
Josivan Sampaio Monteiro

Cálculo dos Parâmetros de Linhas de Transmissão
para Estudos de Fluxo de Potência Considerando o
Efeito de Outras Linhas Fisicamente Próximas

*Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências
para obtenção do Grau de Mestre em Ciências no Domínio
da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Julho de 2004



M775c Monteiro, Josivan Sampaio

2004 Cálculo dos Parâmetros de Linhas de Transmissão para Estudos de Fluxo de Potência Considerando o Efeito de Outras Linhas Fisicamente Próximas / Josivan Sampaio Monteiro . – Campina Grande: UFCEG, 2004.

49 p.: il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)
UFCEG/CCT.

Inclui bibliografia.

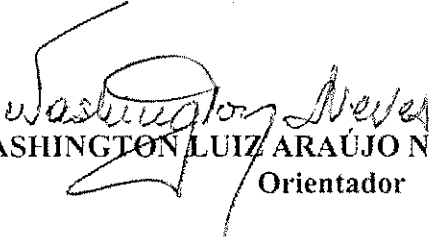
1 - Linhas de Transmissão 2 - Análise de Fluxo de Potência 3 - Acoplamento I - Título

CDU: 621.315(043)

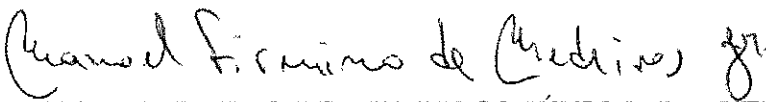
**CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA ESTUDOS
DE FLUXO DE POTÊNCIA CONSIDERANDO O EFEITO DE OUTRAS LINHAS
FISICAMENTE PRÓXIMAS**

JOSIVAN SAMPAIO MONTEIRO

Dissertação Aprovada em 28.07.2004


WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca


MANOEL FIRMINO DE MEDEIROS JÚNIOR, Dr., UFRN
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
Julho - 2004

A Socorro Aleixo, Eduardo e Camila, a grande razão da minha vida, que têm sido o maior incentivo à continuidade do meu aperfeiçoamento técnico.

Agradecimentos

A Deus, que me deu a alegria de realizar este trabalho.

Ao amigo e orientador, Prof. Washington Luiz de Araújo Neves, pela indicação segura do caminho a seguir.

A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, CHESF, pelo suporte técnico e financeiro e em especial aos engenheiros Marcelo José de Albuquerque Maia, Fernando Rodrigues Alves e Murilo Sérgio Lucena Pinto, que tornaram possível a realização deste trabalho na UFCG.

Ao amigo, Prof. Damásio Fernandes Júnior, cujo trabalho conjunto de Pesquisa e Desenvolvimento e permanente disponibilidade enriqueceu esta pesquisa.

Ao Prof. Hermann W. Dommel, professor Emérito da UBC (The University of British Columbia), Canadá, professor visitante da UFCG, pelas discussões sobre a metodologia de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão.

Aos Profs. Benemar Alencar de Souza, Edson Guedes da Costa e Wellington Santos Mota pela amizade e contribuição.

Aos amigos Luciano, Franklin Pamplona, Alécio, Estácio, Ronimack, Max Néri, Ângelo, Andréa e José Antônio pela colaboração e disposição permanente de trabalho conjunto.

Aos funcionários do Laboratório de Alta Tensão e da COPELE.

A Lourdes Aleixo, João Alfredo e Ana Luisa, pelo apoio, amizade e tranquilidade proporcionados durante o trabalho.

Sumário

Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiii
Capítulo 1 – Introdução.....	01
1.1 Motivação.....	01
1.2 Objetivo e Procedimentos Utilizados.....	06
1.3 Organização do Trabalho.....	07
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica.....	08
2.1 Programas Digitais para o Cálculo do Fluxo de Potência.....	08
2.2 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão.....	09
2.3 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão com Circuitos Paralelos.....	10
2.4 Regime Permanente.....	12
2.5 Circuito Pi Equivalente para Linha de Transmissão Não Transposta.....	15
2.6 Linhas de Transmissão Equilibradas.....	15
2.7 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo.....	19
2.7.1 Esquema de Transposição de Nove Seções de Circuitos Paralelos.....	20

2.7.2 Esquema de Transposição de Três Seções de Circuitos Paralelos.....	22
2.7.2.1 Transposição em Sentido Contrário.....	22
2.7.2.2 Transposição no Mesmo Sentido.....	24
2.8 Influência do Acoplamento na Tensão de Terminal Aberto e na Potência Reativa do Sistema Elétrico.....	25
2.9 Resumo.....	26
Capítulo 3 – Metodologia Implementada.....	27
3.1 Representação de uma Linha de Transmissão por uma Cascata de Circuitos Pi.....	27
3.2 Processo de Redução de Matrizes.....	28
3.3 Obtenção do Circuito Pi Equivalente e Cálculo dos Parâmetros da Linha de Transmissão.....	29
3.4 Representação dos Parâmetros Próprios e Mútuos em Programas de Fluxo de Potência.....	31
3.5 Resumo.....	31
Capítulo 4 – Análise de Resultados.....	33
4.1 Simulações para o Esquema de Transposição de Três Seções.....	33
4.2 Simulações para o Esquema de Transposição da Linha PAF–FTZ.....	37
Capítulo 5 – Conclusões.....	42
Referências Bibliográficas.....	44
Apêndice – Linha de Potência Natural Elevada – LPNE.....	47

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para os esquemas de transposição das Figuras 2.7 e 2.8.....	34
Tabela 4.2 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para os esquemas de transposição das Figuras 2.7 e 2.8.....	35
Tabela 4.3 – Valores de carga utilizados para o estudo de fluxo de potência.....	35
Tabela 4.4 – Dados comparativos da solução de fluxo de potência para o sistema da Figura 4.2 com o esquema de transposição no mesmo sentido, com e sem acoplamento.....	36
Tabela 4.5 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 1 da linha FEX da CHESF.....	38
Tabela 4.6 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 1 da linha FEX da CHESF.....	39
Tabela 4.7 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 2 da linha FEX da CHESF.....	39
Tabela 4.8 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 2 da linha FEX da CHESF.....	39
Tabela 4.9 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 3 da linha FEX da CHESF.....	39

Tabela 4.10 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 3 da linha FEX da CHESF.....	39
Tabela 4.11 – Valores de carga utilizados nas barras de Milagres, Banabuiú e Fortaleza para estudo de fluxo de potência na linha FEX da CHESF.....	40
Tabela 4.12 – Dados comparativos da solução de fluxo de potência na barra FTZ para a linha FEX da CHESF com e sem acoplamento.....	41

Resumo

Neste trabalho é apresentada uma metodologia simples para obter um circuito π equivalente polifásico que represente o efeito do forte acoplamento eletromagnético entre linhas de transmissão fisicamente próximas e a maneira como os circuitos foram transpostos. O circuito equivalente é obtido através da redução nodal de uma cascata de circuitos π em que cada um deles representa uma seção da linha de transmissão entre torres de transposição. Os parâmetros da linha de transmissão podem ser obtidos com qualquer programa do tipo EMTP (Electromagnetic Transients Program). A transformação de componentes simétricas é aplicada ao circuito resultante para obter o circuito equivalente de seqüência positiva que leva em conta o efeito do acoplamento entre os circuitos. Os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva são utilizados na representação das linhas de transmissão em estudos de fluxo de potência. Para validação da metodologia apresentada, é utilizado um caso exemplo do cálculo do fluxo de potência para uma linha de transmissão de circuito duplo. Os resultados mostram que a potência reativa em uma barra é fortemente influenciada pelo acoplamento entre as duas linhas de transmissão.

Abstract

When transmission line circuits run close to each other, there might be strong coupling effects among the lines due to magnetic, electrostatic and transposition schemes. This work presents a simple method to obtain a single-section multiphased pi-circuit that takes these effects into account. The resulting circuit is obtained from node reduction of several cascaded pi-circuits, each one representing the section of the lines in between transposition towers. The cascaded pi-circuit parameters can be obtained with any version of the EMTP (Electromagnetic Transients Program). Symmetrical component technique is applied to the resulting circuit to obtain the equivalent positive sequence coupled circuits suitable to represent the transmission lines in power flow studies. A power flow case study, in which two transmission lines are running at the same tower, is presented. It is shown that the reactive power in one bus is strongly affected by the coupling between the two transmission lines.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

As análises de planejamento da área Norte do sistema de transmissão da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) onde está localizada a região metropolitana de Fortaleza, cotejaram várias alternativas de reforço no atendimento às cargas daquela região. A opção mais atrativa do ponto de vista técnico e 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 636 MCM por fase, cujos condutores foram dispostos na estrutura típica da Figura 1.1.

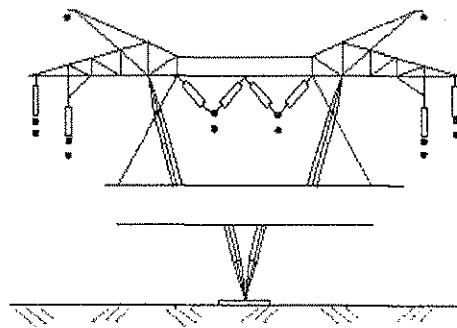


Figura 1.1 – Estrutura típica da linha de transmissão 2X230 kV transformável para 500 kV.

Este trecho de linha de transmissão foi denominado “LT transformável” pelo fato de começar a operar comercialmente na tensão nominal de 230 kV, porém montado em uma estrutura de 500 kV. Posteriormente estes circuitos passariam a operar na tensão nominal de 500 kV através do rearranjo dos condutores, resultando em um circuito simples de 500 kV com quatro subcondutores por fase, conforme Figura 1.2.

