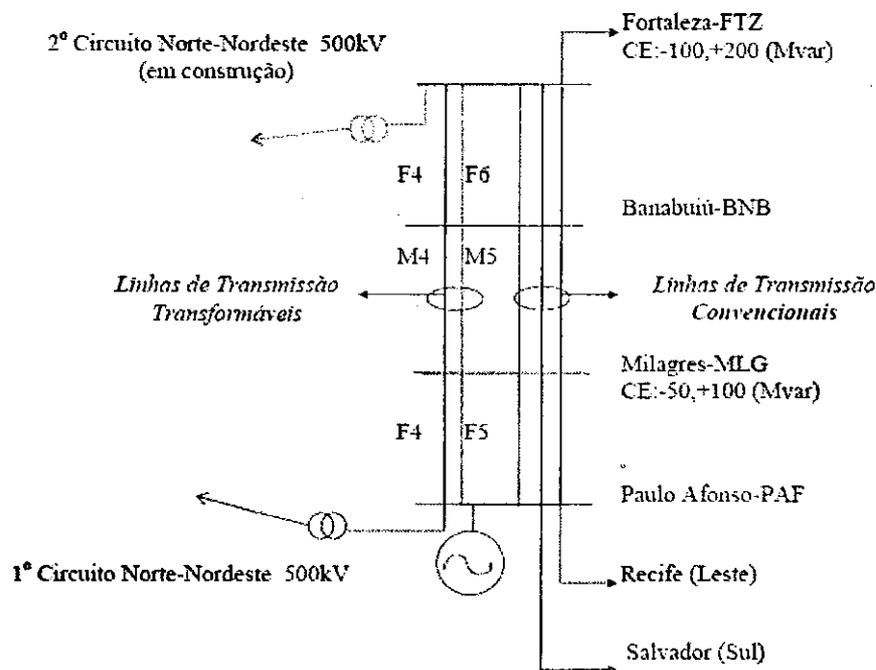
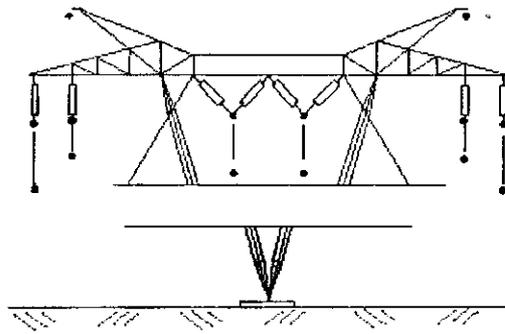


Figura 1.3 – Atendimento à região metropolitana de Fortaleza na tensão de 230 kV.

Também em 1996, ano previsto para o período de transformação, verificou-se que seria possível suprir os requisitos do sistema de transmissão, levando em conta que a linha de transmissão interligando as subestações de Presidente Dutra e Fortaleza (segundo circuito da interligação Norte-Nordeste), entraria em operação antes do início da transformação.

Devido a vários adiamentos do segundo circuito da interligação Norte-Nordeste e o crescimento da carga da região na faixa de 12% ao ano, tornou-se crítico o atendimento àquela região, resultando em sobrecarga nos três circuitos mais antigos entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, mostrando a necessidade de se buscar uma solução mais rápida para o problema. Em agosto de 1996, tal cenário incentivou a aplicação da técnica de feixe expandido (FEX) na linha transmissão transformável, quando esta ainda operava na tensão nominal de 230 kV, de acordo com a Figura 1.4 [MONTEIRO, 2004].



**Figura 1.4 – Arranjo da linha de transmissão transformável com feixe expandido.**

A aplicação da tecnologia de FEX na linha de transmissão transformável acarretou numa redução na reatância série e num aumento de aproximadamente 25 % na potência transportada na linha de transmissão. Tal aumento de potência ocorreu em função da altura de segurança da torre estar prevista para uma tensão de operação de 500 kV, havendo uma folga bem considerável para a operação em 230 kV.

Após alguns meses de operação da tecnologia, notou-se divergências entre as grandezas obtidas em estudos e as encontradas em medições de campo, com relação ao fluxo de potência reativa e a tensão de terminal aberto [RÈGIS Jr. et al, 1999]. Uma análise cuidadosa levou à conclusão de que seria necessária a inclusão do efeito do acoplamento entre linhas de transmissão fisicamente próximas bem como o esquema de transposição dos circuitos para estudos de fluxo de carga nos programas convencionais de fluxo de potência.

## **1.2 Objetivos**

O objetivo desse trabalho é apresentar uma metodologia simples e genérica para obtenção de um circuito pi equivalente polifásico de uma linha de transmissão, que leve em consideração o efeito do acoplamento e o esquema de transposição da linha para estudos de fluxo de carga.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Representações de uma Linha de Transmissão em Regime Permanente

Considerando uma linha de transmissão monofásica ou polifásica equilibrada, representada pelo quadripolo da Figura 2.1, pode-se obter as equações gerais entre as tensões e correntes de seus terminais da seguinte forma:

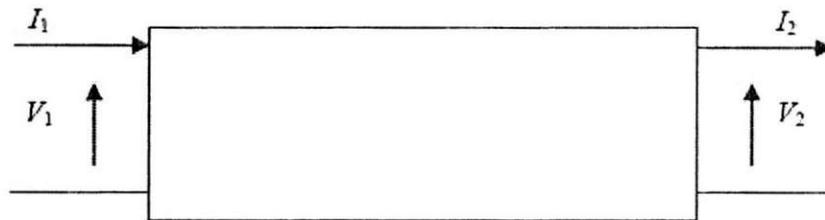


Figura 2.1 – Terminais de uma linha de transmissão na representação como quadripolo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Os parâmetros A, B, C e D da matriz de segunda ordem podem ser obtidos sob duas formas, dependendo da maneira como a linha de transmissão for modelada. São elas:

- **Circuito  $\pi$  nominal:** É a forma mais aplicada na representação de linhas de transmissão curtas (até 80 km) e médias (80-240 km), para uma frequência de rede operando em 60 Hz. No circuito  $\pi$  nominal, a linha de transmissão é representada por resistores, indutores e capacitores, geralmente através de uma cascata de seções  $\pi$  como ilustrado na Figura 2.2. A impedância em série e a admitância em derivação são obtidas a partir dos parâmetros por unidade de comprimento, multiplicados pelo comprimento total da linha.

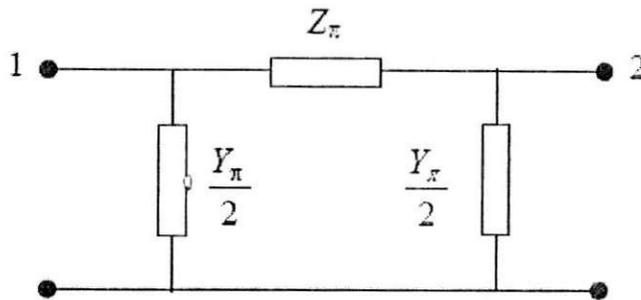


Figura 2.2 – Seção do circuito pi nominal.

As equações gerais entre as tensões e correntes dos terminais da linha com seus respectivos parâmetros ABCD são dadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y_\pi Z_\pi}{2} & Z_\pi \\ Y_\pi \left( 1 + \frac{Y_\pi Z_\pi}{4} \right) & 1 + \frac{Y_\pi Z_\pi}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Onde:

$$Z_\pi = Z_l = l (R_{pos} + jX_{pos})$$

$$Y_\pi = Y_l = l (G_{pos} + j\omega C_{pos})$$

Considerando que:

$l$  é o comprimento da linha de transmissão em km;

$R_{pos}$  é a resistência de seqüência positiva por unidade de comprimento, em  $\Omega/\text{km}$ ;

$X_{pos}$  é a reatância de seqüência positiva por unidade de comprimento, em  $\Omega/\text{km}$ ;

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

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

- **Circuito  $\pi$  exato:** É a forma mais aplicada na representação de linhas de transmissão longas (até 240 km) para uma frequência de rede operando em 60 Hz. No Circuito  $\pi$  exato, a linha de transmissão é representada de forma exata por resistores, indutores e capacitores, contendo uma única seção pi. Para o circuito pi exato, os parâmetros são obtidos da solução das equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico de linhas de transmissão longas, resultando em equações hiperbólicas.

