



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência"

JÂINE HENRIQUE CANOSSA

Orientador: Prof. Dr. Dilson Amâncio Alves

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia, UNESP –
Campus de Ilha Solteira, para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica – Área de
Conhecimento: Sistemas Elétricos de
Potência.

Ilha Solteira – SP
agosto/2007

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

C227p Canossa, Jaine Henrique.
Um programa interativo para estudos de fluxo de potência / Jaine Henrique Canossa.
Ilha Solteira : [s.n.], 2007.
166 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Sistemas Elétricos de Potência, 2007

Orientador: Dilson Amâncio Alves.
Bibliografia: p. 142-146

1. Engenharia - Estudo e ensino. 2. Fator de potência. 3. Sistemas de energia elétrica.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

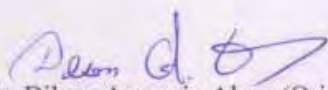
TÍTULO: Um Programa Interativo para Estudos de Fluxo de Potência

AUTOR: JAINE HENRIQUE CANOSSA

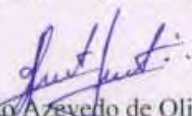
ORIENTADOR: Prof. Dr. DILSON AMANCIO ALVES

DATA DA REALIZAÇÃO: 20 de agosto de 2007

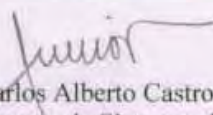
Aprovada com parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:



1. Dr. Dilson Amancio Alves (Orientador)
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



2. Dr. Sergio Azevedo de Oliveira
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira



3. Dr. Carlos Alberto Castro Júnior
Departamento de Sistemas de Energia Elétrica / Universidade Estadual de Campinas

Dedico esse trabalho aos meus pais, José Carlos Canossa e Cleuza Fantini Canossa, ao meu irmão Ricardo Vinícius Canossa e aos meus amigos. Sou-lhes grato por seu apoio, carinho e dedicação extremados.

AGRADECIMENTOS

- *A Deus, em primeiro lugar, que me permitiu ter a capacidade para realizar este trabalho e em seguida aos que nas horas difíceis estiveram comigo me ajudando.*
- *Aos meus pais, José Carlos Canossa e Cleusa Fantini Canossa pela sólida formação dada até minha juventude, que me proporcionou a continuidade nos estudos até a chegada a esse mestrado.*
- *Ao meu orientador Prof. Dr. Dilson Amâncio Alves pela grande oportunidade que me deu de realizar este trabalho, pela confiança, competência, disposição e atenção a mim prestadas em todos os momentos.*
- *A todos os funcionários do DEE, que de uma maneira ou outra colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.*
- *Aos meus amigos do alojamento da UNESP, e um agradecimento especial aos amigos Hélio, Adriano, Silvio, Vlademir, Wilingthon, Andre, Daltin, Nilton, Edilton e Marcelo.*

RESUMO

Este trabalho apresenta um programa interativo para a simulação do fluxo de potência e do fluxo de potência continuado. O programa foi desenvolvido no ambiente *MATLAB* e a simulação é realizada por meio de uma interface gráfica. A interface gráfica não só proporciona um bom desempenho computacional, mas também torna o programa mais amigável para o usuário. Através dela o usuário pode editar os arquivos de entrada e saída e visualizar e analisar os resultados obtidos diretamente na tela do computador. A partir do diagrama unifilar dos sistemas, a interface gráfica permite que o usuário: mude os parâmetros do sistema (dados de barras e de linhas de transmissão); remova uma linha de transmissão com um simples clicar sobre ela; visualize os perfis de tensão nas barras, e os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. Todas estas características fazem do programa desenvolvido uma ferramenta recomendada para fins educacionais.

Palavras-chave— Educação em Engenharia Elétrica, Análise de Fluxo de Potência, *MATLAB*, Sistema de Potência.

ABSTRACT

This work presents an interactive computing program for power flow and continuation power flow simulations. The power flow and continuation power flow programs were developed in the *MATLAB* environment and the simulation is accomplished through a graphical user interface. The graphical user interface provides not only a good computational performance, but also an user-friendly teaching software. With the use of this interface the user can edit the input and output data files of the selected systems and can visualize and analyze the results of the program directly in the computer screen. Directly from the system one-line diagrams, the graphical user interface allows the user: to change the parameters of the system (bus and lines system data); to remove the transmission line clicking directly on it; to visualize the bus voltage profile, and the active and reactive power flows. All these characteristics make the developed program recommended for educational purposes.

Keywords— Power engineering education, power flow analysis, MATLAB, power systems.