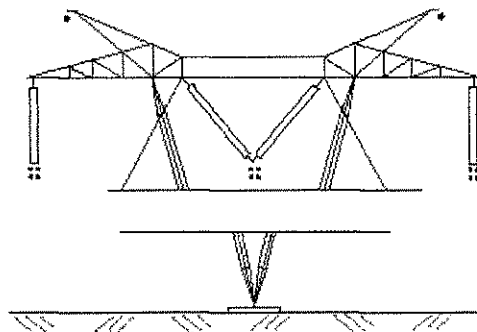


Figura 1.2 – Estrutura típica da linha de transmissão na tensão nominal de 500 kV.

No ano de 1996, a região metropolitana de Fortaleza estava sendo atendida por cinco circuitos a partir da hidroelétrica de Paulo Afonso, conforme Figura 1.3.

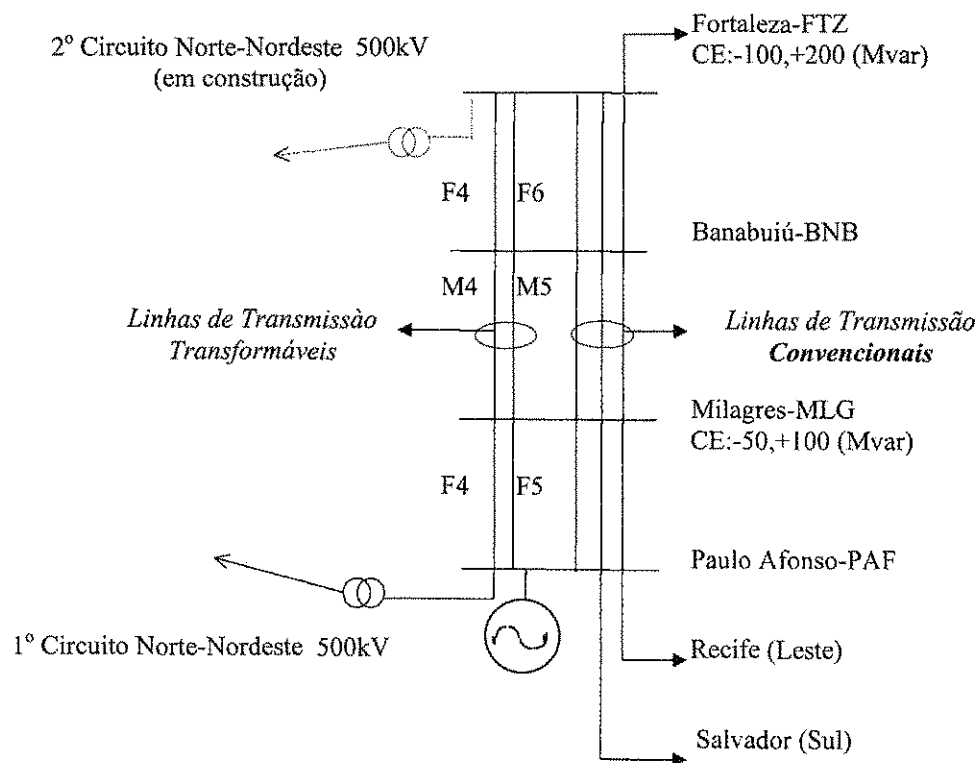


Figura 1.3 – Atendimento à região metropolitana de Fortaleza na tensão de 230 kV.

Nos primeiros estudos que consideraram a linha de transmissão de circuito duplo na tensão nominal de 230 kV transformável em circuito simples na tensão nominal de 500 kV, entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, havia a previsão de energização de um circuito na tensão nominal de 500 kV entre a usina hidroelétrica (UHE) de Sobradinho e a subestação de Milagres. Esse circuito tinha a função de complementar a integração da UHE Sobradinho ao sistema elétrico da CHESF, que até então era interligada por uma única linha de transmissão na tensão nominal de 500 kV entre Sobradinho e Itaparica, bem como garantir o suprimento à área metropolitana de Fortaleza durante a transformação da linha de transmissão de circuito duplo entre as subestações de Paulo Afonso e Milagres.

Após a definição do comissionamento da segunda linha de transmissão entre as subestações de Sobradinho e Itaparica, na tensão nominal de 500 kV, que proporcionou a plena integração da UHE Sobradinho ao sistema elétrico da CHESF, foi realizado um estudo que recomendou a não implantação de um segundo circuito de 500 kV para Milagres [CHESF/RT-24-20-07/91, 1991].

No período da transformação, prevista para 1996, foi verificado que seria possível atender aos requisitos do sistema de transmissão, considerando que a linha de transmissão interligando as subestações de Presidente Dutra e Fortaleza, segundo circuito da interligação Norte-Nordeste, entre as empresas Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE) e a CHESF e a UHE Tucuruí II da ELETRONORTE, entrariam em operação antes do início da transformação [CHESF/NT-DEPT-03-03-02/97, 1997; CHESF/CTI-92.98.1980.00, 1999].

Sucessivos adiamentos do segundo circuito da interligação Norte-Nordeste e o crescimento da carga da região metropolitana de Fortaleza em patamares da ordem de 12% ao ano tornaram crítico o atendimento àquela região, provocando o esgotamento do

sistema elétrico na tensão nominal de 230 kV entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, que apresentava sobrecarga nos três circuitos mais antigos, mostrando a necessidade de se buscar uma solução para o problema. Em agosto de 1996, este cenário incentivou a aplicação da técnica de feixe expandido (FEX) na linha de transmissão transformável, quando esta ainda operava na tensão nominal de 230 kV, de acordo com a Figura 1.4.

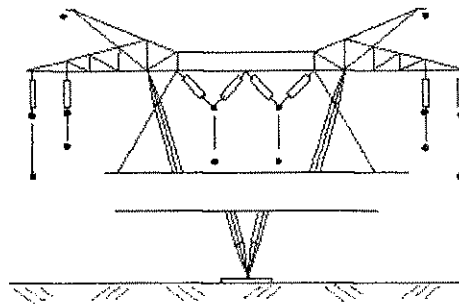


Figura 1.4 – Arranjo da linha de transmissão transformável com feixe expandido.

A técnica de FEX foi implementada a partir da tecnologia de Linha de Potência Natural Elevada (LPNE) desenvolvida por pesquisadores russos, trazida e adaptada para o Brasil pela Comissão de Planejamento da Transmissão da Amazônia (CPTA) que desenvolveu seus trabalhos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL). Essa comissão estudou a interligação do sistema elétrico brasileiro, o qual era constituído por dois sistemas independentes que interligavam as regiões Norte/Nordeste e Sul/Sudeste. A técnica de LPNE está descrita em Apêndice.

A implantação da tecnologia de FEX na linha de transmissão transformável tornou possível a redução na reatância série com o conseqüente aumento em cerca de 25 % na potência transportada na linha de transmissão. Este aumento de potência foi possível em função da altura de segurança da torre estar prevista para uma tensão de operação de 500 kV, havendo uma folga bastante considerável para a operação em 230 kV. Após a instalação do FEX, os ganhos foram comprovados com o alívio dos Compensadores

Estáticos (CE) que estavam no limite capacitivo e melhor distribuição da corrente nos circuitos entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, permitindo atender as cargas de Fortaleza em 1997. Em 1998, mais uma vez adiado o segundo circuito da interligação Norte-Nordeste, foi possível atender uma demanda de quase 1400 MW através da adição de 150 Mvar em bancos de capacitores. A redução da reatância série da linha de transmissão contribuiu para a recuperação de afundamentos de tensão em relação aos capacitores em derivação [FREIRE & PONTES, 1999].

Em 1995 já estavam concluídas as linhas de transmissão entre as subestações de Paulo Afonso e Milagres, circuitos F4 e F5 e entre as subestações de Milagres e Banabuiú, circuitos M4 e M5, no padrão transformável. O cenário daquele ano levou a decisão de que o último trecho da linha de transmissão entre as subestações de Banabuiú e Fortaleza, circuitos F4 e F6, deveria ser modificado para FEX o qual entrou em operação em julho de 1996.

No final de 1996, devido ao adiamento para dezembro de 1998 da entrada em operação do segundo circuito da interligação Norte-Nordeste e o primeiro trecho de FEX entre as subestações de Banabuiú e Fortaleza, circuitos F4 e F6, operando há cerca de seis meses sem haver relato de problemas, foi decidido recapacitar os demais trechos da linha de transmissão. A aplicação da técnica de FEX foi realizada entre fevereiro e outubro de 1997 com desligamentos diários.

Alguns meses após a entrada em operação do FEX ocorreram 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 [RÉGIS Jr. et al, 1999]. Análise cuidadosa levou à conclusão de que seria necessária a inclusão dos parâmetros mútuos de seqüência positiva entre circuitos paralelos acoplados nos programas convencionais de fluxo de potência.

Acoplamento mútuo também ocorre em linhas de transmissão de circuito duplo, configuração de múltiplos circuitos ou linhas de transmissão fisicamente próximas. O forte acoplamento entre circuitos paralelos é o resultado da combinação de fatores que levam em conta a geometria da linha de transmissão, a proximidade entre os circuitos e o esquema de transposição utilizado.

1.2 Objetivo e Procedimentos Utilizados

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para calcular os parâmetros de linhas de transmissão fisicamente próximas ou na mesma faixa de passagem para estudos de fluxo de potência, levando em consideração o acoplamento eletromagnético entre as linhas de transmissão e a maneira como os circuitos foram transpostos.