As equações gerais entre as tensões e correntes dos terminais da linha com seus respectivos parâmetros ABCD são dadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Onde:

$$Z_c = \sqrt{\frac{Zl}{Yl}}$$

$$\gamma l = \sqrt{Zl \cdot Yl}$$

$$Z_\pi = Zl \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l}$$

$$\frac{Y_\pi}{2} = \left(\frac{\gamma l}{2}\right) \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}$$

Em que:

$Z_c$  é a impedância característica;

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

$\alpha$  é a constante (ou fator) de atenuação;

$\beta$  é a constante de fase (ou de distorção);

$l$  é o comprimento da linha de transmissão.

## 2.2 Linhas de Transmissão Equilibradas

Considera-se uma linha de transmissão equilibrada quando esta apresenta todos os elementos da diagonal principal da matriz impedância de transferência  $[Z_{fase}]$  iguais entre si assim como todos os elementos fora da diagonal. A Figura 2.3 mostra um exemplo de transposição em três seções com duas torres.

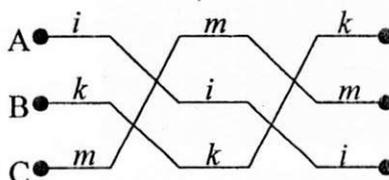


Figura 2.3 – Esquema de transposição para um circuito trifásico.

Para efeito de simplificação, assumindo desprezíveis os efeitos capacitivos, a matriz  $[Z'_{fase}]$  é calculada como uma média das matrizes impedâncias de cada seção da linha, ou seja:

$$\begin{bmatrix} Z'_p & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_p & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_p \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left[ \begin{bmatrix} Z'_{ii} & Z'_{ik} & Z'_{im} \\ Z'_{ki} & Z'_{kk} & Z'_{km} \\ Z'_{mi} & Z'_{mk} & Z'_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{mm} & Z'_{mi} & Z'_{mk} \\ Z'_{im} & Z'_{ii} & Z'_{ik} \\ Z'_{km} & Z'_{ki} & Z'_{kk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{kk} & Z'_{km} & Z'_{ki} \\ Z'_{mk} & Z'_{mm} & Z'_{mi} \\ Z'_{ik} & Z'_{im} & Z'_{ii} \end{bmatrix} \right] \quad (2.4)$$

Sendo:

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

equivalentes às impedâncias própria e mútua respectivamente, da linha de transmissão, onde cada elemento entre parênteses com o mesmo subscrito é uma auto-impedância por unidade de comprimento, multiplicado pelo comprimento total da linha. Os elementos com subscritos distintos são impedâncias mútuas.

### 2.3 Esquema de Transposição de Três Seções com Circuitos Paralelos

Na prática, circuitos paralelos apresentam acoplamento eletrostático e eletromagnético entre si, resultando na possibilidade de correntes de seqüência positiva de um circuito induzir tensões de seqüência positiva ou negativa do outro circuito dependendo do esquema de transposição. O acoplamento de uma seqüência com outra pode ser minimizado aplicando o esquema de transposição da Figura 2.4 [DOMMEL, 1996], onde ocorre a rotação oposta de fases de cada circuito. Porém, o acoplamento de mesma seqüência entre os dois circuitos ainda existe, ou seja, uma corrente de seqüência positiva de um circuito 1 induzirá uma tensão de seqüência positiva do circuito 2, mas correntes de seqüência positiva não poderão induzir tensões de seqüências negativa ou zero.

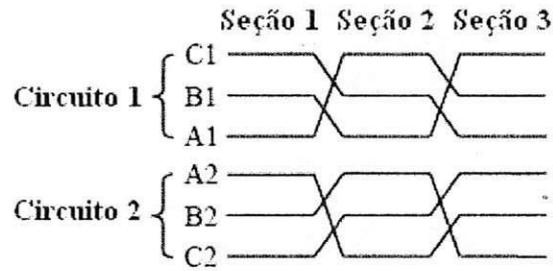


Figura 2.4 – Esquema de transposição de três seções para uma linha de circuito duplo.

Desprezando o efeito capacitivo, a média da matriz impedância de três seções da linha de transmissão é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_k & Z'_l & Z'_m \\ Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_m & Z'_k & Z'_l \\ Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_l & Z'_m & Z'_k \\ \hline Z'_k & Z'_m & Z'_l & Z'_{p2} & Z'_{m2} & Z'_{m2} \\ Z'_l & Z'_k & Z'_m & Z'_{m2} & Z'_{p2} & Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_l & Z'_k & Z'_{m2} & Z'_{m2} & Z'_{p2} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} & Z'_{m1} &= Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \\ Z'_{p2} &= Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} & Z'_{m2} &= Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64} \\ Z'_k &= Z'_{14} + Z'_{25} + Z'_{36} & Z'_l &= Z'_{15} + Z'_{26} + Z'_{34} \\ Z'_m &= Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{35} \end{aligned}$$

Onde:

- $Z'_{p1}$ : 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 a Equação (2.5) em componentes simétricos obtém-se:

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

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \left[ \begin{array}{ccc|ccc} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{array} \right] \quad (2.6)$$

Sendo:

$$[S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ e } [S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}, \text{ com } a = e^{j120^\circ}, \text{ as matrizes de}$$

transformação e transformação inversa de Fortescue, respectivamente.

Os subscritos "0", "+" e "-" representam as seqüências zero, positiva e negativa, respectivamente. A Equação (2.6) mostra a existência de acoplamento para cada seqüência entre os circuitos 1 e 2. O acoplamento pode não ser recíproco, conforme as Equações (2.7).

$$\left. \begin{aligned} Z'_{++12} &= \frac{Z'_k + a^2 + aZ'_m}{3} \\ Z'_{--12} &= \frac{Z'_k + a + a^2Z'_m}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Essa ocorrência é devido à aplicação de componentes simétricos trifásicos a circuitos polifásicos [DOMMEL, 1996].

#### 2.4 Circuito pi Equivalente para Linhas de Transmissão Não Transpostas

Conforme mostrado na seção 2.1, uma linha de transmissão operando em regime permanente pode ser representada por um circuito pi equivalente. Este é caracterizado por uma matriz de admitâncias de transferência  $[Y_{transf}]$  do terminal 1 (emissor) para o terminal 2

(receptor) e uma matriz de admitâncias em derivação  $[Y_{deriv}]$  em ambos os terminais conforme mostrado na Figura 2.5.

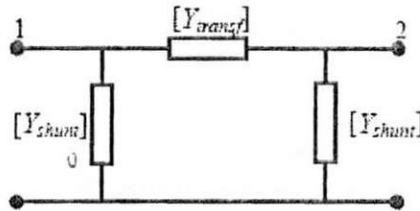


Figura 2.5 - Circuito pi equivalente de uma linha de transmissão não transposta.

Pode-se escrever a seguinte equação nodal com estas matrizes:

$$\begin{bmatrix} [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] & -[Y_{transf}] \\ -[Y_{transf}] & [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Sendo  $[V_1]$ ,  $[V_2]$ ,  $[I_1]$  e  $[I_2]$  vetores de tensão e corrente nos terminais. Se a linha tem  $m$  fases, então  $[Y_{transf}]$  e  $[Y_{deriv}]$  são matrizes  $m \times m$  e a Equação (2.8) é um sistema de  $2m$  equações.

### 3. METODOLOGIA IMPLEMENTADA

No estudo de fluxo de potência, uma linha de transmissão polifásica com várias seções de transposição é representada por uma conexão em cascata de circuitos pi, onde cada circuito pi corresponde a uma seção da linha entre as torres de transposição. A Figura 3.1 [MONTEIRO et al., 2005] mostra a conexão de dois circuitos pi, representando uma linha com duas seções. A cada dois circuitos pi, é possível eliminar o nó interno, transformando um sistema de  $3m$  equações em um sistema de  $2m$  equações.

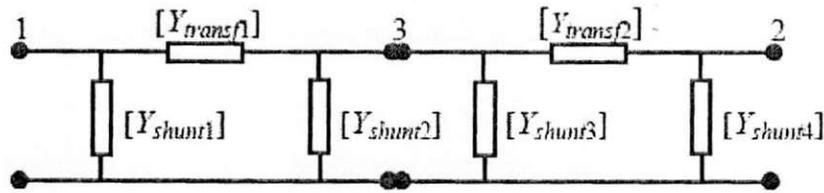


Figura 3.1 – Representação de circuitos pi conectados em cascata para uma linha de transmissão.