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Modelo π equivalente da linha de transmissão	25
2.2 – Modelo de um transformador	27
2.3 – Modelo do transformador em fase	27
2.4 – Circuito equivalente π do transformador em fase.....	28
2.5 – Circuito equivalente π do transformador em fase para $a=1$	29
2.6 – Circuito equivalente π do transformador em fase para $a < 1$	29
2.7 – Circuito equivalente π do transformador em fase para $a > 1$	30
2.8 – Convenção para os fluxos de potência nas linhas de transmissão.....	30
2.9 – Fluxograma do Método de <i>Newton-Raphson</i>	36
2.10 – Fluxograma do Método de <i>Newton Desacoplado Simultâneo</i>	38
2.11 – Fluxograma do Método de <i>Newton Desacoplado Alternado</i>	39
2.12 – Fluxograma de controle exercido nas barras de tensão controladas (PV).....	42
3.1 – Diagrama unifilar do sistema de 5 barras	48
3.2 – Diagrama unifilar do sistema de 9 barras	48
3.3 – Diagrama unifilar do sistema de 14 barras do IEEE	49
3.4 – Diagrama unifilar do sistema de 30 barras do IEEE	49
3.5 – Tela principal do programa Fluxo de Potência	50
3.6 - Caixa de diálogo Escolha do Sistema para a escolha do sistema a ser simulado ..	51
3.7 – Caixa de diálogo Resolve Fluxo de Potência para a escolha do método de solução	53
3.8 – Relatório Sumário de Mismatch	54
3.9 – Relatório Sumário do Sistema por Áreas	54
3.10 – Relatório Sumário de Barras Slack	55

3.11 – (a) – Relatório de Sumário de Barras Reguladas e (b) Relatório de Sumário de Transformadores	56
3.12 – Relatório de Fluxo de Potência para o IEEE-14	57
3.13 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-14 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras, obtidas pelo método de <i>Newton-Raphson</i>	61
3.14 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-30 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras, obtidas pelo método de <i>Newton-Raphson</i>	61
3.15 – Caixa de diálogo Visualização de Fluxos e Perdas para visualização das perdas ativa e reativas e dos fluxos de potência ativa e reativa, nas LT pertencentes a primeira vizinhança da barra selecionada	62
3.16 – Fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 2	62
3.17 – As perdas de potência ativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 2	63
3.18 – Fluxo de potência reativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 3	64
3.19 – As perdas de potência reativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 3	64
3.20 – Balanço de potência reativa no modelo π da LT entre as barras 2 e 3	65
3.21 – Balanço de potência reativa no modelo π da LT entre as barras 3 e 4	65
3.22 – Modelo do transformador em-fase, situado entre as barras 4 e 9, e o correspondente modelo π	67
3.23 – Gráfico de Colunas de todas as tensões do sistema IEEE-14 correspondentes ao resultado do Fluxo de Carga para o caso base	68
3.24 – Caixa de diálogo Exibe Dados do Sistema para escolha do tipo de dados do sistema a serem visualizados ou alterados	69
3.25 – Diagrama unifilar e caixa de diálogo Dados de Barras com os dados referentes à barra 2	70
3.26 – Caixa de diálogo para a Alteração da Topologia da Rede	71
3.27 – Caixa de diálogo Dados do Circuito com os dados da LT situada entre as barras 2 e 3	71

3.28 – Diagrama Unifilar do sistema IEEE-14 após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5	72
3.29 – Banco de dados das linhas de transmissão do sistema IEEE-14 após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5	73
3.30 – Relatório Sumário de <i>Mismatch</i> para o sistema IEEE-14 após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5	74
3.31 – Relatório do Fluxo de Potência para o sistema IEEE-14 sem a LT situada entre as barras 1 e 5	70
3.32 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-14 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras, obtidas pelo método de <i>Newton-Raphson</i> após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5	76
3.33 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> , considerando a barra 1 como referência angular.....	80
3.34 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> , considerando a barra 3 como referência angular.....	80
3.35 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> , considerando a barra 1 como referência angular e a barra 3 atendendo metade da carga	81
3.36 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> , considerando a barra 3 como referência angular e a barra 1 atendendo metade da carga	81
3.37 – Fluxos de potência para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 1 como referência angular: (a) fluxos de potência ativa e reativa com a tensão da barra 3 igual a 1,055 p.u. e a potência ativa gerada fixa em 90 MW, (b) fluxos de potência ativa e reativa com a tensão da barra 3 igual a 1,055 p.u. e a potência ativa gerada fixa em 92,952 MW	83

3.38 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 1 como referência angular e a tensão da barra 3 igual a 1,05535 p. u. e a potência ativa gerada fixa em 93,159 MW	84
3.39 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> , considerando a barra 1 como referência angular com ângulo igual a 40°	85
3.40 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 3 como referência angular com magnitude de tensão igual a 1,025 p.u. e a barra 1 como barra de carga igual com potência igual a zero	87
3.41 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 1 como referência angular com magnitude de tensão igual a 0,9663 p.u. e fase zero, e a barra 3 como barra de geração com as respectivas magnitude de tensão e potência ativa gerada iguais a 1,025 p.u. e 93,383 MW	88
3.42 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 9 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 1 como referência angular e o suprimento de uma carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida totalmente pela geração localizada na barra 2	90
3.43 – Mostra a barra PV (barra 2) como uma barra de folga, com tensão especificada no valor final desejado de magnitude de tensão (1,025 p.u.), e a barras de folga (barra 1) e PV (barra3), como barras de carga com os valores de potência ativa e reativa iguais a zero	91
3.44 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 9 barras obtidos pelo método de <i>Newton-Raphson</i> considerando a barra 1 como referência angular e o suprimento de uma carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida parcialmente pelas gerações localizadas nas barras 2 e 3	92
3.45 – <i>Mismatches</i> de potência ativa e reativa de todas as barras do sistema IEEE-14 .	95
3.46 – Tensões e potência reativa gerada das barras PV's, e tensões e <i>tap's</i> das barras controladas por <i>tap</i> , do sistema IEEE-14	96