Os parâmetros são calculados a partir da rotina de cálculo de parâmetros de linhas de transmissão do programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) [LEUVEN EMTP CENTER, 1987]. Utilizando uma rotina computacional desenvolvida neste trabalho, a linha de transmissão é representada por uma cascata de circuitos pi, através das matrizes de admitâncias de transferência e derivação para cada circuito pi, considerando a maneira como o circuito foi transposto. Em seguida, a cascata é reduzida a um circuito pi equivalente cujas matrizes são transformadas para componentes simétricas. Os parâmetros de seqüência próprios e mútuos serão utilizados no Programa de Análise de Redes, ANAREDE [CEPEL, 1999].

Utilizando os parâmetros calculados para uma linha de transmissão fictícia de circuito duplo e para outra com esquema de transposição da linha de transmissão entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, foi calculado o fluxo de potência reativa considerando ou não o acoplamento entre os circuitos.

Este estudo faz parte do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, “Representação Precisa de Linhas de Transmissão Assimétricas”, da CHESF e desenvolvido pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho está organizado de acordo com a estrutura abaixo.

No capítulo 2 são apresentados a fundamentação teórica do cálculo de parâmetros de linhas de transmissão, as configurações estudadas e os esquemas de transposição utilizados. Além disso, são analisados os trabalhos que deram origem à necessidade do cálculo dos parâmetros considerando o efeito do acoplamento e do esquema de transposição da linha de transmissão.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia desenvolvida na pesquisa.

O capítulo 4 analisa os resultados para as configurações escolhidas considerando um esquema de transposição teórico e o da linha de transmissão entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza.

Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Programas Digitais para o Cálculo do Fluxo de Potência

Nos programas convencionais de cálculo do fluxo de potência, geralmente assume-se que o sistema é equilibrado, sendo necessários apenas os dados de seqüência positiva para a representação dos diversos equipamentos que compõem a rede.

Um dos programas digitais utilizados pelo setor elétrico é o Programa de Análise de Redes – ANAREDE, desenvolvido pelo CEPEL, que tem como objetivo o cálculo do estado operativo da rede elétrica para condições de carga, geração e topologia definidas e determinadas restrições operacionais. O método utilizado para a solução das equações da rede elétrica é o de Newton.

As linhas de transmissão, transformadores e transformadores defasadores são representados por circuitos π entre suas barras terminais. As cargas são normalmente modeladas como potências ativas e reativas constantes, ou podem ser expressas como uma função da magnitude da tensão da barra representada por correntes e impedâncias constantes. As gerações de potência ativa são fixadas em seus valores especificados e as gerações de potência reativa variam dentro de seus limites.

Para o caso de circuitos paralelos muito próximos, na mesma torre ou na mesma faixa de passagem, a indutância e a capacitância mútuas de acoplamento entre os dois circuitos são geralmente desprezadas.

2.2 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão

O programa EMTP 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 das características para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados [DOMMEL, 1969].

Com o programa EMTP é possível representar elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, não linearidades, etc.

A grande maioria das simulações geralmente envolve linhas de transmissão como um de seus componentes básicos. Por este motivo, freqüentemente é necessário obter os parâmetros das linhas de transmissão que fazem parte do sistema a ser estudado.

O programa EMTP calcula os parâmetros das linhas de transmissão para algumas situações que estão descritas a seguir.

1 - Calcula as matrizes de resistências, indutâncias e capacitâncias, em componentes de fase ou simétricas, de qualquer configuração arbitrária de condutores aéreos, para qualquer freqüência entre 0.0001 Hz e 500 kHz;

2 - Inclui a solicitação de acoplamento mútuo. Esta opção pode ser utilizada, por exemplo, para calcular o acoplamento entre uma linha de transmissão e um circuito de comunicação paralelo;

3 - Calcula as matrizes de resistências, indutâncias e capacitâncias para uma faixa de frequências pré-estabelecida, com valores espaçados de forma logarítmica;

4 – Calcula o circuito pi equivalente nominal ou equivalente para linha de transmissão curta, válido para simulação de transitórios, ou o circuito pi equivalente para uma linha de transmissão longa, válido para simulação apenas em regime permanente;

5 – Utiliza o modelo de K.C. Lee ou de Clarke, adequado para propagação de ondas, para calcular os parâmetros de uma linha de transmissão, transposta ou não, para uma determinada frequência;

6 – Utiliza o modelo JMARTI para calcular os parâmetros da linha de transmissão variando com a frequência para estudos de transitórios em que os modelos a parâmetros constantes não são adequados.

2.3 Cálculo de Parâmetros de Linhas de Transmissão com Circuitos

Paralelos

Se dois circuitos trifásicos paralelos estão muito próximos, na mesma torre ou na mesma faixa de passagem, há um acoplamento eletrostático e eletromagnético entre os dois circuitos. 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 [GLOVER & SARMA, 2002].

Seja o diagrama monofásico de uma linha de transmissão de circuito duplo mostrado na Figura 2.1. Por simplicidade, considera-se que as linhas não são transpostas. Desde que as linhas estão conectadas em paralelo, a queda de tensão série para cada fase é a mesma.

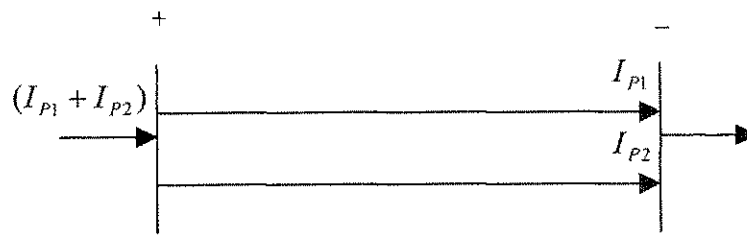


Fig. 2.1 – Diagrama monofásico de uma linha de circuito duplo.

A equação do circuito trifásico correspondente é:

$$\begin{bmatrix} [E_p] \\ [E_p] \end{bmatrix} = [Z_p] \begin{bmatrix} [I_{P1}] \\ [I_{P2}] \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Em que $[E_p]$ é o vetor das quedas de tensão dos condutores por fase (incluindo a queda de tensão do neutro), e $[I_{P1}]$ e $[I_{P2}]$ são os vetores das correntes de fase das linhas 1 e 2, respectivamente. $[Z_p]$ é uma matriz de impedância cuja dimensão é 6×6 .

Resolvendo (2.1) para as correntes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} [I_{P1}] \\ [I_{P2}] \end{bmatrix} = [Z_p]^{-1} \begin{bmatrix} [E_p] \\ [E_p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_A] & [Y_B] \\ [Y_C] & [Y_D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [E_p] \\ [E_p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_A] + [Y_B] \\ [Y_C] + [Y_D] \end{bmatrix} [E_p]. \quad (2.2)$$

As matrizes $[Y_A]$, $[Y_B]$, $[Y_C]$, $[Y_D]$ são obtidas pela partição da matriz $[Z_p]^{-1}$ em quatro matrizes 3×3 .

Somando $[I_{P1}]$ a $[I_{P2}]$,

$$[I_{P1}] + [I_{P2}] = \left([Y_A] + [Y_B] + [Y_C] + [Y_D] \right) [E_p]. \quad (2.3)$$

Resolvendo para $[E_p]$, obtém-se

$$[E_p] = [Z_{peq}] \left([I_{P1}] + [I_{P2}] \right). \quad (2.4)$$

Sendo

$$[Z_{peq}] = \left([Y_A] + [Y_B] + [Y_C] + [Y_D] \right)^{-1}. \quad (2.5)$$

$[Z_{peq}]$ é a matriz 3x3 de impedância série equivalente por fase da linha de transmissão de circuito duplo. Deve-se notar que em (2.5) as matrizes $[Y_B]$ e $[Y_C]$ consideram o acoplamento indutivo entre os dois circuitos.

Um procedimento análogo ao descrito acima pode ser usado para obter a matriz de admitância em derivação, ou seja,

$$\begin{bmatrix} [q_{P1}] \\ [q_{P2}] \end{bmatrix} = [C_P] \begin{bmatrix} [V_P] \\ [V_P] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C_A] & [C_B] \\ [C_C] & [C_D] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_P] \\ [V_P] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [C_A] + [C_B] \\ [C_C] + [C_D] \end{bmatrix} [V_P]. \quad (2.6)$$

Em que $[V_P]$ é o vetor de tensões e $[q_{P1}]$ e $[q_{P2}]$ são os vetores das cargas nos condutores por fase para as linhas de transmissão 1 e 2, respectivamente. $[C_P]$ é a matriz 6x6 de capacitância que é dividida em quatro matrizes 3x3, $[C_A]$, $[C_B]$, $[C_C]$ e $[C_D]$.

Somando $[q_{P1}]$ e $[q_{P2}]$, tem-se:

$$[q_{P1}] + [q_{P2}] = [C_{peq}] [V_P]. \quad (2.7)$$

Sendo $[C_{peq}] = [[C_A] + [C_B] + [C_C] + [C_D]]$. Dessa forma, pode-se escrever:

$$[Y_{peq}] = j\omega [C_{peq}]. \quad (2.8)$$

Em que $[Y_{peq}]$ é a matriz equivalente 3x3 de admitância em derivação da linha de transmissão de circuito duplo. As matrizes $[C_B]$ e $[C_C]$ levam em conta o acoplamento capacitivo entre os dois circuitos.

2.4 Regime Permanente

A solução das equações gerais que relacionam tensões e correntes nos terminais de uma linha de transmissão monofásica ou de uma linha de transmissão multifásica balanceada representada pelo quadripolo da Figura 2.2 é:

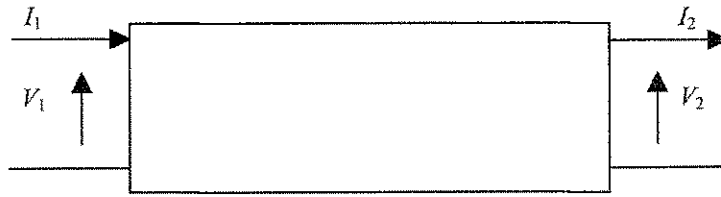


Figura 2.2 – Terminais de uma linha de transmissão na representação como um quadripolo.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

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

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

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 obtidas por:

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

A Equação (2.9) fornece informações apenas dos terminais da linha. Em estudos de regime permanente, a exemplo de fluxo de potência, as linhas de transmissão geralmente são modeladas por:

a) 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 2.3. A impedância série e a admitância em derivação são obtidas a partir dos parâmetros por unidade de comprimento, multiplicados pelo comprimento total da linha de transmissão.