#### 3.1 Redução de Matrizes

Considere o sistema de equações lineares:

$$[A][x]=[b]. \quad (3.1)$$

Sendo  $[A]$  uma matriz quadrada de ordem  $n$  e  $[b]$  um vetor com  $n$  componentes. Dividindo os vetores nos subconjuntos 1 e 2, a matriz  $[A]$  é dividida de forma correspondente, ou seja [MONTEIRO et al., 2005]:

$$\begin{bmatrix} [A_{11}] & [A_{12}] \\ [A_{21}] & [A_{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [x_1] \\ [x_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [b_1] \\ [b_2] \end{bmatrix}. \quad (3.2)$$

A Equação (3.2) também pode ser escrita como,

$$\begin{aligned} [A_{11}][x_1] + [A_{12}][x_2] &= [b_1]. \\ [A_{21}][x_1] + [A_{22}][x_2] &= [b_2]. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Resolvendo a Equação (3.3) para  $[x_2]$ , tem-se:

$$[A_{22}]^{-1}[A_{21}][x_1] + [A_{22}]^{-1}[b_2] = [x_2]. \quad (3.4)$$

Substituindo a Equação (3.4) em (3.2) obtém-se:

$$[A_{11}][x_1] - [A_{12}][A_{22}]^{-1}[A_{21}][x_1] + [A_{12}][A_{22}]^{-1}[b_2] = [b_1]. \quad (3.5)$$

A Equação (3.5) representa o sistema reduzido de equações para o subconjunto 1 e pode ser escrita conforme a expressão a seguir:

$$\{[A_{11}] - [A_{12}][A_{22}]^{-1}[A_{21}]\}[x_1] = [b_1] - [A_{12}][A_{22}]^{-1}[b_2] \quad (3.6)$$

Finalmente,

$$[A_{11}^{reduzida}][x_1] = [b_1] + [D_{12}][b_2]. \quad (3.7)$$

Em que

$$[A_{11}^{reduzida}] = [A_{11}] - [A_{12}][A_{22}]^{-1}[A_{21}] \quad (3.8)$$

e

$$[D_{12}] = -[A_{12}][A_{22}]^{-1}. \quad (3.9)$$

Para um sistema de equações lineares com uma matriz simétrica  $[A]_{n \times n}$ ,

$$\begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} & \vdots & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mm} & \vdots & \cdots & A_{mn} \\ \hline \vdots & \cdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} & \vdots & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Neste 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  $[A_{11}^{reduzida}]$  de acordo com a Equação (3.11). O resultado final é:

$$\begin{bmatrix} [A_{11}^{reduzida}] & -[D_{12}] \\ \hline -[D_{12}]^T & [A_{22}]^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_m \\ b_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ b_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

### 3.2 Obtenção do Circuito $\pi$ Equivalente e Determinação dos Parâmetros de Linhas de Transmissão

O algoritmo a seguir descreve a obtenção o circuito  $\pi$  equivalente de uma cascata com  $n$  circuitos  $\pi$  entre os terminais de uma linha de transmissão (nós 1 e 2) , além de calcular os parâmetros de uma linha de transmissão considerando os efeitos de transposição e acoplamento [FERNANDES Jr. et al., 2006]:

1. Entrar com as matrizes de admitâncias de transferência e derivação para cada circuito  $\pi$ ;
2. A partir de um dos terminais da linha, geralmente o emissor, calcular a matriz de admitância equivalente entre as primeiras duas seções conectadas do circuito  $\pi$ ;
3. Calcular os parâmetros do circuito  $\pi$  equivalente;
4. Montar as matrizes de admitâncias de transferência e derivação entre o circuito equivalente obtido e o próximo circuito  $\pi$ ;
5. Repetir os passos 3 e 4 até a última seção do circuito  $\pi$ , quando o terminal receptor da linha for alcançado;
6. Calcular as matrizes de admitância de transferência e derivação do circuito  $\pi$  equivalente reduzido entre os nós 1 e 2;
7. Fazer a transformação das matrizes de admitâncias de transferência e derivação em componentes simétricas. Esta etapa não é necessária se um programa de fluxo de carga polifásico for utilizado.

Numa linha de circuito duplo, os segundo e quinto elementos invertidos da diagonal principal da matriz de admitâncias de transferência em componentes simétricas são considerados a impedância de seqüência positiva do circuito 1 e do circuito 2, respectivamente. Da mesma forma, pode-se obter as admitâncias em derivação de seqüência positiva para os circuitos 1 e 2.

A impedância mútua de seqüência positiva entre os circuitos 1 e 2 é determinada pelo elemento localizado na 2ª linha e 5ª coluna da matriz de admitâncias de transferência em componentes simétricas. Já para a impedância mútua de seqüência positiva entre os circuitos 2 e 1, usa-se o elemento da 5ª linha e 2ª coluna.

O circuito equivalente proposto para representar a linha de transmissão nas simulações de fluxo de potência está mostrado na Figura 4.2 [MONTEIRO, 2004].

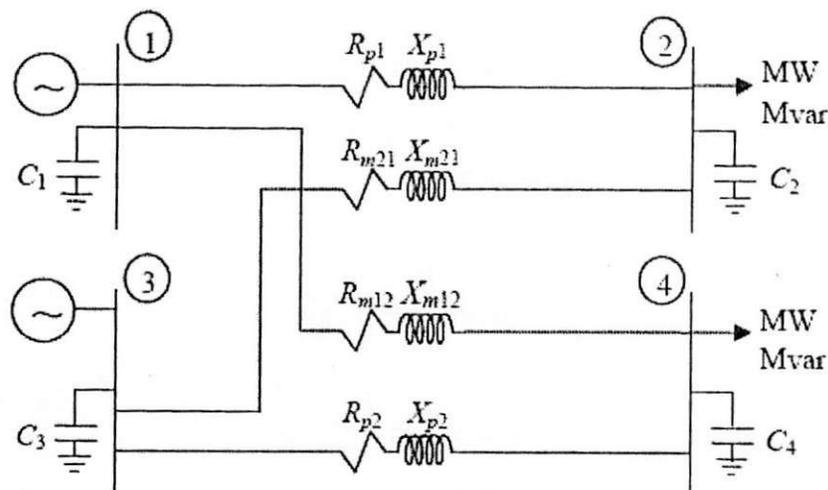


Figura 3.2 - Representação para os parâmetros próprios e mútuos de uma linha de circuito duplo em estudos de fluxo de potência.

Os elementos que possuem subscritos que comecem com a letra  $p$  são elementos próprios, já os que possuem subscritos que comecem com a letra  $m$  são os elementos mútuos entre os circuitos.

## 4. SOFTWARES UTILIZADOS

### 4.1 ATP - Alternative Transients Program

O software ATP - Alternative Transients Program [LEUVEN EMTP CENTER, 1987] é uma ferramenta de grande importância e flexibilidade na realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, permitindo a representação detalhada da linha de transmissão através das características dos condutores e suas respectivas disposições geométricas nas torres de transmissão, além da modelagem das diversas manobras e defeitos que afetam o mesmo, buscando uma aproximação com uma situação real.

### 4.2 GSE

#### 4.2.1 Descrição do Software

Software desenvolvido pelo Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) na Universidade Federal de Campina Grande tem por finalidade calcular os vários parâmetros de uma linha

de transmissão de circuito duplo, considerando os efeitos do acoplamento entre os circuitos e o modo de como estes foram transpostos.