3.47 – Caixa de diálogo Comparação de Métodos de <i>Newton</i> para a escolha do algoritmo	96
3.48 – Estados convergidos (tolerância de 10^{-3}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14, (b) IEEE-30	98
3.49 – Variação do <i>Mismatch</i> de cada um dos algoritmos (tolerância de 10^{-3}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14, (b) IEEE-30	99
3.50 – Variação do <i>Mismatch</i> de cada um dos algoritmos (tolerância de 10^{-2}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14 barras, (b) IEEE-30 barras	100
3.51 – Caixa de diálogo Processo Iterativo para o acompanhamento do processo de convergência do algoritmo de <i>Newton-Raphson</i>	101
4.1 – Método da continuação com preditor tangente	106
4.2 – Caixa de diálogo do FPC apresentando a curva P-V para a barra crítica (barra 30) do sistema IEEE-30	112
4.3 – Relatório do Fluxo de Potência Continuado , correspondente ao traçado da curva P-V do sistema IEEE-30	113
4.4 – Relatório de Fluxo de Potência para o PMC do caso base do sistema IEEE-30	115
4.5 – (a) Gráfico de barra e (b) perfil de tensão correspondentes ao PMC do sistema IEEE-30	116
4.6 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-30 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras correspondentes ao PMC, obtidas pelo FPC utilizando V_{30} como parâmetro da continuação	117
4.7 – Curvas P-V para contingências de LT do sistema IEEE14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas LT entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da LT entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência de duas LT entre as barras 1 e 2	120
4.8 – Curvas P-V para o caso base e para a contingência de uma das duas LT entre as barras 2 e 5 do sistema IEEE-30	121
4.9 – Diagrama unifilar do sistema IEEE-30 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras correspondentes ao PMC pós, obtidas pelo FCC utilizando V_{30} como parâmetro da continuação, para a contingência da LT situada entre as barras 2 e 5	122

4.10 – Contingência de todas as linhas de transmissão do sistema IEEE-30 barras	123
4.11 – As dez piores contingência do sistema IEEE-30 barras	123
4.12 – Curva Q-V	125
4.13 – Curvas Q-V do sistema IEEE-14 correspondentes à três condições de operação: curva 1 (caso base, $\lambda=1$), curva 2 (caso base PMC, $\lambda=1,77$), e curva 3 (caso base, $\lambda=1,9$) obtidas pelo FCC utilizando V14 como parâmetro da continuação	126
4.14 – (a) Curvas Q-V do sistema IEEE-14 correspondentes à duas condições de operação: curva 5 (caso base PMC, $\lambda=1,77$), curva 4 (curva característica do banco <i>shunt</i>) e curva 6 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) considerando um banco shunt de valor igual a 53,306 MVar, (b) caixa de diálogo Dados de Barras	128
4.15 – Curvas P-V do sistema IEEE-14 correspondentes à duas condições de operação: curva 7 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) e curva 8 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) considerando um banco shunt de valor igual a 53,306 MVar	129
4.16 – Curvas Q-V correspondentes à pior contingência N-1 do sistema IEEE-30: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-1 (caso base, $\lambda=1,0$); e curva 3, contingência N-1 considerando o carregamento do caso base + 5% ($\lambda=1,05$)	132
4.17 – Curvas Q-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base + 5% ($\lambda=1,05$); e curva 4, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14	133
4.18 – Curvas P-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14	134
4.19 – Curvas P-V para o caso base e para a contingência de uma das duas LT entre as barras 2 e 5 do sistema IEEE-30 barras	136

4.20 – Curvas P-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 36,924 MVar na barra 14	137
4.21 – Curvas Q-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento desejado ($\lambda=1,05263$); e curva 4, contingência N-2 considerando o carregamento desejado e a inserção de um banco de capacitores de 36,924 MVar na barra 14	138
A1 – Exemplo da função <i>Figure</i>	148
A2 – Exemplo do <i>BackgroundColor</i>	151
A3 – Exemplo do <i>ForegroundColor</i>	152
A4 – Exemplo do <i>HorizontAlingment</i> com o valor de <i>left</i>	152
A5 – Botão (<i>pushbutton</i>)	153
A6 – Botão Radio <i>Buttons</i>	154
A7 – Caixa de Texto (<i>edit</i>)	154
A8 – <i>Frame</i>	154
A9 – Text	155
B1 – Sistema 5 barras	158
B2 – Sistema 9 barras	159
B3 – Sistema IEEE 14 barras	161
B4 – Sistema IEEE 30 barras	164

LISTA DE TABELAS

4.1 – Critérios para estabelecimento de margem em estudos de estabilidade de tensão..	130
B1 – Dados da matriz barras (5 barras).....	156
B2 – Dados da matriz linhas (5 barras)	157
B3 – Dados da matriz barras (IEEE 9 barras).....	158
B4 – Dados da matriz linhas (IEEE 9 barras).....	159
B5 – Dados da matriz barras (IEEE 14 barras).....	160
B6 – Dados de Linha (IEEE 14 barras).....	160
B7 – Dados da matriz barras (IEEE 30 barras).....	162
B8 – Dados de Linha (IEEE 30 barras).....	163