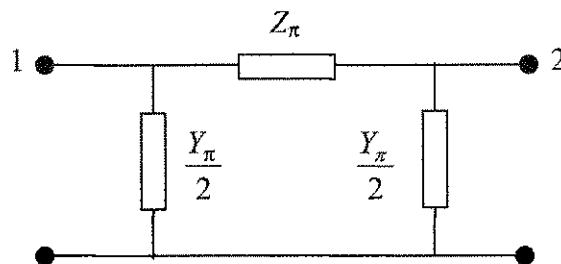


Figura 2.3 – Seção do circuito pi nominal.

b) 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 (Equação (2.9)).

Para o circuito pi exato tem-se:

$$Z_{\pi} = Z.l \cdot \frac{\sinh(\gamma l)}{\gamma l} \quad e \quad \frac{Y_{\pi}}{2} = \left(\frac{Y.l}{2} \right) \frac{\tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}{\left(\frac{\gamma l}{2}\right)}. \quad (2.10)$$

2.5 Circuito Pi Equivalente para Linha de Transmissão Não Transposta

Uma linha de transmissão multifásica pode ser representada por um circuito pi equivalente, que descreve corretamente as condições de regime permanente nos terminais da linha para valores específicos de comprimento e frequência.

O circuito pi equivalente 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 2.4.

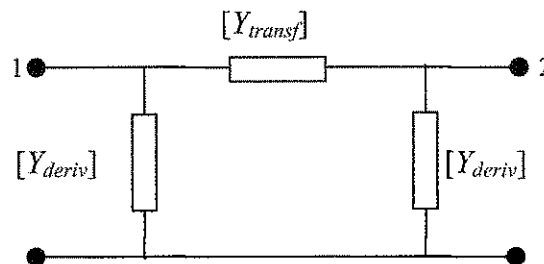


Figura 2.4 – Circuito pi equivalente de uma linha de transmissão.

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

$$\begin{bmatrix} [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] & -[Y_{transf}] \\ -[Y_{transf}] & [Y_{transf}] + [Y_{deriv}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [V_1] \\ [V_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [I_1] \\ [I_2] \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

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 (2.11) é um sistema de $2m$ equações.

2.6 Linhas de Transmissão Equilibradas

Uma linha de transmissão equilibrada pode ser definida como uma linha em que todos os elementos da diagonal das matrizes $[Z'_{fase}]$ e $[C'_{fase}]$ são iguais entre si e todos os elementos fora da diagonal também são iguais entre si,

$$[Z'_{fase}] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & \dots & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & \dots & Z'_m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z'_m & Z'_m & \dots & Z'_s \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

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

No caso real, uma linha de transmissão torna-se aproximadamente equilibrada utilizando-se o artifício da transposição, conforme mostra a Figura 2.5.

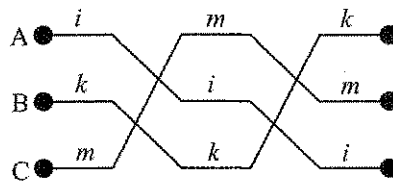


Figura 2.5 – Esquema de transposição para um circuito trifásico.

Nesta figura, 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.

O setor elétrico brasileiro utiliza os seguintes critérios para avaliar o desequilíbrio de tensão e corrente em todas as barras do sistema:

- a percentagem de tensão de seqüência negativa relativa a de seqüência positiva (V_2/V_1) deverá ser no máximo igual a 2%;
- a percentagem de corrente de seqüência negativa relativa a de seqüência positiva (I_2/I_1) deverá ser no máximo igual a 5%.

Algumas referências sugerem para um ciclo do esquema de transposição um comprimento entre 80 km e 160 km para linhas de transmissão longas, enquanto que outras recomendam que não seja maior do que 80 km para 50 Hz ou 67 km para 60 Hz para linhas

de transmissão com configuração triangular dos condutores, ou 40 km para 50 Hz ou 33 km para 60 Hz, para outras configurações de condutores. 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 nas três seções [DOMMEL, 1996].

A Equação (2.13) mostra o cálculo para as impedâncias da linha de transmissão,

$$\begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left[\begin{bmatrix} Z'_{ii} & Z'_{ik} & Z'_{im} \\ Z'_{ki} & Z'_{kk} & Z'_{km} \\ Z'_{mi} & Z'_{mk} & Z'_{mm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{mm} & Z'_{mi} & Z'_{mk} \\ Z'_{im} & Z'_{ii} & Z'_{ik} \\ Z'_{km} & Z'_{ki} & Z'_{kk} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z'_{kk} & Z'_{km} & Z'_{ki} \\ Z'_{mk} & Z'_{mm} & Z'_{mi} \\ Z'_{ik} & Z'_{im} & Z'_{ii} \end{bmatrix} \right] \quad (2.13)$$

Sendo:

$$Z'_s = \frac{1}{3}(Z'_{ii} + Z'_{kk} + Z'_{mm}) \quad \text{e} \quad Z'_m = \frac{1}{3}(Z'_{ik} + Z'_{km} + Z'_{mi}). \quad (2.14)$$

Em que, Z'_s é a impedância própria e Z'_m é a impedância mútua.

O processo de cálculo para as capacitâncias em derivação é análogo.

A determinação das tensões e correntes de uma linha trifásica equilibrada pode ser feita utilizando-se componentes simétricas, uma vez que as três equações acopladas no domínio de fase, dadas por

$$-\left[\frac{dV_{fase}}{dx} \right] = \begin{bmatrix} Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{bmatrix} [I_{fase}] \quad (2.15)$$

tornam-se três equações desacopladas em componentes simétricas, conforme Equação (2.16).

O resultado da transformação dos componentes de fase em componentes simétricas assume a forma:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} Z'_s + 2Z'_m & 0 & 0 \\ 0 & Z'_s - Z'_m & 0 \\ 0 & 0 & Z'_s - Z'_m \end{bmatrix}, \quad (2.22)$$

onde os elementos da matriz são definidos como:

Z'_s (impedância própria);

Z'_m (impedância mútua);

$Z'_0 = Z'_s + 2Z'_m$ (componente de seqüência zero);

$Z'_+ = Z'_- = Z'_s - Z'_m$ (componentes de seqüência positiva e negativa).

2.7 Componentes Simétricas para Linhas de Transmissão Transpostas de Circuito Duplo

Determinados esquemas de transposição para linhas de transmissão de circuito duplo diagonalizam as matrizes em componentes simétricas. O processo das médias das seções é o mesmo descrito para o caso trifásico, exceto que as matrizes agora serão 6x6. As matrizes de componentes simétricas são obtidas a partir de:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} [S]^{-1} & 0 \\ 0 & [S]^{-1} \end{bmatrix} [Z'_{fase}] \begin{bmatrix} [S] & 0 \\ 0 & [S] \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

sendo $[S]^{-1}$ e $[S]$ definidas conforme as equações (2.18) e (2.20), respectivamente.

Em circuitos paralelos podem existir acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos entre os 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].

2.7.1 Esquema de Transposição de Nove Seções de Circuitos Paralelos

Foi visto na seção 2.6 que para uma linha de transmissão tornar-se aproximadamente equilibrada utiliza-se o artifício da transposição.

O esquema de transposição da Figura 2.6 reduz bastante o acoplamento de uma seqüência com outra.

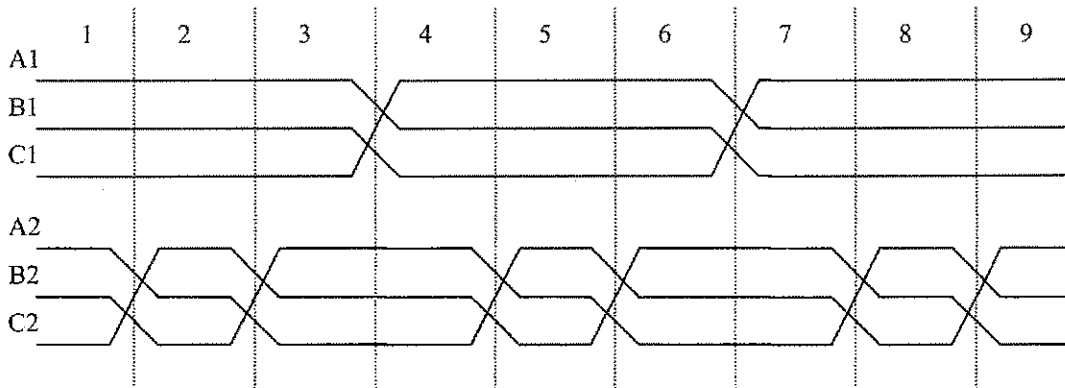


Figura 2.6 – Esquema de transposição de nove seções para uma linha de circuito duplo.