#### 4.2.2 Entrada de Dados

O GSE utiliza como entrada de dados as matrizes de admitâncias de transferência  $[Y_{transf}]$  e derivação  $[Y_{deriv}]$  que determinam os parâmetros da linha de transmissão, onde ambas possuem dimensão 6x6, pois são oriundas de uma linha de transmissão trifásica de circuito duplo, e são matrizes simétricas. Tanto a matriz de admitância de transferência quanto a de admitância em derivação foram calculadas a partir do software ATP após o modelamento da linha de transmissão em estudo. O arquivo referente a essa entrada apresenta o formato “.dat” e é exemplificado na Figura 4.1 [CARDOSO, 2006].

```

3.089757E-03
-1.611256E-02
-9.625895E-04 3.419348E-03
3.785541E-03 -1.681875E-02
-1.869219E-04 -6.570090E-04 3.485901E-03
2.008715E-03 3.274344E-03 -1.635848E-02
3.798519E-06 -4.046098E-05 -4.487442E-05 3.485901E-03
1.412049E-03 1.645587E-03 2.109159E-03 -1.635848E-02
-2.079932E-04 -1.927159E-04 -4.046098E-05 -6.570090E-04 3.419348E-03
1.829771E-03 1.817250E-03 1.645587E-03 3.274344E-03 -1.681875E-02
-4.454561E-04 -2.079932E-04 3.798519E-06 -1.869219E-04 -9.625895E-04 3.089757E-03
2.402726E-03 1.829771E-03 1.412049E-03 2.008715E-03 3.785541E-03 -1.611256E-02
9.445770E-08
2.967989E-04
-5.392130E-09 9.073851E-08
-5.006743E-05 2.966031E-04
1.599262E-08 -4.408641E-10 9.756121E-08
-1.901340E-05 -4.574622E-05 2.898991E-04
1.975416E-08 1.396130E-08 1.686335E-08 9.756121E-08
-9.892871E-06 -1.668846E-05 -2.303509E-05 2.898991E-04
1.191465E-08 7.931078E-09 1.396130E-08 -4.408641E-10 9.073851E-08
-1.583235E-05 -1.986115E-05 -1.668846E-05 -4.574622E-05 2.966031E-04
1.246784E-08 1.191465E-08 1.975416E-08 1.599262E-08 -5.392130E-09 9.445770E-08
-1.933178E-05 -1.583235E-05 -9.892871E-06 -1.901340E-05 -5.006743E-05 2.967989E-04
3.485901E-03
-1.635848E-02
-1.869219E-04 3.089757E-03
2.008715E-03 -1.611256E-02
-6.570090E-04 -9.625895E-04 3.419348E-03
3.274344E-03 3.785541E-03 -1.681875E-02
3.798519E-06 -4.454561E-04 -2.079932E-04 3.089757E-03
1.412049E-03 2.402726E-03 1.829771E-03 -1.611256E-02
-4.487442E-05 3.798519E-06 -4.046098E-05 -1.869219E-04 3.485901E-03
2.109159E-03 1.412049E-03 1.645587E-03 2.008715E-03 -1.635848E-02
-4.046098E-05 -2.079932E-04 -1.927159E-04 -9.625895E-04 -6.570090E-04 3.419348E-03
1.645587E-03 1.829771E-03 1.817250E-03 3.785541E-03 3.274344E-03 -1.681875E-02
9.756121E-08
2.898991E-04
1.599262E-08 9.445770E-08
-1.901340E-05 2.967989E-04
-4.408641E-10 -5.392130E-09 9.073851E-08
-4.574622E-05 -5.006743E-05 2.966031E-04
1.975416E-08 1.246784E-08 1.191465E-08 9.445770E-08
-9.892871E-06 -1.933178E-05 -1.583235E-05 2.967989E-04

```

Figura 4.1 – Matriz de entrada da rotina computacional oriunda do ATP.

Além do arquivo “.dat” proveniente do ATP, existem ainda duas variáveis de entrada no programa: o número de circuitos pi da linha de transmissão e o comprimento da linha em quilômetros.

#### 4.2.3 Utilizando o GSE

Na Figura 4.2 é mostrada a tela principal do software GSE [CARDOSO, 2006].

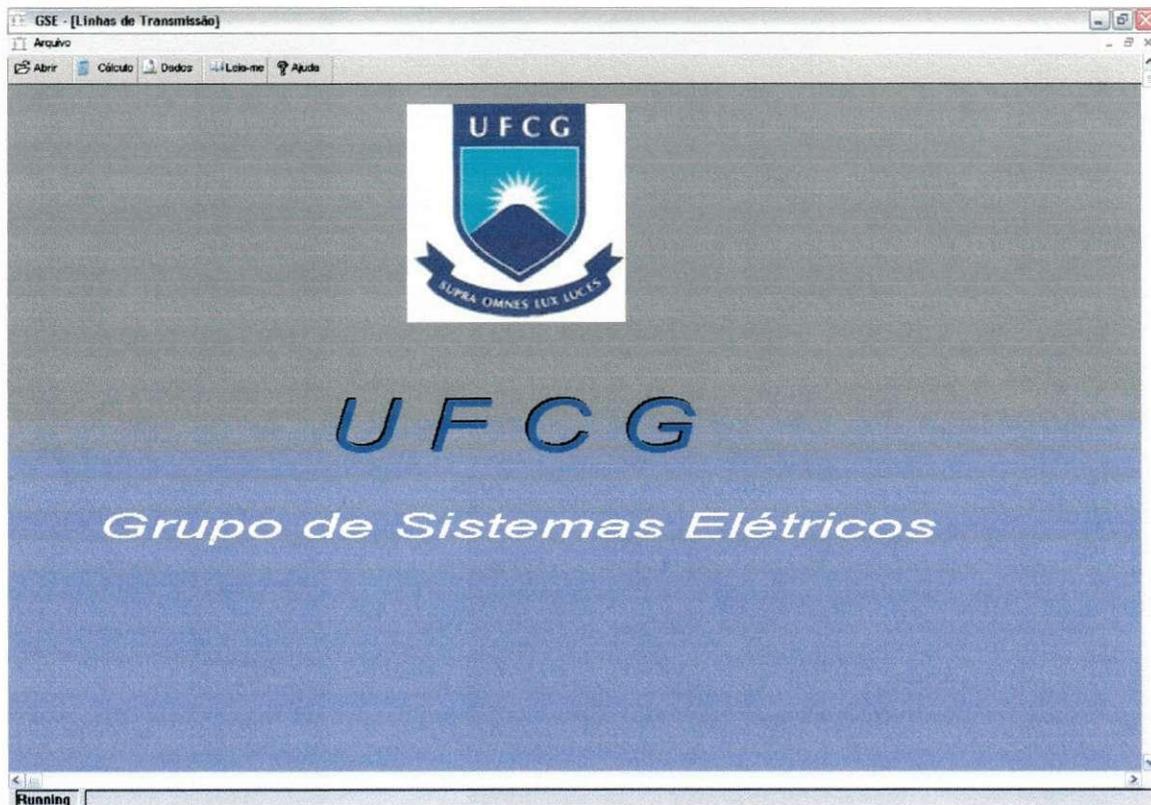


Figura 4.2 – Tela principal do software GSE.

A seguir é mostrado como utilizar o software passo a passo [CARDOSO, 2006].

1. Carregue o arquivo de entrada desejado antes de executar a rotina de cálculo através do menu *Arquivo* → *1 – Abrir o Arquivo de Entrada vindo do ATP* ou através do botão “*Abrir*”, conforme ilustra a Figura 4.3;

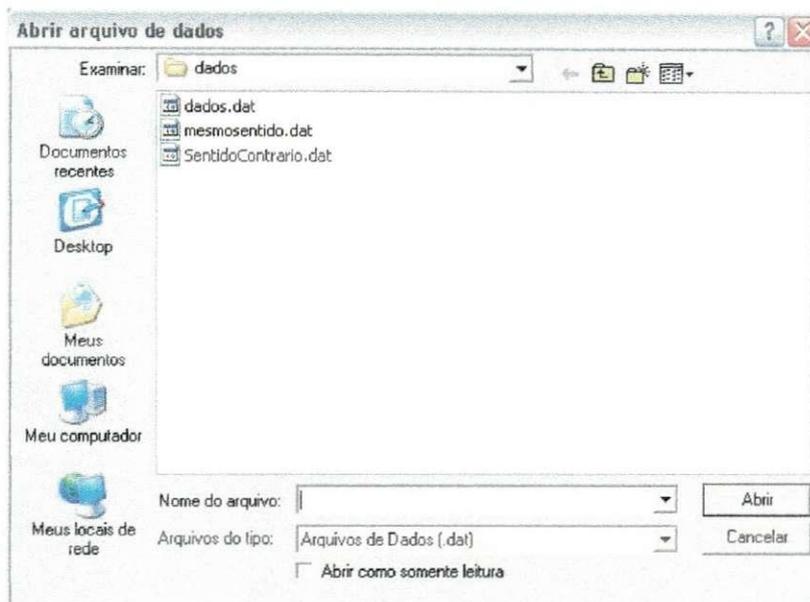


Figura 4.3 – Janela de abertura do arquivo de entrada do software GSE.

2. Agora o programa está apto a realizar os cálculos, que podem ser feitos através do menu *Arquivo* → 2 - *Cálculo da Matriz 6x6 de componentes simétricas de um circuito trifásico duplo* ou através do botão “*Cálculo*”. Aparecem então, as variáveis de entrada citadas abaixo conforme a Figura 4.4;

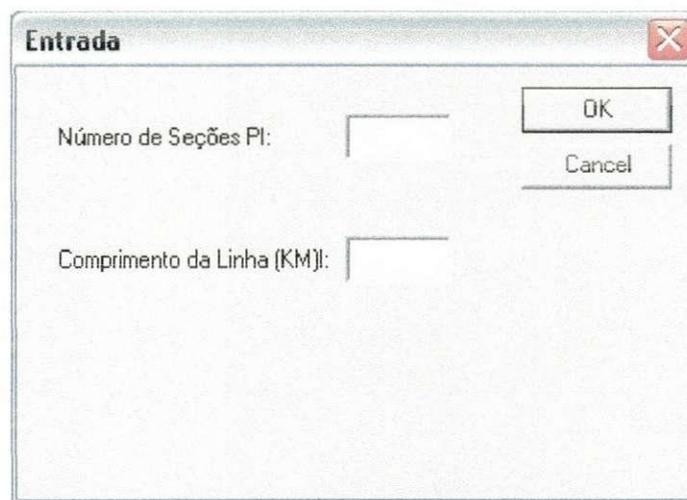


Figura 4.4 – Variáveis de Entrada do software GSE.