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>IEEE</i>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<i>Matlab</i>	Matrix Laboratory
<i>MW</i>	mega watts
<i>MVA_r</i>	Mega volt-ampère reativo
<i>p.u.</i>	Por unidade
<i>PMC</i>	Ponto de máximo carregamento
<i>SEE</i>	Sistemas de energia elétrica
<i>FC</i>	Fluxo de carga
<i>FCC</i>	Fluxo de carga continuado
<i>LT</i>	Linha de transmissão

LISTA DE SIMBOLOS

V_k	Módulo da tensão na barra k
θ_k	Ângulo da tensão na barra k
P_k	Potência ativa líquida calculada na barra k
Q_k	Potência reativa líquida calculada na barra k
Ω_k	Conjunto das barras vizinhas a barra k , incluindo a barra k
P_k^{esp}	Potência ativa especificada na barra k
Q_k^{esp}	Potência reativa especificada na barra k
P_{gk}	Potência ativa gerada na barra k
P_{ck}	Potência ativa consumida na barra k
Q_{gk}	Potência reativa gerada na barra k
Q_{ck}	Potência reativa consumida na barra k
G	Parte real da matriz admitância
B	Parte imaginária da matriz admitância
Y	Matriz admitância nodal
λ	Parâmetro de carga ou parâmetro de carregamento
J	Matriz Jacobiana
σ	Tamanho do passo a ser dado na direção do vetor tangente

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	18
2 – FLUXO DE POTÊNCIA	20
2.1 – INTRODUÇÃO	20
2.2 – EVOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA	21
2.3 – APLICAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA	22
2.4 – FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA	23
2.5 – MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E TRANSFORMADORES ..	25
2.5.1 – LINHAS DE TRANSMISSÃO	25
2.5.2 – TRANSFORMADORES	27
2.5.3 – CONVENÇÃO DE SINAIS PARA OS FLUXOS DE POTÊNCIA	30
2.6 – EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIA	31
2.7 – MÉTODO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i> NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIA	32
2.7.1 – ALGORITMOS BÁSICO	33
2.7.2 – FLUXOGRAMA DO MÉTODO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i>	35
2.8 – MÉTODO DE NEWTON DESACOPLADO NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA	36
2.8.1 – ALGORITMO BÁSICO DO MÉTODO DE <i>NEWTON</i> DESACOPLADO	37
2.9 – CONTROLES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO.....	40
2.9.1 – CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO EM BARRAS PV	40
2.9.2 – TRANSFORMADORES EM FASE COM CONTROLE AUTOMÁTICO DE <i>TAP</i>	42

3 – DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA PARA O PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA E FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO	44
3.1 – INTRODUÇÃO	44
3.2 – CARACTERÍSTICA DA INTERFACE GRÁFICA DESENVOLVIDA	47
3.3 – CARACTERÍSTICAS DAS JANELAS DESENVOLVIDAS	50
3.3.1 – MÉTODO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i>	52
3.3.1.1 – RELATÓRIO DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA	53
3.3.1.2 – INTERFACE GRÁFICA PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA VIA DIAGRAMA UNIFILAR	58
3.3.1.3 – TELAS PARA CONSULTAS E ALTERAÇÃO DOS DADOS DO SISTEMA, E ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA VIA DIAGRAMA UNIFILAR	68
3.4 – O PAPEL DA BARRA DE FOLGA NO FLUXO DE POTENCIA	76
3.4.1 – INFLUENCIA NO BALANÇO DE POTÊNCIA DO SISTEMA E NAS PERDAS NA TRANSMISSÃO	77
3.4.1.1 – PROCEDIMENTO DE AJUSTE SUCESSIVO	82
3.4.2- REFERÊNCIA ANGULAR	85
3.4.2.1 – FORNECIMENTO DAS PERDAS	86
3.5 – EFEITOS DA ATUALIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ JACOBIANA DURANE O PROCESSO ITERATIVO DE <i>NEWTON-RAPHSON</i> .	93
3.5.1- CASO BASE DO IEEE-14 USANDO O MÉTODO <i>NEWTON-RAPHSON</i>	94
3.5.2- COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS <i>NEWTON-RAPHSON</i> E <i>NEWTON-RAPHSON</i> DESACOPLADO	96
4 – FLUXO DE CARGA CONTINUADO.....	103
4.1 – INTRODUÇÃO	103
4.2 – MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	104
4.2.1- PREDITOR	105

4.2.2- CONTROLE DO PASSO PREDITOR	108
4.2.3- PASSO CORRETOR E PARAMETRIZAÇÃO	109
4.2.4- INTERFACE GRÁFICA PARA O FCC	110
4.3 – ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	118
4.4 – CURVA Q-V	124
4.5 – ANÁLISE QV E PV	129
4.5.1- DETERMINAÇÃO DA MÍNIMA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA	130
4.5.2- DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE POTÊNCIA ATIVA	135
5 – CONCLUSÕES	139
5.1 – CONCLUSÃO GERAL	139
5.2 – MOTIVAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	140
REFERÊNCIAS	142
APÊNDICE A	147
A.1 – INTRODUÇÃO	147
A.2 – CARCTERÍSTICA DOS RECURSOS GRÁFICOS DO <i>MATLAB</i>	148
A.2.1 – PROPRIEDADES DA FUNÇÃO <i>FIGURE</i>	149
A.3 – CONTROLANDO OS CONTROLES	149
A.3.1 – O COMANDO UICONTROL	150
A.3.1.1 – PARÂMETROS DO UICONTROL	150
A.3.1.2 – TIPOS DE UICONTROL	153
APÊNDICE B	156
B.1 – ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS	156
APÊNDICE C	165
C.1 – PUBLICAÇÕES	165