A média das impedâncias das nove seções é dada por:

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{9} \{ [Z'_{fasedaprimeiraseção}] + [Z'_{fasedasegundaseção}] + \dots + [Z'_{fasedanonaseção}] \} \quad (2.24)$$

ou

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & 3Z'_{m1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ 3Z'_{m1} & 3Z'_{m1} & 3Z'_{p1} & Z'_m & Z'_m & Z'_m \\ \hline Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} & 3Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_m & Z'_m & 3Z'_{m2} & 3Z'_{m2} & 3Z'_{p2} \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

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

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} & Z'_{m1} &= Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \\ Z'_{p2} &= Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} & Z'_{m2} &= Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64} \end{aligned} \quad (2.26)$$

e

$$Z'_m = Z'_{14} + Z'_{15} + Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{25} + Z'_{26} + Z'_{34} + Z'_{35} + Z'_{36} \quad (2.27)$$

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 (2.23),

obtem-se:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} \frac{Z'_{p1} + 2Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_m}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \hline \frac{Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} + 2Z'_{m2}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

A Equação (2.28) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & 0 \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Pode-se observar que o esquema de transposição da Figura 2.6, desacopla perfeitamente as quantidades de seqüência positiva e negativa em cada circuito trifásico e também entre os circuitos, exceto para a seqüência zero.

2.7.2 Esquema de Transposição de Três Seções de Circuitos Paralelos

Com o esquema de transposição de nove seções é alcançado o melhor desacoplamento possível em componentes simétricas, porém com oito torres de transposição, a um custo superior ao do esquema que será analisado a seguir, no qual são necessárias apenas duas torres de transposição.

2.7.2.1 Transposição em Sentido Contrário

O acoplamento de uma seqüência com outra também pode ser evitado com o simples esquema de transposição da Figura 2.7 em que a rotação das fases do circuito 2 é realizada em direção oposta a do circuito 1. Porém, 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 1 induzirá uma queda de tensão de seqüência positiva no circuito 2, mas correntes de seqüência positiva não produzirão quedas de tensão de componentes zero ou negativas.

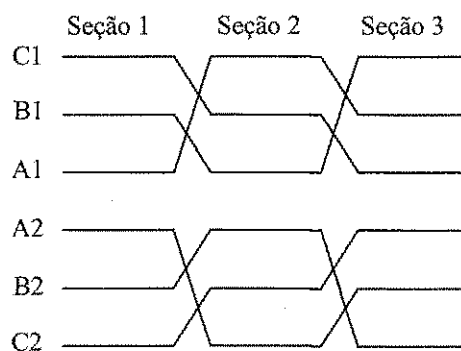


Figura 2.7 – Esquema de transposição de três seções (em sentido contrário) para uma linha de circuito duplo.

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

$$[Z'_{fase}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_k & Z'_l & Z'_m \\ Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_{m1} & Z'_m & Z'_k & Z'_l \\ Z'_{m1} & Z'_{m1} & Z'_{p1} & Z'_l & Z'_m & Z'_k \\ \hline Z'_k & Z'_m & Z'_l & Z'_{p2} & Z'_{m2} & Z'_{m2} \\ Z'_l & Z'_k & Z'_m & Z'_{m2} & Z'_{p2} & Z'_{m2} \\ Z'_m & Z'_l & Z'_k & Z'_{m2} & Z'_{m2} & Z'_{p2} \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

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

$$\begin{aligned} Z'_{p1} &= Z'_{11} + Z'_{22} + Z'_{33} & Z'_{m1} &= Z'_{12} + Z'_{23} + Z'_{31} \\ Z'_{p2} &= Z'_{44} + Z'_{55} + Z'_{66} & Z'_{m2} &= Z'_{45} + Z'_{56} + Z'_{64} \end{aligned}, \quad (2.31)$$

e

$$\begin{aligned} Z'_k &= Z'_{14} + Z'_{25} + Z'_{36} \\ Z'_l &= Z'_{15} + Z'_{26} + Z'_{34} \\ Z'_m &= Z'_{16} + Z'_{24} + Z'_{35} \end{aligned}, \quad (2.32)$$

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.

Aplicando a transformação de (2.23), obtém-se:

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} \frac{Z'_{p1} + 2Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + Z'_l + Z'_m}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + a^2Z'_l + aZ'_m}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_{p1} - Z'_{m1}}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_k + aZ'_l + a^2Z'_m}{3} \\ \hline \frac{Z'_k + Z'_l + Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} + 2Z'_{m2}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Z'_k + aZ'_l + a^2Z'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{Z'_k + a^2Z'_l + aZ'_m}{3} & 0 & 0 & \frac{Z'_{p2} - Z'_{m2}}{3} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

A Equação (2.33) pode ser escrita na forma:

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

A Equação (2.34) indica que existe um acoplamento para cada seqüência entre o circuito 1 e o circuito 2.

2.7.2.2 Transposição no Mesmo Sentido

Se a rotação de fases de cada circuito for na mesma direção, como na Figura 2.8, o resultado em componentes simétricas apresentará algumas diferenças, comparadas com a Equação (2.34), conforme a Equação (2.35), em que “X” representa um valor diferente de zero. A forma da Equação (2.35) indica que para este esquema de transposição, 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 2.8 criarão leves desequilíbrios.

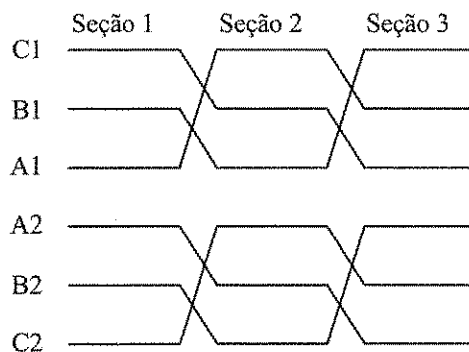


Figura 2.8 – Esquema de transposição de três seções (no mesmo sentido) para uma linha de circuito duplo.

$$[Z'_{sim}] = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ \hline X & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

2.8 Influência do Acoplamento na Tensão de Terminal Aberto e na Potência Reativa do Sistema Elétrico

Da bibliografia consultada, EDUARDO et al [1999] analisa o efeito do acoplamento na tensão da linha de transmissão em vazio através de resultados de ensaios de campo no trecho Milagres – Banabuiú, estando um circuito em carga e o outro em vazio. Foi observado que os efeitos do acoplamento seriam mais evidentes quanto maior fosse o carregamento das linhas de transmissão.

Quanto ao efeito do acoplamento das linhas de transmissão no fluxo de potência reativa, o acoplamento de seqüência positiva reduz a reatância série e aumenta a susceptância em derivação da linha de transmissão. Foi medida a variação da potência reativa da linha de transmissão em função da carga do circuito vizinho e foi observado que os efeitos do acoplamento seriam mais evidentes quanto maior fosse o comprimento da linha de transmissão e o seu carregamento.

RÉGIS Jr. et al [1999] sugere um modelo que apresenta um processo de correção dos parâmetros anteriormente calculados para a linha de transmissão utilizando rotinas de cálculo de parâmetros. O modelo para simulações monofásicas foi obtido através do tratamento analítico do equivalente pi, do cálculo das matrizes $[Z]$ e $[Y]$ através de simulações com o programa EMTP e resultados dos ensaios de campo.

A aplicação da metodologia sugerida mostrou que os parâmetros mútuos de seqüência positiva entre as linhas de transmissão acopladas podem ter efeitos significativos e devem ser considerados nos estudos elétricos.

A metodologia desenvolvida neste trabalho realiza o cálculo dos parâmetros levando em conta os aspectos citados acima, incluindo o esquema de transposição, obtendo valores mais próximos do real conforme será visto nas simulações do capítulo 4.

2.9 Resumo

Neste capítulo foram discutidos aspectos relativos à representação da linha de transmissão em estudos de fluxo de potência de uma forma geral e para a linha de circuito duplo em particular. Foram descritos os programas utilizados para o cálculo do fluxo de potência e dos parâmetros da linha de transmissão necessários para esse propósito. Finalmente foram analisados alguns esquemas de transposição utilizados para diminuir o desequilíbrio entre as fases da linha de transmissão.

No capítulo a seguir, será desenvolvida uma metodologia para o cálculo dos parâmetros da linha de transmissão considerando o acoplamento eletromagnético e o esquema de transposição para linhas de transmissão fisicamente próximas.

Capítulo 3

Metodologia Implementada

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

Para estudos de fluxo de potência, uma linha de transmissão multifásica com várias seções de transposição pode ser representada por uma conexão em cascata de circuitos pi, em que cada circuito pi corresponde a uma seção da linha. A Figura 3.1 mostra a conexão de dois circuitos pi, representando uma linha com duas seções.

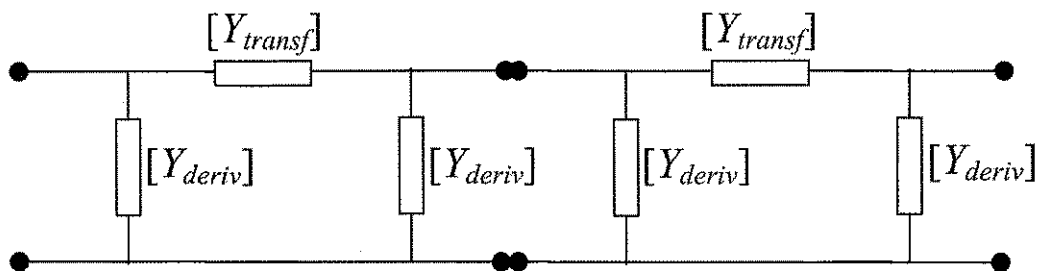


Figura 3.1 – Conexão em cascata de dois circuitos pi representando uma linha de transmissão com duas seções.

A cada dois circuitos pi conectados em cascata é possível eliminar o nó interno através da transformação estrela-delta, reduzindo um sistema de $3m$ equações

nodais em um sistema de $2m$ equações.