2. Inserido o número de seções pi e o comprimento da linha, outra janela aparecerá, perguntando o que o usuário deseja visualizar, conforme ilustra a Figura 4.5;

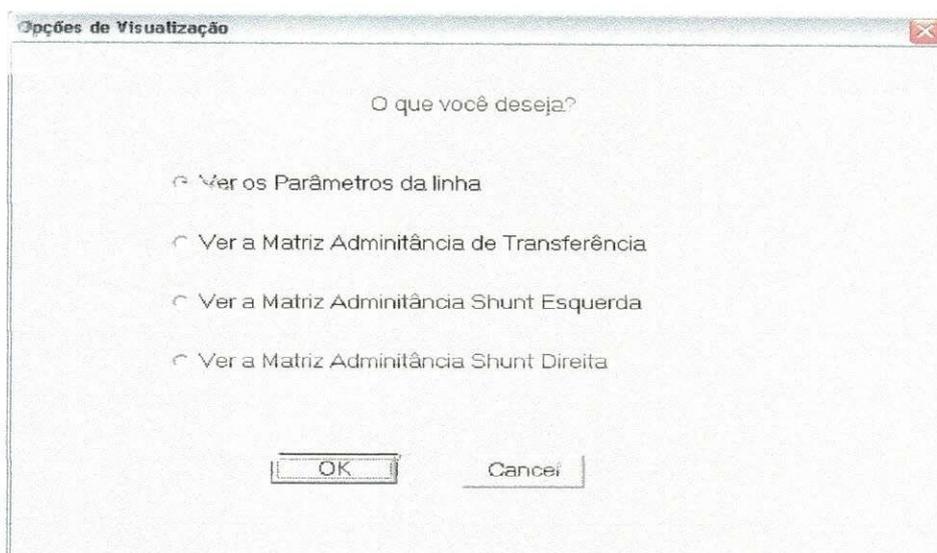


Figura 4.5 – Opções de Visualizações do software GSE.

4. No menu anterior, a primeira opção mostra os parâmetros da linha de transmissão, onde é levado em consideração o acoplamento entre os circuitos paralelos, conforme ilustra a Figura 4.6. A segunda opção mostra a matriz admitância de transferência de seqüência do circuito pi equivalente. A terceira e quarta opções mostram as matrizes admitância em derivação (shunt), esquerda e direita, contendo apenas a parte imaginária.

Parâmetros Próprios do Circuito		Parâmetros Mútuos do Circuito	
Resistência de Sequência Positiva do Circuito 1 (Ohm/Km):	0.271	Resistência de Seq. Positiva entre Circuitos 1 e 2 (Ohm/Km):	33.000
Resistência de Sequência Positiva do Circuito 2 (Ohm/Km):	0.271	Resistência de Seq. Positiva entre Circuitos 2 e 1 (Ohm/Km):	32.430
Reatância de Sequência Positiva do Circuito 1 (Ohm/Km):	1.430	Reatância de Seq. Positiva entre Circuitos 1 e 2 (Ohm/Km):	92.832
Reatância de Sequência Positiva do Circuito 2 (Ohm/Km):	1.430	Reatância de Seq. Positiva entre Circuitos 2 e 1 (Ohm/Km):	92.810
Capacitância 1 de Sequência Positiva do Circuito 1 (nF/KM):	13.088	Capacitância de Seq. Positiva entre Circuitos 1 e 2 (nF/Km):	0.374
Capacitância 2 de Sequência Positiva do Circuito 1 (nF/KM):	14.164	Capacitância de Seq. Positiva entre Circuitos 2 e 1 (nF/Km):	14.164
Capacitância 1 de Sequência Positiva do Circuito 2 (nF/KM):	13.083		
Capacitância 2 de Sequência Positiva do Circuito 2 (nF/KM):	13.023		

Figura 4.6 – Parâmetros do Circuito externados pelo software GSE.

### 4.3 Power World® Simulator

O simulador Power World® [POWERWORLD CORPORATION, 2006] é uma ferramenta bastante utilizada na área de sistemas de potência, pois trata-se de um poderoso programa de fluxo de carga com recursos de simulação, que roda em ambiente Windows com microcomputadores do tipo PC, sem exigir alta capacidade de processamento/memória.

## 5. SIMULAÇÕES E ESTUDO DE CASOS

### 5.1 Estudo de Casos

A Figura 5.1 [FERNANDES Jr. et al., 2006] ilustra as duas linhas de transmissão de 230 kV dispostas simultaneamente na mesma torre, entre as subestações de Paulo Afonso (barras PAF1 e PAF2) e Fortaleza (barras FTZ1 e FTZ2), pertencentes à CHESF.

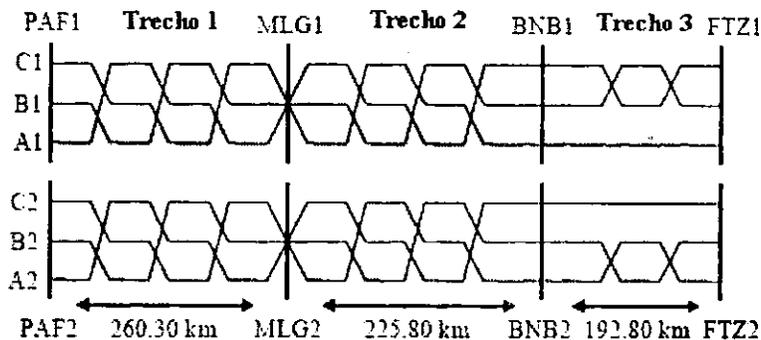


Figura 5.1 - Linha de transmissão de 230 kV entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza.  
Comprimento: 678,90 km.

Para a mesma linha de transmissão de circuito duplo, foram feitas análises de situações onde foi considerado um aumento da distância entre os condutores conforme mostrado nas Figuras 5.2 e 5.3 [FERNANDES Jr. et al., 2006]. Onde a primeira apresenta a geometria da torre na situação inicial (feixe convencional) e a última na situação após o aumento da distância entre os condutores (feixe expandido). A modelagem das linhas de transmissão em cada situação foi feita utilizando o software ATP (Alternative Transients Program).

Condutores por fase:  $R_{dc} = 0.092 \Omega/\text{km}$  ; Diâmetro = 5.5146 cm  
 Fios terra:  $R_{dc} = 4.0957 \Omega/\text{km}$  ; Diâmetro = 0.9144 cm  
 Comprimento da linha: 678.90 km; Resistividade da terra = 1000  $\Omega.m$

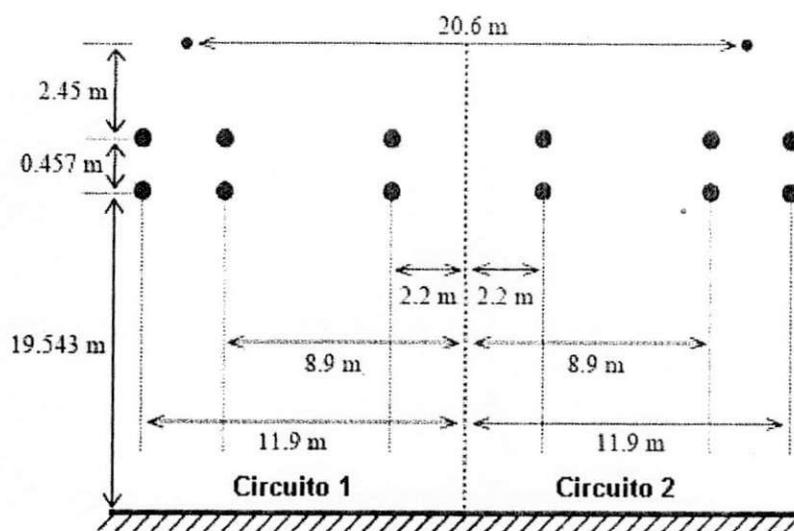


Figura 5.2 – Geometria para Linha de Transmissão de 230 kV da Figura 5.1 aplicada a técnica de feixe convencional.