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta um programa interativo para a simulação do fluxo de potência, que consta do método de *Newton-Raphson* e do método da Continuação. A simulação é realizada por meio de uma interface gráfica. Tanto a interface gráfica quanto os programas foram desenvolvidos no *Software Matlab*, em um ambiente integrado, proporcionando dessa forma, além de um bom desempenho computacional, um ambiente mais amigável para o usuário. O método de *Newton-Raphson* é um dos métodos mais utilizados no cálculo do fluxo de potência. O método da continuação é uma ferramenta poderosa para obtenção das curvas de solução de equações algébricas não lineares. Ao contrário dos programas de fluxo de potência convencionais, o método da continuação pode calcular soluções do fluxo de potência tanto nas proximidades do ponto de máximo carregamento quanto no próprio ponto, onde os programas tradicionais não convergem ou levam muito tempo para alcançar uma solução. O método mais usado consiste de quatro elementos básicos: um passo preditor, um procedimento de parametrização, um controle de passo e um passo corretor.

O programa desenvolvido para o cálculo do fluxo de potência pelos métodos citados acima, contém uma interface gráfica para que o usuário não precise editar arquivos de entrada e saída de dados, e possa gerar e alterar configurações de sistemas elétricos manipulando diretamente o diagrama unifilar desenhado na tela do computador. Tal interface também deve

plotar os resultados diretamente sobre o diagrama unifilar da configuração em estudo, permitindo uma fácil visualização das condições operacionais. Por ser de fácil manipulação, o programa desenvolvido é recomendado para fins educativos, pois o usuário pode visualizar facilmente como um sistema elétrico responde às mudanças que lhe são impostas.

O trabalho desenvolvido é dividido em capítulos, de modo que, no Capítulo 2 apresenta-se um estudo sobre fluxo de potência e o método de *Newton-Raphson*. No Capítulo 3 apresenta-se a interface gráfica e suas principais características para o método de fluxo de potência convencional. Neste capítulo procura-se esclarecer alguns dos principais fundamentos relacionados com a utilização da barra de folga (*slack*) ou barra oscilante (*swing*), na solução do problema do FC. Possibilita-se também que o usuário compare entre si os desempenhos dos métodos de *Newton-Raphson* convencional e desacoplado, algoritmos simultâneo e alternado, considerando a atualização da matriz Jacobiana a cada iteração, bem como considerando as matrizes constantes. No Capítulo 4 descrevem-se os conceitos gerais do método da continuação para o traçado das curvas P-V e Q-V, e os conceitos e critérios para a análise de contingências de linhas de transmissão utilizando o método da continuação. Apresentam-se as interfaces gráficas do fluxo de carga continuado e de análise de contingência em linhas de transmissão. Finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

Capítulo 2

FLUXO DE POTÊNCIA

2.1 INTRODUÇÃO

O fluxo de potência ou fluxo de carga consiste em uma análise algébrica das condições de operação do sistema de energia elétrica (SEE) em regime permanente, levando em consideração para essa análise nas tensões, ângulos, *tap's* dos transformadores e fluxo de potência entre as barras. O sistema para este estudo é representado por um conjunto de equações não lineares que são utilizadas para o cálculo do estado de operação do sistema elétrico através de métodos computacionais desenvolvidos ao longo de muitos anos. De acordo com a complexidade do problema o sistema pode incluir equações de igualdade e desigualdade (MONTICELLI, 1983).

Os componentes que formam um sistema elétrico podem ser separados em dois grupos:

- Os que estão ligados em dois nós quaisquer.
Exemplo: Transformadores e linhas de transmissão.
- Os que estão ligados entre um nó qualquer e o nó terra.
Exemplo: Geradores, cargas, reatores e capacitores.

2.2 EVOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

Até o final da década de 40, e mesmo durante grande parte da década de 50, as simulações de fluxo de potência eram feitas mediante modelos reduzidos dos sistemas de potência, os quais ficaram conhecidos como analisadores de redes.

Além do grande trabalho que era exigido para se obter o ajuste inicial da configuração, também era lenta a etapa de análise, pois exigia a leitura de diversos instrumentos de medição e a anotação dos valores correspondentes sobre um diagrama elétrico traçado no papel.

Com o surgimento dos computadores digitais durante a década de 50, os analisadores de rede foram sendo substituídos por programas capazes de realizar simulações que representassem numericamente o comportamento dos sistemas elétricos de potência (STAGG, 1979).

O primeiro método para o cálculo de fluxo de potência se tornou conhecido pelo nome de Gauss-Seidel.

No começo da década de 60 surgiu o método de *Newton* (VAN NESS, 1961), que tinha uma característica de convergência excelente, mas computacionalmente não era competitivo.

Em meados da década de 60, novas técnicas de armazenamento de dados, compactas e com uso do ordenamento da fatorização (TINNEY e WALKER, 1967), tornaram o método de *Newton* muito mais rápido, exigindo pequeno espaço de memória e mantendo uma característica ótima de convergência.