3.2 Processo de Redução de Matrizes

Seja o sistema de equações lineares

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

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

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

A Equação (3.2) também pode ser escrita como,

$$[A_{11}][x_1] + [A_{12}][x_2] = [b_1]. \quad (3.3a)$$

$$[A_{21}][x_1] + [A_{22}][x_2] = [b_2]. \quad (3.3b)$$

Resolvendo a Equação (3.3b) 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) na Equação (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 $[A]$ $n \times n$, tem-se:

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

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 $[A_{11}^{reduzida}]$ de acordo com a Equação (3.7). O resultado final é:

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

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

Uma rotina foi desenvolvida com o objetivo de obter o circuito pi equivalente de uma cascata de n circuitos pi entre os nós 1 e 2, além de calcular os parâmetros de uma linha de transmissão considerando os efeitos da transposição e do acoplamento. O algoritmo está descrito a seguir:

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 EMTP;

2. Montar a matriz de admitância entre os dois primeiros circuitos pi;
3. Calcular o circuitos pi equivalente;
4. Montar a matriz de admitância entre o equivalente obtido e o próximo circuitos pi.
Retornar ao 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 (2.23).

Para uma linha de circuito duplo, o segundo e o quinto elementos invertidos da diagonal principal da matriz de admitâncias de transferência em componentes simétricas são a impedância de seqüência positiva do circuito 1 e do circuito 2, respectivamente, como pode ser observado na Equação (2.34) e repetida convenientemente na Equação (3.12). De maneira análoga, pode-se obter as admitâncias em derivação de seqüência positiva para os circuitos 1 e 2.

$$[Z'_{sim}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z'_{oop1} & 0 & 0 & Z'_{oo12} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++p1} & 0 & 0 & Z'_{++12} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--p1} & 0 & 0 & Z'_{--12} \\ \hline Z'_{oo21} & 0 & 0 & Z'_{oop2} & 0 & 0 \\ 0 & Z'_{++21} & 0 & 0 & Z'_{++p2} & 0 \\ 0 & 0 & Z'_{--21} & 0 & 0 & Z'_{--p2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

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 (3.12). 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,

2004].

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

Neste trabalho foi adotada a representação dos parâmetros de seqüência positiva, próprios e mútuos, utilizados no programa de fluxo de potência de acordo com a configuração do sistema elétrico mostrado na Figura 3.2.

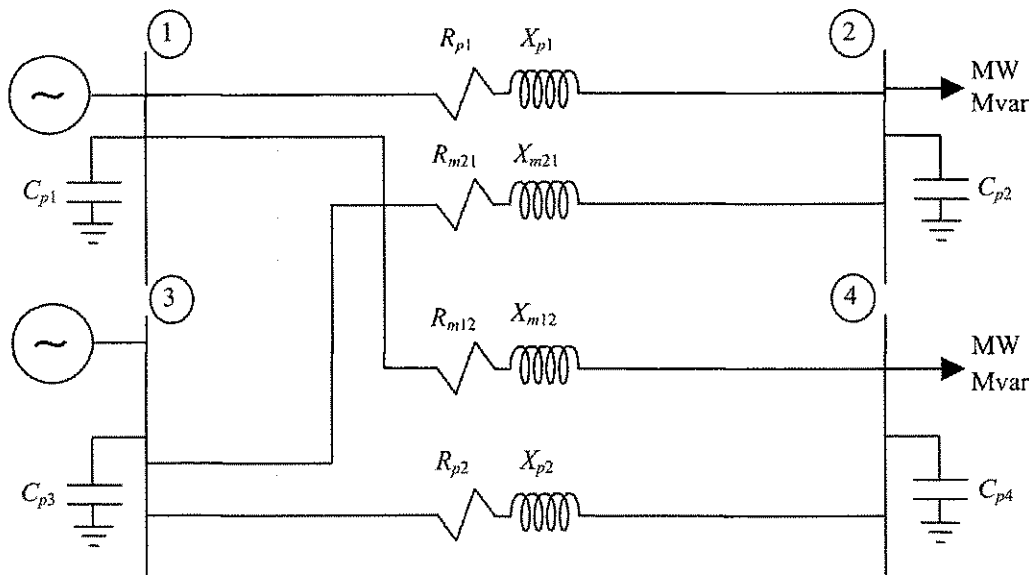


Figura 3.2 – Configuração de um sistema elétrico com a representação dos parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para estudo de fluxo de potência.

Nesta configuração estão representadas as resistências e reatâncias próprias do circuito 1 (R_{p1} e X_{p1}) e do circuito 2 (R_{p2} e X_{p2}), além das resistências e reatâncias mútuas entre os circuitos 1 e 2 (R_{m12} e X_{m12}) e entre os circuitos 2 e 1 (R_{m21} e X_{m21}).

3.5 Resumo

Foi desenvolvida uma metodologia para o cálculo dos parâmetros para linhas de transmissão fisicamente próximas com forte acoplamento entre os circuitos. No

próximo capítulo será feita uma aplicação da metodologia apresentada utilizando dois exemplos com dados de linhas de transmissão do sistema elétrico da CHESF. Inicialmente será utilizado um trecho de 300 km de uma linha de transmissão de circuito duplo e em seguida os dois circuitos de FEX da linha de transmissão entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza.

Capítulo 4

Análise de Resultados

4.1 Simulações para o Esquema de Transposição de Três Seções

Para essa análise foi utilizada a configuração de uma linha de transmissão da CHESF, com nível de tensão de 230 kV e extensão de 300 km em circuito duplo, conforme

Figura 4.1.

Condutores das Fases: $R_{dc} = 0,098 \Omega/\text{km}$; Diâmetro: 2,515 cm
Condutores dos Cabos Pára-raios: $R_{dc} = 0,605 \Omega/\text{km}$; Diâmetro: 0,934 cm
Comprimento da Linha: 300,0 km ; Resistividade do Solo: $457,0 \Omega \cdot \text{m}$

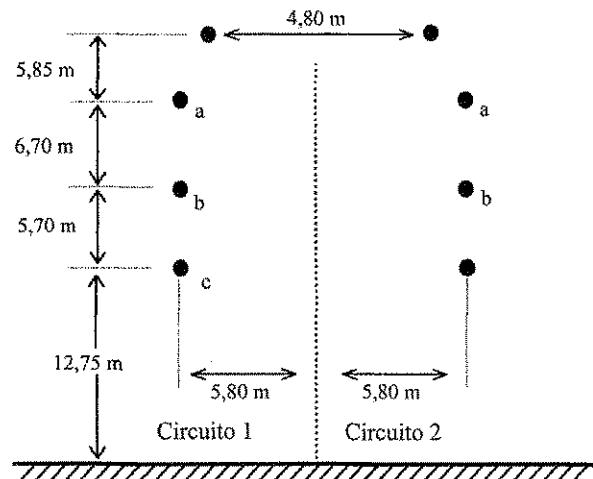


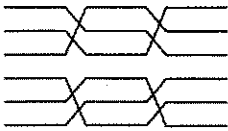
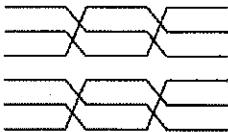
Figura 4.1 – Configuração típica de uma linha de transmissão da CHESF de 230 kV em circuito duplo.

Foram utilizadas para o cálculo dos parâmetros, a resistência, R , a reatância indutiva, X , e a capacitância, C , de seqüência positiva, incluindo o acoplamento entre os circuitos de acordo com a metodologia apresentada no capítulo anterior.

Os estudos foram realizados com os esquemas de transposição das Figuras 2.7 e 2.8.

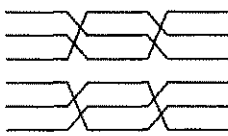
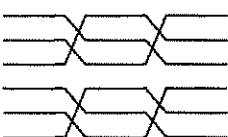
A Tabela 4.1 mostra os parâmetros próprios de seqüência positiva obtidos com a rotina implementada para os esquemas de transposição de três seções com a transposição do circuito 2 realizada no sentido contrário e no mesmo sentido da utilizada para o circuito 1. C é a capacitância em derivação a ser conectada em cada terminal da linha de transmissão.

Tabela 4.1 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para os esquemas de transposição das Figuras 2.7 e 2.8.

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

A tabela 4.2 mostra os parâmetros mútuos de seqüência positiva para as mesmas situações.

Tabela 4.2 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para os esquemas de transposição das Figuras 2.7 e 2.8.

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

Pode-se observar na Tabela 4.1 que o efeito de transposição provocou alterações somente nas capacitâncias em derivação nos parâmetros próprios de seqüência positiva, uma vez que as referidas capacitâncias dependem da geometria da linha de transmissão. Na Tabela 4.2 verifica-se que os circuitos 1 e 2 apresentam impedâncias mútuas de seqüência positiva diferentes. Nota-se, no entanto, que o acoplamento entre os circuitos é relativamente baixo, para os dois esquemas de transposição, visto que os valores das impedâncias mútuas são bem superiores aos das próprias.

Os parâmetros calculados foram utilizados em um estudo de fluxo de potência considerando a configuração mostrada no Capítulo 3, conforme Figura 3.2.

Os valores utilizados de carga ativa e reativa estão mostrados na Tabela 4.3.

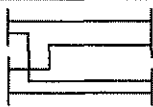

Tabela 4.3 – Valores de carga utilizados para o estudo de fluxo de potência.

Barra	Carga ativa	Carga reativa
2	114,0 MW	28,5 Mvar
4	114,0 MW	28,5 Mvar

Para esse estudo, adotou-se a barra 1 como barra de tensão controlada (PV), a barra 3 como barra de referência ($V\theta$) e as barras 2 e 4 como barras de carga (PQ). Foram realizadas duas simulações com o programa ANAREDE [CEPEL, 1999]: uma delas considerando o acoplamento entre os circuitos e a outra considerando os circuitos sem acoplamento.

A Tabela 4.4 mostra os resultados das simulações considerando as linhas de transmissão com o esquema de transposição no mesmo sentido.