Condutores por fase:  $R_{dc} = 0.092 \Omega/\text{km}$  ; Diâmetro = 5.5146 cm  
 Fios terra:  $R_{dc} = 4.0957 \Omega/\text{km}$  ; Diâmetro = 0.9144 cm  
 Comprimento da linha: 678.90 km; Resistividade da terra = 1000  $\Omega.m$

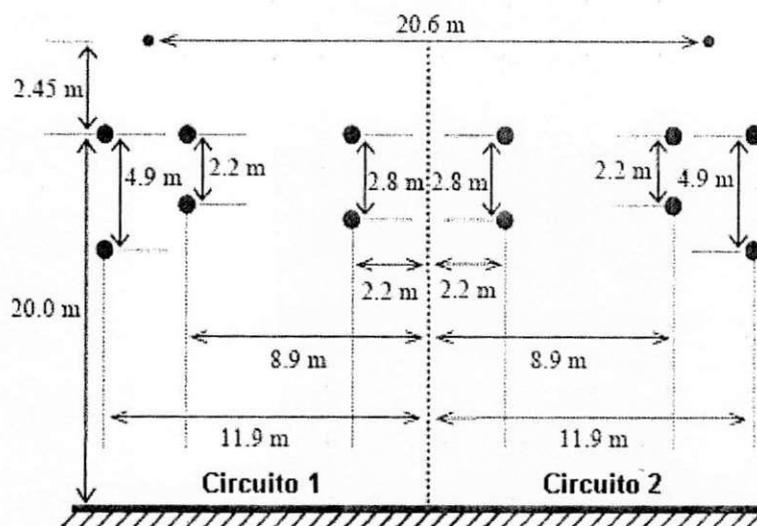


Figura 5.3 – Geometria para Linha de Transmissão de 230 kV da Figura 5.1 aplicada a técnica de feixe expandido (FEX).

Os valores utilizados para as potências ativa e reativa das subestações de Milagres (MLG), Banabuiú (BNB) e Fortaleza (FTZ) são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 5.1 – Valores utilizados para as potências ativa e reativa das subestações MLG, BNB e FTZ.**

	Barras					
	MLG1	MLG2	BNB1	BNB2	FTZ1	FTZ2
Potência Ativa (MW)	42,6	42,6	26,4	26,4	98,2	98,2
Potência Reativa (Mvar)	17,1	17,1	3,8	3,8	8,3	8,3

No sistema, PA1 foi considerada como barra de referência e PA2 como barra de tensão controlada. MLG1, MLG2, BNB1 e BNB2 foram consideradas barras de carga. Na subestação da Fortaleza existe um compensador estático (com variação de potência reativa de -140 Mvar a 200 Mvar), sendo assim, as barras FTZ1 e FTZ2 foram definidas como barras de tensão controlada.

## 5.2 Obtenção dos Parâmetros das Linhas de Transmissão

Conforme descrito na seção 4.2 deste trabalho, o software GSE pode ser aplicado para se obter todos os parâmetros da linha de transmissão que une as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, considerando o acoplamento entre os circuitos paralelos e o tipo de transposição de linha utilizado.

As tabelas a seguir apresentam todos os valores calculados dos parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para as linhas de transmissão de feixe convencional e de feixe expandido do sistema de transmissão Paulo Afonso – Fortaleza. As Tabelas 5.2 e 5.3, 5.4 e 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam os parâmetros referentes aos trechos Paulo Afonso – Milagres, Milagres – Banabuiú e Banabuiú – Fortaleza, respectivamente.

**Tabela 5.2 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (linha de transmissão PAF – MLG).**

	Circuito 1				Circuito 2			
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita
CV	11,972	85,704	589,825	578,437	11,896	83,405	666,086	680,579
FEX	11,924	69,425	740,582	727,064	11,853	67,457	840,285	860,734

**Tabela 5.3 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (linha de transmissão PAF – MLG).**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$
CV	769,311	2464,887	38,527	795,195	2523,525	36,578
FEX	633,778	1709,389	52,893	655,955	1753,631	48,679

**Tabela 5.4 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (linha de transmissão MLG – BNB).**

	Circuito 1				Circuito 2			
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita
CV	10,512	73,422	611,225	617,340	10,538	73,726	618,786	521,258
FEX	10,479	59,484	761,393	774,617	10,505	59,744	681,871	648,129

**Tabela 5.5 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (linha de transmissão MLG – BNB).**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$
CV	745,194	2307,842	20,689	765,339	2354,071	24,052
FEX	609,674	1593,477	28,477	626,958	1628,572	31,535

**Tabela 5.6 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (linha de transmissão BNB – FTZ).**

	Circuito 1				Circuito 2			
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$ esquerda	$B(\mu S)$ direita
CV	9,200	56,945	515,416	511,502	9,486	70,006	433,660	433,956
FEX	9,215	46,335	645,296	642,592	9,476	56,286	541,788	542,089

**Tabela 5.7 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (linha de transmissão BNB – FTZ).**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$	$R(\Omega)$	$X(\Omega)$	$B(\mu S)$
CV	424,275	1398,312	24,655	422,985	1397,380	25,795
FEX	380,264	1002,502	33,527	378,893	1001,828	35,074

Assumindo uma base de 230 kV / 100 MVA para o sistema de transmissão e que este opere numa frequência de 60 Hz, obtém-se como valor base uma impedância de 260,3  $\Omega$ . Convertendo as grandezas apresentadas nas tabelas anteriores para o sistema p.u. (por unidade) obtém-se as Tabelas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13. Tal conversão é feita, pois o Power World<sup>®</sup> Simulator, simulador de fluxo de potência utilizado neste trabalho, emprega o sistema p.u para impedâncias e admitâncias.

**Tabela 5.8 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão PAF – MLG.**

	Circuito 1				Circuito 2			
	R	X	B esquerda	B direita	R	X	B esquerda	B direita
CV	0,02263	0,16201	0,31202	0,30599	0,02249	0,15767	0,35236	0,36003
FEX	0,02254	0,13124	0,39177	0,38462	0,02241	0,12752	0,44451	0,45533

**Tabela 5.9 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão PAF – MLG.**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	R <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	B <sub>12</sub>	R <sub>21</sub>	X <sub>21</sub>	B <sub>21</sub>
CV	1,45427	4,65952	0,02038	1,50320	4,77037	0,01935
FEX	1,19807	3,23136	0,02798	1,23999	3,31499	0,02575

**Tabela 5.10 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão MLG – BNB.**

	Circuito 1				Circuito 2			
	R	X	B esquerda	B direita	R	X	B esquerda	B direita
CV	0,01987	0,13879	0,32334	0,32657	0,01992	0,13937	0,32734	0,27575
FEX	0,01981	0,11245	0,40278	0,40977	0,01986	0,11294	0,36071	0,34286

**Tabela 5.11 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão MLG – BNB.**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	R <sub>12</sub>	X <sub>12</sub>	B <sub>12</sub>	R <sub>21</sub>	X <sub>21</sub>	B <sub>21</sub>
CV	1,40868	4,36265	0,01094	1,44677	4,45004	0,01272
FEX	1,15250	3,01224	0,01506	1,18518	3,07859	0,01668

**Tabela 5.12 – Parâmetros próprios de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão BNB – FTZ.**

	Circuito 1				Circuito 2			
	$R$	$X$	$B$ esquerda	$B$ direita	$R$	$X$	$B$ esquerda	$B$ direita
CV	0,01739	0,10765	0,27266	0,27059	0,01793	0,13234	0,22941	0,22956
FEX	0,01742	0,87590	0,34136	0,33993	0,01791	0,10640	0,28661	0,28677

**Tabela 5.13 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva (p.u.) - Linha de Transmissão BNB – FTZ.**

	Entre os circuitos 1 e 2			Entre os circuitos 2 e 1		
	$R_{12}$	$X_{12}$	$B_{12}$	$R_{21}$	$X_{21}$	$B_{21}$
CV	0,80203	2,64331	0,01304	0,79959	2,64155	0,01365
FEX	0,71884	1,89509	0,01774	0,71624	1,89382	0,01855

### 5.3 Simulações do Fluxo de Potência

Obtidas todas as informações necessárias sobre o sistema de transmissão Paulo Afonso – Fortaleza, tais como: tipos de barras e cargas, geradores, compensadores estáticos e os parâmetros das linhas de transmissão, são apresentadas nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7, as simulações realizadas a partir do software Power World<sup>®</sup>, onde são consideradas a presença e ausência de acoplamento entre os circuitos paralelos e o tipo de feixe empregado na linha de transmissão.