Já na década de 70 surgem os métodos desacoplados (STOTT e ALSAÇ, 1974), baseados no método de *Newton-Raphson*. Estes tinham características de serem ainda mais rápidos que os citados anteriormente, mantendo a precisão e convergência. Somente em 1990 foi

apresentado um estudo teórico mais aprofundado das características dos métodos desacoplados. O método de *Newton-Raphson* e seus derivados continuam sendo amplamente utilizados pelos pesquisadores (MONTICELLI e GARCIA, 1990).

2.3 APLICAÇÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA

A análise do fluxo de potência tem como principais objetivos:

- *Segurança*: a simulação do fluxo de potência no SEE é eficaz no sentido de se estimar eventuais violações nos limites de operação do mesmo, sendo possível assim detectar problemas futuros que possam causar a perda de transmissão de energia como a perda de estabilidade de partes do sistema elétrico e que possam causar o colapso do sistema.
- *Planejamento e Operação*: a análise do fluxo de potência atua como uma poderosa ferramenta no processo de avaliação de novas configurações do sistema elétrico para atender o aumento da demanda dentro dos limites da segurança do sistema elétrico. Assim, também procura-se configurações dos sistemas elétricos com as menores perdas de operação.
- *Simulação de Sistemas Elétricos* operando sob condições anormais decorrentes da saída de operação de equipamentos como linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras. A saída de operação desses equipamentos pode se dar pela necessidade de manutenção preventiva ou corretiva, ou ainda, em se tratando de linhas de transmissão, pelo desligamento automático após descargas atmosféricas.

2.4 FORMULAÇÃO BÁSICA DO FLUXO DE POTÊNCIA

A formulação básica do problema (exemplo clássico) considera que a cada barra da rede são associadas quatro variáveis, a saber, (MONTICELLI, 1983):

V_k - magnitude da tensão nodal na barra k ;

θ_k - Ângulo da tensão nodal na barra k ;

P_k - Potência ativa líquida calculada na barra k ;

Q_k - Potência reativa líquida calculada na barra k .

Somente duas variáveis em cada barra são conhecidas inicialmente, as duas restantes são incógnitas e serão obtidas através da solução do fluxo de potência. Assim, as barras do sistema são classificadas em três tipos:

I) - Barra de referência ou barra $V\theta$ (ou Slack):

- São dados V_k e θ_k ;
- São calculados P_k e Q_k ;

II) - Barra de Geração ou barra PV:

- São dados P_k e V_k ;
- São calculados Q_k e θ_k ;

III) - Barras de Carga ou barra PQ:

- São dados P_k e Q_k ;
- São calculados V_k e θ_k ;

Para cada barra as equações de um problema de fluxo de potência impõem a primeira lei de Kirchhoff, na qual as injeções de potência ativa e reativa em uma barra são iguais a soma

dos fluxos que deixam a barra através das linhas de transmissão e transformadores. Desta forma, obtêm-se as seguintes equações:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.1)$$

$$Q_k + Q_k^{\text{sh}} = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.2)$$

em que

$k = 1, \dots, \text{NB}$, sendo NB o número de barras da rede;

Ω_k = conjunto das barras vizinhas da barra k;

V_k, V_m = magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k-m;

θ_k, θ_m = ângulos das tensões das barras terminais do ramo k-m;

P_{km} = fluxo de potência ativa no ramo k-m;

Q_{km} = fluxo de potência reativa no ramo k-m;

Q_k^{sh} = componente da injeção de potência reativa devido ao elemento shunt da barra k

($Q_k^{\text{sh}} = b_k^{\text{sh}} V_k^2$, sendo b_k^{sh} a susceptância shunt ligada à barra k).

As restrições de operação de um problema de fluxo de potência são formadas por:

Limites das tensões nas barras PQ:

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max}$$

Limites de injeções de potência reativa das barras PV:

$$Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max}$$

É importante observar que a inclusão dos controles provoca piora da taxa de convergência do processo iterativo, podendo ainda provocar sua divergência e facilitar o aparecimento de soluções múltiplas para o problema original.

2.5 MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E TRANSFORMADORES

A seguir são apresentados os modelos de linhas de transmissão e de transformadores.

2.5.1 LINHAS DE TRANSMISSÃO

A figura 2.1 apresenta o modelo π equivalente da linha de transmissão, que é definido por três parâmetros: a resistência série r_{km} ; a reatância série x_{km} ($x_{km} > 0$, indutivo); e a susceptância *shunt* b_{km}^{sh} ($b_{km}^{sh} > 0$, capacitivo).

A impedância do elemento série é

$$Z_{km} = r_{km} + jx_{km}$$

enquanto a admitância série é

$$y_{km} = \frac{1}{Z_{km}} = g_{km} + jb_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} + j \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2}$$

onde g_{km} é a condutância série, e b_{km} ($b_{km} < 0$, indutivo) é a susceptância série.