Tabela 4.4 – Dados comparativos da solução do fluxo de potência com o esquema de transposição no mesmo sentido, com e sem acoplamento.

Circuito		
	Com Acoplamento	Sem Acoplamento
1	$P = 122,8 \text{ MW}$	$P = 121,4 \text{ MW}$
	$Q = 46,0 \text{ Mvar}$	$Q = 47,6 \text{ Mvar}$
2	$P = 119,6 \text{ MW}$	$P = 121,5 \text{ MW}$
	$Q = 49,2 \text{ Mvar}$	$Q = 50,7 \text{ Mvar}$

Pode-se observar na Tabela 4.4 que as diferenças entre a solução do fluxo de potência considerando ou não o acoplamento entre os circuitos são relativamente pequenas. Entretanto, a geração de potência reativa diminui quando é levado em consideração o acoplamento. Esse resultado é concordante com a solução do problema reportado pela CHESF em [RÉGIS Jr. et al, 1995; RÉGIS Jr. et al, 1999], quando os estudos realizados sem considerar o forte acoplamento entre os circuitos paralelos de linhas de transmissão de feixe expandido indicavam quantidade de potência reativa suprida pelo compensador estático de Fortaleza bem superior à que estava sendo medida.

4.2 Simulações para o Esquema de Transposição da Linha PAF–FTZ

Nesse exemplo, foi utilizada a configuração típica de uma linha de transmissão de feixe expandido de 230 kV em circuito duplo, com comprimento de 678,90 km, pertencente a CHESF, utilizada no trecho Paulo Afonso – Fortaleza, mostrada na Figura 4.2. Foram calculados a resistência, a reatância indutiva e a capacitância de seqüência positiva, considerando o acoplamento entre os circuitos, de acordo com a metodologia apresentada no capítulo 3.

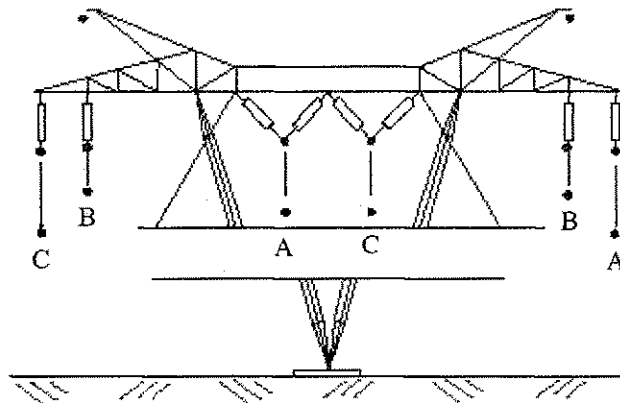


Figura 4.2 – Configuração típica de uma linha de transmissão de Feixe Expandido da CHESF, utilizada no trecho Paulo Afonso – Fortaleza.

O esquema de transposição da linha de feixe expandido é mostrado na Figura 4.3. A linha apresenta três trechos: o primeiro deles está compreendido entre as barras de Paulo Afonso (PA200 e PA300) e a barra de Milagres (MLG) e tem comprimento de 260,30 km, o segundo trecho está entre as barras de Milagres e Banabuiú (BNB) com comprimento de 225,80 km, e o terceiro trecho está compreendido entre as barras de Banabuiú e Fortaleza (FTZ) com comprimento de 192,80 km.

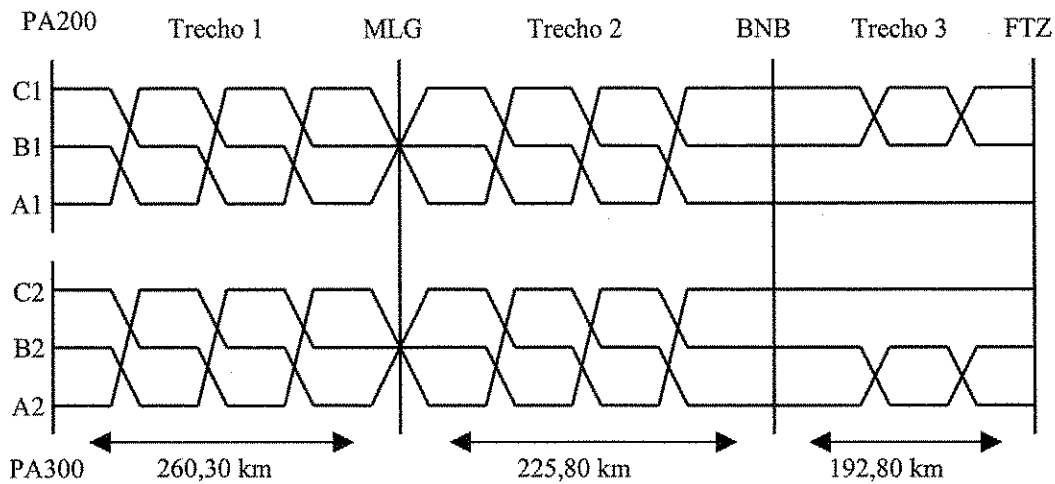


Figura 4.3 – Esquema de transposição da linha de transmissão de Feixe Expandido da CHESF (678,90 km).

As tabelas 4.5 e 4.6 mostram os resultados obtidos para os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva, respectivamente, calculados com a rotina implementada para o trecho 1. Da mesma forma, as tabelas 4.7 e 4.8 mostram, respectivamente, os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para o trecho 2 e, finalmente, os parâmetros próprios e mútuos de seqüência positiva para o trecho 3 são apresentados nas tabelas 4.9 e 4.10, respectivamente. C é a capacitância a ser conectada em cada terminal da linha.

Tabela 4.5 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 1 da linha FEX da CHESF.

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
11,97	69,50	1,97	1,93	11,97	67,42	2,23	2,28

Tabela 4.6 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 1 da linha FEX da CHESF.

Entre os circuitos 1 e 2		Entre os circuitos 2 e 1	
$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$	$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$
0,634	1,709	0,656	1,754

Tabela 4.7 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 2 da linha FEX da CHESF.

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
10,39	59,39	2,02	2,05	10,61	59,84	1,81	1,72

Tabela 4.8 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 2 da linha FEX da CHESF.

Entre os circuitos 1 e 2		Entre os circuitos 2 e 1	
$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$	$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$
0,610	1,593	0,627	1,628

Tabela 4.9 – Parâmetros próprios de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 3 da linha FEX da CHESF.

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
9,25	46,27	1,71	1,70	9,45	56,30	1,44	1,44

Tabela 4.10 – Parâmetros mútuos de seqüência positiva para o esquema de transposição do trecho 3 da linha FEX da CHESF.

Entre os circuitos 1 e 2		Entre os circuitos 2 e 1	
$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$	$R_m(k\Omega)$	$X_m(k\Omega)$
0,380	1,003	0,379	1,002

A medida que as seções de transposição são conectadas à cascata de circuitos π , a reatância série da linha por unidade de comprimento diminui e a capacitância em derivação por unidade de comprimento aumenta.

Os parâmetros calculados foram utilizados em um caso de estudo de fluxo de potência fictício, usando dados de linhas reais para cada um dos três trechos do esquema de transposição da Figura 4.3.

Os valores utilizados para a carga ativa e reativa nas barras de Milagres, Banabuiú e Fortaleza são mostrados na Tabela 4.11.

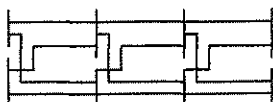
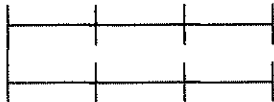
Tabela 4.11 – Valores de carga utilizados nas barras de Milagres, Banabuiú e Fortaleza para estudo de fluxo de potência na linha FEX da CHESF.

Barra	Carga ativa	Carga reativa
MLG	94,6 MW	38,0 Mvar
BNB	58,6 MW	8,4 Mvar
FTZ	218,2 MW	18,4 Mvar

Para esse estudo, adotou-se a barra PA200 como barra de referência ($V\theta$) e a barra PA300 como barra de tensão controlada (PV), ambas com tensão de 0,975 p.u., e as demais barras, MLG, BNB e FTZ, como barras de carga (PQ). Com o objetivo de analisar a influência do acoplamento entre os circuitos, foram realizadas duas simulações com o programa ANAREDE [CEPEL, 1999]: uma delas considerando o acoplamento entre os dois circuitos que compõem a linha de feixe expandido da CHESF e a outra considerando os circuitos sem acoplamento. A representação do acoplamento foi realizada utilizando a metodologia descrita no capítulo 3, seção 3.4.

A Tabela 4.12 mostra os resultados das simulações para o fluxo de potência no último trecho, entre as subestações de Banabuiú e Fortaleza, considerando a linha de transmissão com o esquema de transposição de acordo com a Figura 4.3.

Tabela 4.12 – Dados comparativos da solução de fluxo de potência para a linha FEX da CHESF com e sem acoplamento.

Barra	 Com Acoplamento	 Sem Acoplamento
FTZ	$P = 227,2 \text{ MW}$	$P = 221,4 \text{ MW}$
	$Q = -8,4 \text{ Mvar}$	$Q = -51,6 \text{ Mvar}$

Pode-se observar na Tabela 4.12 que a diferença entre a solução do fluxo de potência considerando ou não o acoplamento entre circuitos é bastante significativa com relação ao fluxo de potência reativa. Em valores absolutos, tem-se 43,2 Mvar a mais quando não se considera o acoplamento entre os circuitos. No que se refere ao fluxo de potência ativa, a diferença é pequena quando se considera ou não o acoplamento entre os circuitos.