Linha de Transmissão Convencional - Incluindo o Acoplamento entre os Circuitos

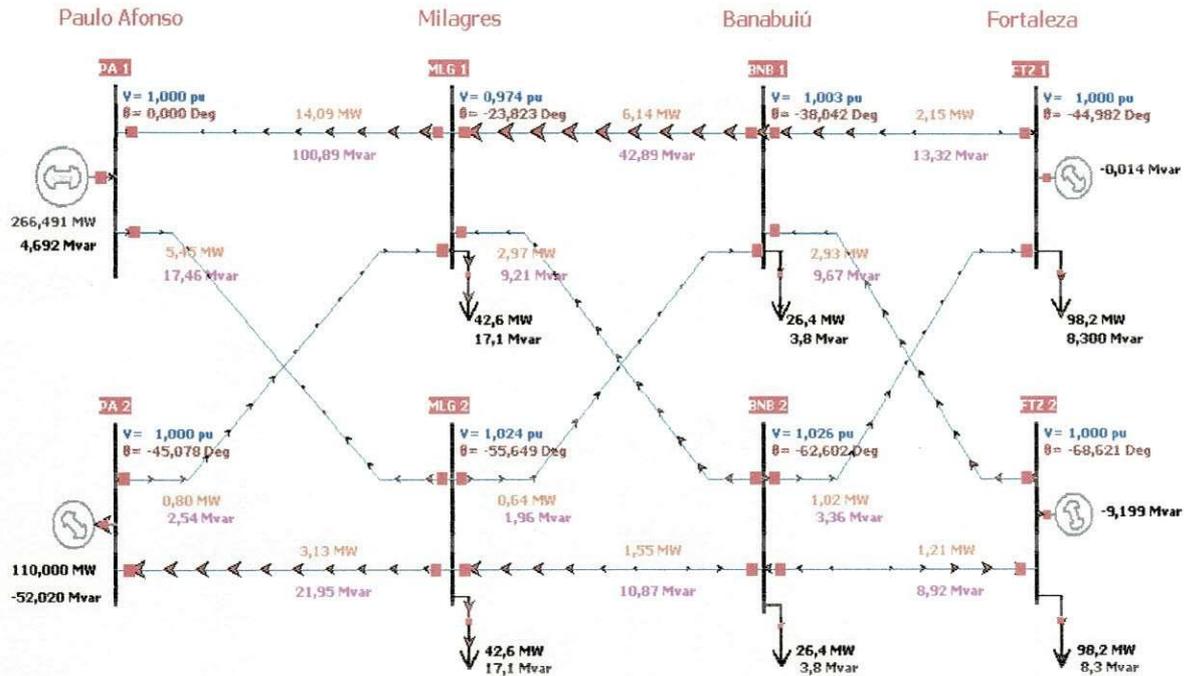


Figura 5.4 – Simulação da Linha de Transmissão com Feixe Convencional, considerando o acoplamento entre os circuitos paralelos.

Linha de Transmissão Convencional - Incluindo o Acoplamento entre os Circuitos

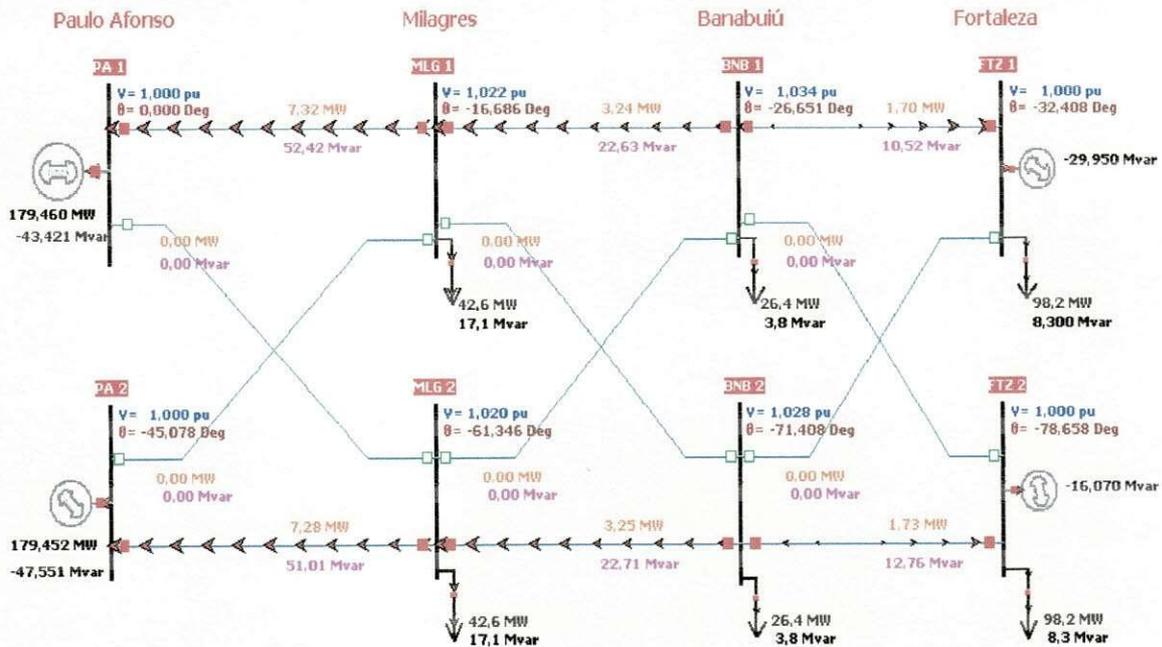
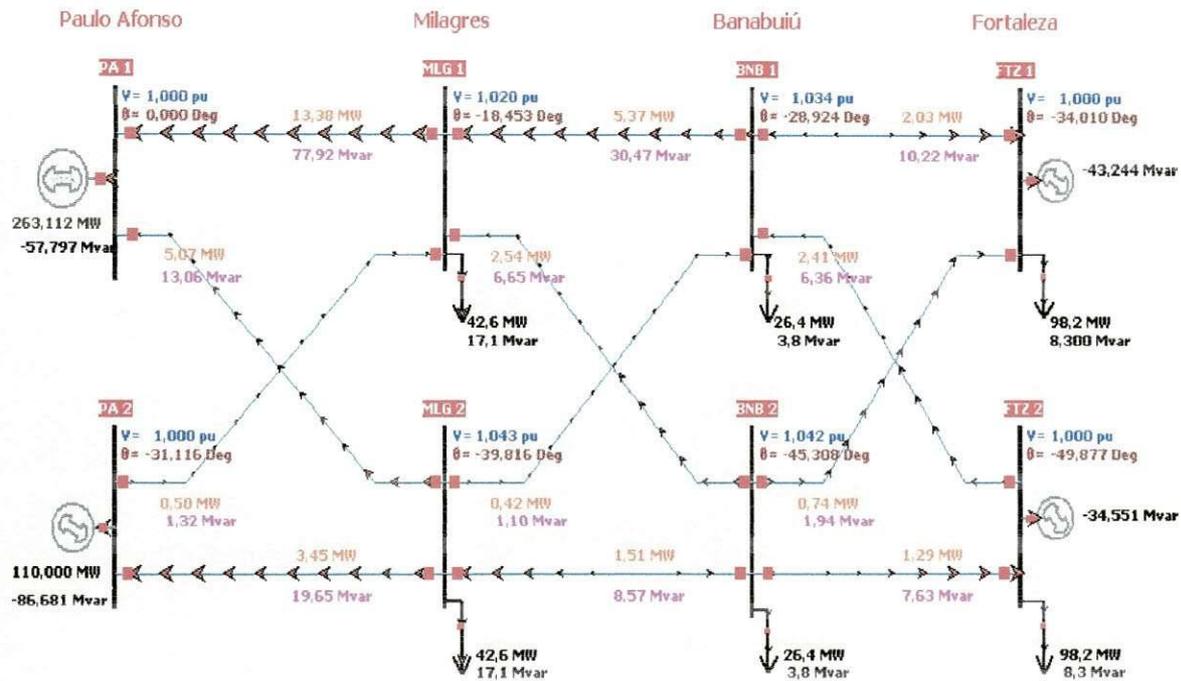