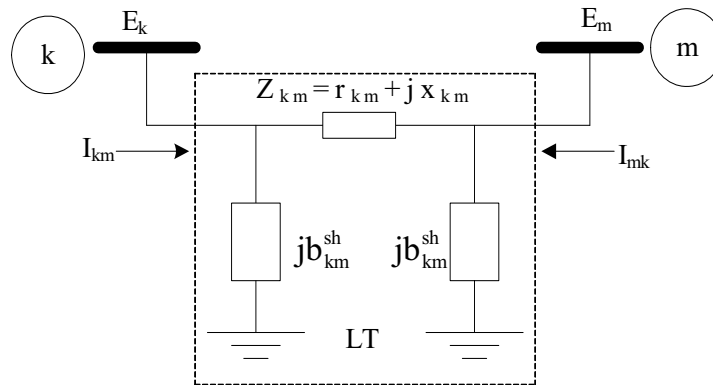


Figura 2.1- Modelo π equivalente da linha de transmissão.

A corrente saindo da barra k é dada por

$$I_{km} = \underbrace{y_{km}(E_k - E_m)}_{\text{série}} + \underbrace{jb_{km}^{sh}E_k}_{\text{shunt}} \quad (2.3)$$

$$I_{km} = (y_{km} + jb_{km}^{sh})E_k - y_{km}E_m$$

onde $E_k = V_k e^{j\theta_k}$ e $E_m = V_m e^{j\theta_m}$.

A corrente saindo da barra m é dada por

$$I_{mk} = \underbrace{y_{km}(E_m - E_k)}_{\text{série}} + \underbrace{j b_{km}^{\text{sh}} E_m}_{\text{shunt}} \quad (2.4)$$

$$I_{mk} = -y_{km} E_k + (y_{km} + j b_{km}^{\text{sh}}) E_m$$

O fluxo de potência complexa saindo da barra k, em direção à barra m, é

$$S_{km}^* = P_{km} - jQ_{km} = E_k^* I_{km} \quad (2.5)$$

como $I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + j b_{km}^{\text{sh}} E_k$, (2.6)

tem-se:

$$\begin{aligned} S_{km}^* &= E_k^* [y_{km}(E_k - E_m) + j b_{km}^{\text{sh}} E_k] \\ &= y_{km} V_k^2 - y_{km} E_k^* E_m + j b_{km}^{\text{sh}} V_k^2, \\ &= (g_{km} + j b_{km} + j b_{km} + j b_{km}^{\text{sh}}) V_k^2 - (g_{km} + j b_{km}) V_k V_m (\cos\theta_{km} - j \text{sen}\theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$. Os fluxos de potência P_{km} e Q_{km} são as respectivas partes real e imaginária dessa equação, ou seja, são dados por

$$\begin{aligned} P_{km} &= \Re \{S_{km}^*\} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \cos\theta_{km} + b_{km} \text{sen}\theta_{km}) \\ Q_{km} &= \Im \{S_{km}^*\} = -(b_{km} + b_{km}^{\text{sh}}) V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \text{sen}\theta_{km} - b_{km} \cos\theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

De maneira análoga pode-se obter os fluxos de potência ativa (P_{mk}) e reativa (Q_{mk})

saindo da barra m em direção a barra k:

$$\begin{aligned} P_{mk} &= g_{km} V_m^2 - V_k V_m (g_{km} \cos\theta_{km} - b_{km} \text{sen}\theta_{km}) \\ Q_{mk} &= -(b_{km} + b_{km}^{\text{sh}}) V_m^2 + V_k V_m (g_{km} \text{sen}\theta_{km} + b_{km} \cos\theta_{km}) \end{aligned} \quad (2.9)$$

As perdas de potência ativa (P_{perdas}) e reativa (Q_{perdas}) na linha de transmissão são dadas, respectivamente, por

$$\begin{aligned} P_{\text{perdas}} &= P_{km} + P_{mk} = g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}) = g_{km} |E_k - E_m|^2 \\ Q_{\text{perdas}} &= Q_{km} + Q_{mk} = -b_{km}^{\text{sh}} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2V_k V_m \cos\theta_{km}) \\ &= -b_{km}^{\text{sh}} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} |E_k - E_m|^2 \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.5.2 TRANSFORMADORES

A figura 2.2 mostra a representação geral de um transformador (em-fase e defasadores), que consiste basicamente de uma admitância série y_{km} e um auto-transformador ideal com relação de transformação $1 : t$. Para o transformador em-fase, t é um número real ($t=a$) e para o defasador, t é um número complexo ($t=ae^{j\varphi}$).

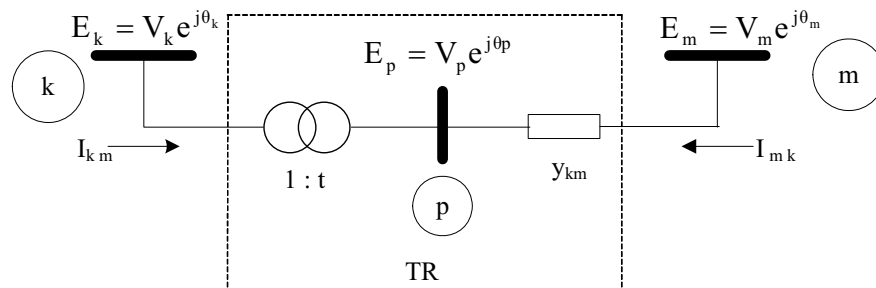


Figura 2.2- Modelo de transformadores.

A figura 2.3 apresenta a representação de um transformador em-fase.