Os resultados obtidos com as simulações podem ser utilizados para esclarecer melhor o problema reportado pela CHESF em [RÉGIS Jr. et al, 1995] e [RÉGIS Jr. et al, 1999] quando os estudos realizados sem considerar o forte acoplamento entre circuitos paralelos de linhas de feixe expandido indicavam quantidade de potência reativa suprida pelo compensador estático de Fortaleza bem superiores a que estava sendo medida.

Embora os resultados estejam na direção da solução do problema vivenciado pela CHESF, nem sempre essa diferença acentuada no fluxo de potência reativa se verifica. A diferença pode ser menor dependendo da configuração do sistema elétrico estudado, do esquema de transposição ou do carregamento das linhas de transmissão.

Capítulo 5

Conclusões

Foi desenvolvido um processo de cálculo dos parâmetros para uma linha de transmissão de circuito duplo considerando os efeitos do acoplamento entre os circuitos e o esquema de transposição utilizado. O modelo representa a linha de transmissão por uma cascata de circuitos π e reduz a um circuito π equivalente, calculando os parâmetros R , L e C de seqüência positiva para utilização em programas de cálculo de fluxo de potência.

Da metodologia implementada, três pontos merecem destaque:

1. a utilização da rotina de redução de matrizes na montagem do circuito π equivalente reduzido;
2. a representação da linha de transmissão por uma cascata de circuitos π e o conseqüente processo de redução. Durante o processo é calculado o equivalente reduzido de toda a cascata na forma de uma matriz de admitância nodal. Da maneira como foi realizado, calculando o circuito π equivalente reduzido dois a dois até o final da cascata, para qualquer

número de circuitos π , a montagem do equivalente reduzido será sempre viável;

3. a representação do acoplamento em programas de cálculo 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.

De acordo com as simulações efetuadas foi observado que a potência reativa diminui quando é levado em consideração o acoplamento no cálculo dos parâmetros da linha de transmissão. Além disso, também foi incluído nesse cálculo a maneira como os circuitos foram transpostos. Nos estudos realizados na época da implantação do feixe expandido em linhas de transmissão entre as subestações de Paulo Afonso e Fortaleza, havia divergências no cálculo do fluxo de potência e o observado no campo. Certamente, o cálculo dos parâmetros da forma desenvolvida neste trabalho contribuiria para esclarecer as diferenças observadas. Com a utilização da metodologia proposta é possível obter resultados mais confiáveis para o cálculo do fluxo de potência, no caso onde exista forte acoplamento entre as linhas de transmissão.

Como sugestão para trabalho futuro, será importante realizar um estudo de fluxo de potência que leve em consideração a configuração do sistema completo entre Paulo Afonso e Fortaleza conforme apresentado no início desse trabalho, ou configuração semelhante que apresente um forte acoplamento entre as linhas de transmissão. Como foi realizado pela CHESF em junho de 1997 para a ocorrência que motivou essa dissertação, serão necessários a realização de medições de campo das grandezas de interesse nos estudos e a montagem do sistema para o programa de fluxo de potência, elementos fundamentais para que seja utilizada e comprovada a metodologia desenvolvida.

Referências Bibliográficas

ALEXANDROV, G. N. and PODPORKYN, G, V. “*Improvement of the Efficiency of 35 to 220 kV Lines*”. *IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission*, pp. 226-231, September 1991.

CEPEL. *Programa de Análise de Redes, Manual do Usuário*, 1999.

CHESF/RT-24-20-07/91. *Análise da Necessidade do Segundo Circuito 500 kV para Milagres*, julho 1991.

CHESF/NT-DEPT-03-03-02/97. *Requisitos para a Transformação para 500 kV dos Circuitos Paulo Afonso – Milagres – Banabuiú - Fortaleza*, março 1997.

CHESF/CTI-92.98.1980.00. *Estudo da Transformação dos Circuitos de Feixe Expandido 230 kV entre Paulo Afonso e Fortaleza para 500 kV*, agosto 1999.

DOMMEL, H. W. “*Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multi-Phase Networks*”. *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, pp. 388-399, April 1969.

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

- EDUARDO, J. V., RÉGIS Jr., O., FREIRE, A. R. F., NÓBREGA, H. A, SOUZA, H. T., MORAES, H. M. “Experiência Operativa com as Linhas de Transmissão de 230 kV com Feixe Expandido da Área Norte da CHESF”. *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE – GOP 21*, Foz do Iguaçu, Paraná, 17 a 22 de outubro 1999.
- FREIRE, A. R. e PONTES, S. M. “Definição de Limites de Transmissão Considerando Restrições de Estabilidade de Tensão, Proteções e Qualidade de Energia”. *Anais do XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XV SNPTEE*, Foz do Iguaçu, Paraná, 17 a 22 de outubro 1999.
- GLOVER, J. D. and SARMA, M. S. *Power Systems Analysis and Design*. Third Edition, Brooks/Cole 2002.
- LEUVEN EMTP CENTER. *ATP – Alternative Transients Program – Rule Book*, Heverlee, Belgium, July 1987.
- MONTEIRO, J. S., NEVES, W. L. A, SOUZA, B. A, FERNANDES Jr., D. e FERNANDES, A. B. “Representação de Linhas de Transmissão Mutuamente Acopladas em Estudos de Fluxo de Potência”. Aceito para publicação nos *Anais do IEEE/PES T&D 2004 Latin America*, a ser realizada em São Paulo-SP, 08 a 11 de novembro 2004.
- RÉGIS Jr., O., MAIA, M. J. A., NETO, A. P. “Linhas não Convencionais de Potência Natural Elevada (LPNE): Estudos Paramétricos para Utilização em 69 kV e 138 kV”. *Anais do XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XII SNPTEE – GLT 09*, Recife, Pernambuco, outubro 1993.

RÉGIS Jr, O., CAVALCANTI, S. J. G., WAVRIK, J. F. A. G., MAIA, M. J. A. e PODPORKIN, G. V. "Recapitação de Circuitos 230 kV com o Conceito de Feixe Expandido". *Anais do XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – XIII SNPTEE – GLT 24*, Camboriu, 1995.

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 – GSI 05*, Foz do Iguaçu, Paraná, 17 a 22 de outubro 1999.

Apêndice

Linha de Potência Natural

Elevada - LPNE

A razão entre a potência transmitida (S) e a sua potência natural (P_n) deve estar de acordo com o seguinte limite:

$$\frac{S}{P_n} \leq 1, \quad (1)$$

que é obtido através da redução da queda de tensão e das perdas na linha de transmissão. Foi demonstrado por [ALEXANDROV et al, 1991] que o aumento da potência natural pode ser alcançado pela redução dos espaçamentos entre fases e pela utilização de feixes de subcondutores em vez de condutores isolados.

A potência natural para uma linha de transmissão, expressa pelas relações entre tensões e campos elétricos, é dada por:

$$P_n = \frac{1}{20} nr_0 U_f \frac{E_{\max}}{k_i}, \quad (2)$$

em que

n é o número de condutores no feixe;

r_0 é o raio do condutor;

U_f é a tensão fase-terra;

E_{max} é o campo elétrico máximo na superfície dos condutores;

k_i é o coeficiente de irregularidade da distribuição das cargas e campos superficiais nos condutores (>1).

O equacionamento proposto mostra que a potência natural de uma linha de transmissão, mantido o nível de tensão, é função do número e área dos condutores e da distribuição do campo elétrico superficial dos mesmos.

O fator de utilização é proporcional ao campo elétrico, que ao ser maximizado proporciona uma maior potência natural, mesmo mantidos o número e a área dos condutores. Por outro lado este fator é penalizado pelas distorções na distribuição dos campos superficiais entre todos os condutores da linha de transmissão. Condutores em posição não adequada aumentam a distorção dos campos elétricos.

A otimização do arranjo geométrico das fases e dos feixes equaliza os campos elétricos, resultando em um valor máximo do fator de utilização e da potência natural. Para isso, altera-se a tradicional disposição dos condutores, introduzindo uma nova configuração de fases e de feixes assimétricos.

Por outro lado, a seleção da área de alumínio por fase, que define a resistência do cabo, é função das perdas, da densidade de corrente e do limite térmico da linha de transmissão.

A potência natural é inversamente proporcional à impedância de seqüência positiva e é dada por:

$$P_n = \frac{V^2}{Z_1} \quad (3)$$

O afastamento dos condutores de uma mesma fase reduz os acoplamentos magnéticos, causando redução da impedância própria de cada fase. Como a impedância de seqüência positiva pode ser calculada por:

$$Z_1 = Z_p - Z_m, \quad (4)$$

sendo Z_p a impedância própria da fase e Z_m a impedância mútua entre fases. A redução da impedância própria diminui a impedância de seqüência positiva e em conseqüência aumenta a potência natural da linha de transmissão.

No caso da torre compacta o ganho na potência natural ocorre por outra razão. Mantém-se o feixe convencional e com a aproximação das fases aumenta-se o acoplamento entre elas, e conseqüentemente, o valor das impedâncias mútuas. De acordo com a Equação (4), o aumento da impedância mútua reduz a impedância de seqüência positiva.

Na LPNE, no seu conceito mais completo, consegue-se elevar sobremaneira a potência natural pela atuação nas duas variáveis resultando em redução mais acentuada da impedância de seqüência positiva.

A CHESF em conjunto com o CEPEL extraiu dos estudos em LPNE subsídios para uma técnica mais simples de aumento da potência natural. Esta técnica denominada “Feixe Expandido” (FEX) é mais ágil em relação aos estudos, testes e implantação comercial, apresentando um menor custo que a LPNE no conceito original. Através de uma boa adequação do projeto é possível usar as mesmas torres, alterando-se apenas as ferragens e dimensões dos feixes. O aumento da potência natural é menor do que a LPNE, porém com atraente relação benefício/custo, aplicando-se tanto nas linhas de transmissão em construção quanto na recapitação das existentes.