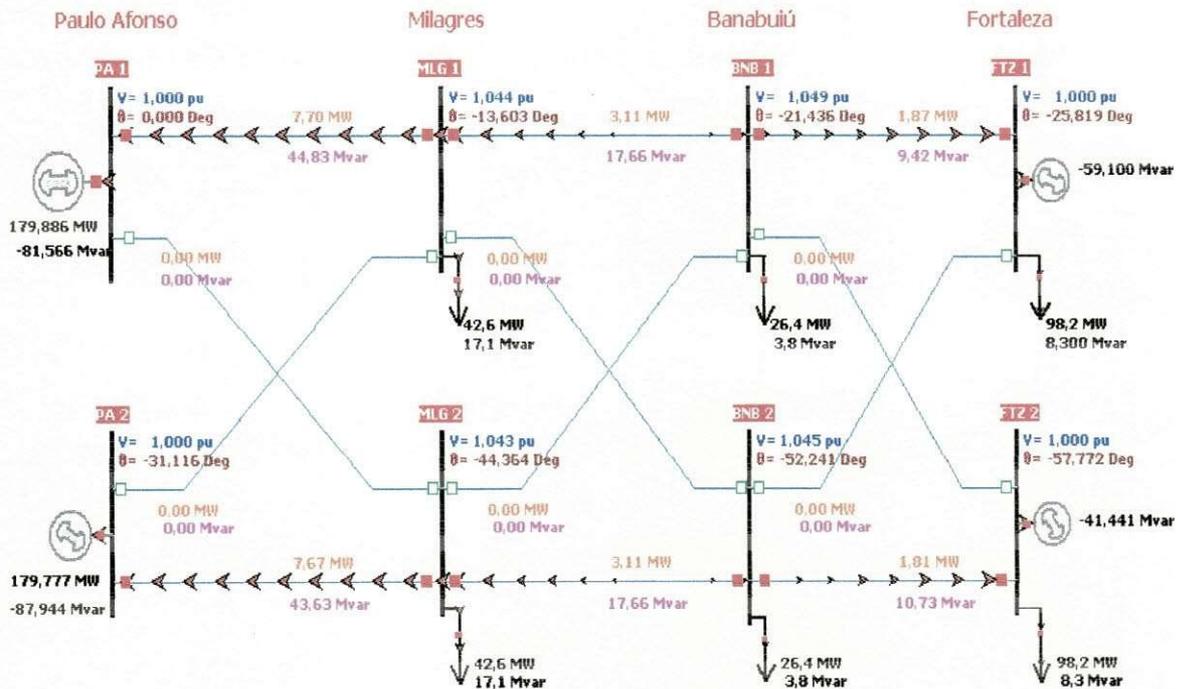
Figura 5.5 – Simulação da Linha de Transmissão com Feixe Convencional, desconsiderando o acoplamento entre os circuitos paralelos.

## Linha de Transmissão FEX - Incluindo o Acoplamento entre os Circuitos



**Figura 5.6 – Simulação da Linha de Transmissão com Feixe Expandido, considerando o acoplamento entre os circuitos paralelos.**

## Linha de Transmissão FEX - Excluindo o Acoplamento entre os Circuitos



**Figura 5.7 – Simulação da Linha de Transmissão com Feixe Expandido, desconsiderando o acoplamento entre os circuitos paralelos.**

A partir dos resultados obtidos nas simulações digitais, serão agora analisados dois fatores determinantes para o sistema de transmissão em questão do ponto de vista da concessionária de energia: a potência reativa medida na subestação de Fortaleza e as perdas ativas e reativas no sistema de transmissão. As Tabelas 5.14 e 5.15 mostram a potência reativa medida na subestação de Fortaleza, para as linhas de transmissão de feixe convencional e feixe expandido, respectivamente. Já as Tabelas 5.16 e 5.17 mostram o somatório das perdas ativas e reativas tanto na linha de transmissão de feixe convencional quanto para a linha de feixe expandido, respectivamente.

**Tabela 5.14 – Potência reativa medida na subestação de FTZ considerando e desprezando o acoplamento para a linha de transmissão de Feixe Convencional.**

Efeito do Acoplamento	Q (Mvar)	Diferença
Incluindo	-9,213	$\Delta Q$   = 36,807 Mvar
Desprezando	-46,02	

**Tabela 5.15 – Potência reativa medida na subestação de FTZ considerando e desprezando o acoplamento para a linha de transmissão de Feixe Expandido.**

Efeito do Acoplamento	Q (Mvar)	Diferença
Incluindo	-77,795	$\Delta Q$   = 22,746 Mvar
Desprezando	-100,541	

**Tabela 5.16 – Somatório das perdas ativas e reativas considerando e desprezando o acoplamento para a linha de transmissão de Feixe Convencional.**

Efeito do Acoplamento	Perdas Ativas (MW)	Perdas Reativas (Mvar)
Incluindo	42,08	243,03
Desprezando	24,52	172,05

**Tabela 5.17 – Somatório das perdas ativas considerando e desprezando o acoplamento para a linha de transmissão de Feixe Expandido.**

Efeito do Acoplamento	Perdas Ativas (MW)	Perdas Reativas (Mvar)
Incluindo	38,71	184,89
Desprezando	25,27	143,93

Fazendo uma análise comparativa entre as Tabelas 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 no que diz respeito à substituição da linha de transmissão de feixe convencional pela linha de feixe expandido observa-se que tal mudança acarretará numa geração maior de potência reativa bem como na redução de perdas desse gênero em média de 20,1%. Tal fato ocorre devido à ampliação da capacidade de transmissão da linha, causada pelo aumento das admitâncias em derivação bem como a redução da reatância em série na linha de transmissão de feixe expandido. Nota-se também que a potência ativa varia em média 5,5%, ou seja, varia em proporções bem menores do que a potência reativa.

As comparações entre os casos expostos nas Tabelas 5.14 e 5.15 mostram que a diferença entre as potências reativas é de 36,807 Mvar, em valores absolutos, para a linha de transmissão convencional e de 22,746 Mvar para a linha de transmissão de feixe expandido. Em ambas as tabelas, os casos em que o acoplamento é desprezado produziram uma maior potência reativa. Isto explica a diferença na potência reativa relatada na motivação deste trabalho para o sistema da Figura 5.1. Medições de campo da potência reativa fornecida pelo Compensador Estático da subestação de Fortaleza, mostraram que havia uma diferença de aproximadamente 50 Mvar comparada aos resultados das simulações digitais, que não levaram em consideração o efeito do acoplamento e do esquema de transposição.

Com estes resultados tornam-se evidentes que os efeitos de acoplamento são muito importantes em cálculos de uma potência reativa mais próxima do seu valor real. Estes efeitos devem ser tomados em consideração para as linhas de transmissão de circuito duplo, que normalmente apresenta um forte acoplamento eletromagnético.

## 6. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi apresentada uma metodologia genérica com finalidade de conseguir os parâmetros de uma linha de transmissão de circuito duplo para estudos do fluxo de potência levando em consideração os efeitos do acoplamento bem como o modo de transposição das linhas. Como consequência, obteve-se um circuito de ordem reduzida teoricamente exato, que pode ser usado em programas de fluxo de potência polifásico. Com este método também é possível obter os parâmetros de seqüência dos circuitos acoplados bem como seus componentes simétricos para programas de fluxo de potência convencionais.

Resultados de simulações feitas utilizando o software Power World<sup>®</sup> Simulator para uma linha de transmissão de 230 kV de circuito duplo foram apresentados. Foi mostrado que a potência reativa é fortemente afetada pelo acoplamento entre as duas linhas de transmissão e como a potência reativa tende a diminuir em valores absolutos quando os efeitos de acoplamento são levados em consideração. Esta informação explica as diferenças na potência reativa observadas na literatura quando resultados de simulação, desprezando os efeitos de acoplamento, produziram aproximadamente 50 Mvar a mais, comparados com resultados de medições em campo no compensador estático na subestação de 230 kV de Fortaleza, pertencente ao sistema elétrico da CHESF.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARDOSO, G. A. *Estudo de Fluxo de Potência Considerando o Acoplamento entre Linhas de Transmissão Fisicamente Próximas e o Efeito da Transposição*, Trabalho de Conclusão de Curso, UFCG, junho 2006.
- DOMMEL, H. W. *EMTP Theory Book*. Microtran Power System Analysis Corporation, Second Edition, Vancouver B. C., Canada, April 1996.
- FERNANDES Jr., D., MONTEIRO, J. S., NEVES, W. L. A., SOUZA, B. A., FERNANDES, A. B. “Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas para Estudos de Fluxo de Potência”. *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Automática - CBA 2006*, Salvador, p.p. 1650-1655, 2006.
- 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.
- POWERWORLD CORPORATION, *PowerWorld Simulator - Version 12.0*, Champaign, USA, 2006.
- RÉGIS Jr., O., FREIRE, A. R. F., EDUARDO, J. V. “Modelo para Simulação Monofásica do Acoplamento entre Circuitos Paralelos e da sua Influência na Sobretensão de Terminal Aberto”. *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, 17 a 22 de outubro 1999.