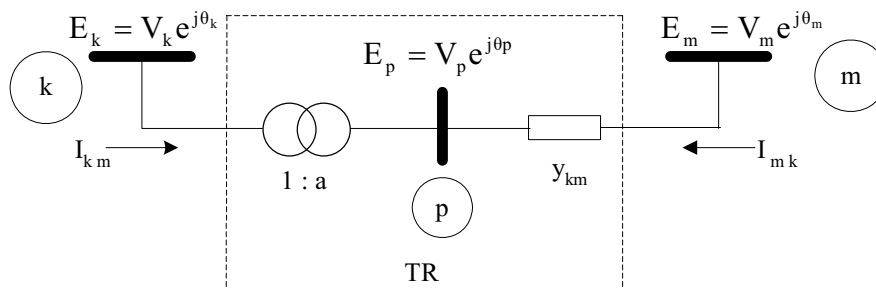


Figura 2.3- Modelo do transformador em-fase.

Na figura 2.3, p representa uma barra intermediária fictícia, y_{km} a admitância série, e a , a relação entre as magnitudes das tensões dos nós terminais k e p do transformador ideal, e que é a própria relação entre as tensões complexas E_p e E_k , pois θ_k é igual a θ_p :

$$\frac{E_p}{E_k} = \frac{V_p e^{j\theta_p}}{V_k e^{j\theta_k}} = a \rightarrow \begin{cases} V_p = aV_k \\ \theta_p = \theta_k \end{cases} \quad (2.11)$$

A figura 2.4 mostra a representação do transformador em-fase através de um circuito π equivalente:

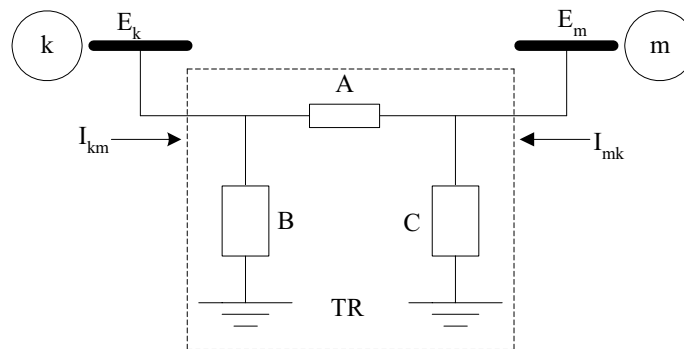


Figura 2.4 – Circuito equivalente π do transformador em-fase.

Através do modelo π do transformador pode-se escrever:

$$\begin{aligned} I_{km} &= (A + B)E_k + (-A)E_m \\ I_{mk} &= (-A)E_k + (A + C)E_m \end{aligned} \quad (2.12)$$

em que A, B e C têm dimensão de admitância. Identificando os coeficientes das equações de corrente, pode-se obter os parâmetros A, B e C:

$$\begin{aligned} A &= ay_{km} \\ B &= a(a - 1)y_{km} \\ C &= (1 - a)y_{km} \end{aligned} \quad (2.13)$$

As expressões (2.13) permitem a análise do efeito da relação de transformação 1:a sobre as magnitudes das tensões terminais V_k e V_m .

- Interpretação

A figura 2.5 mostra o circuito equivalente π do transformador em fase para $a=1$. Nesse caso o *tap* encontra-se na posição nominal e B e C são nulas. Assim, o circuito fica reduzido admitância série y_{km} .

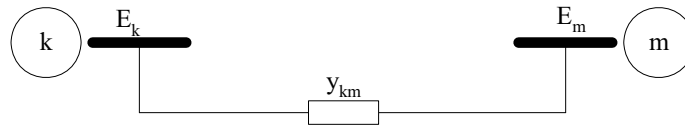


Figura 2.5 – Circuito equivalente π do transformador em-fase para $a=1$.

Na figura 2.6 mostra-se o circuito equivalente π do transformador em fase para $a < 1$.

Como y_{km} é indutivo, e B é dado por

$$B = \underbrace{a(a-1)}_{<0} y_{km}, \quad (2.14)$$

B será capacitivo. Por outro lado, C é dado por

$$C = \underbrace{(1-a)}_{>0} y_{km} \quad (2.15)$$

e com isso, C também será indutivo. Sendo B do tipo capacitivo e C do tipo indutivo, a tendência é a de aumentar V_k e diminuir V_m .

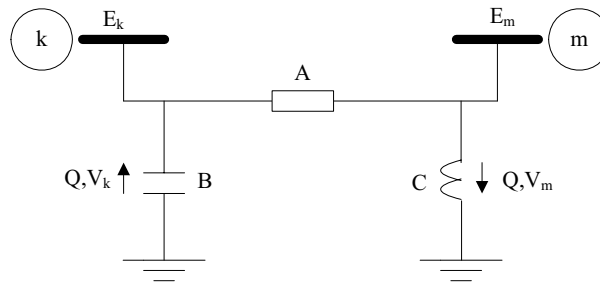


Figura 2.6 - Circuito equivalente π do transformador em-fase para $a < 1$.

A figura 2.7 mostra o circuito equivalente π do transformador em fase para $a > 1$,

Para $a > 1$, B que é dado por

$$B = \underbrace{a(a-1)}_{>0} y_{km}, \quad (2.16)$$

B é do tipo indutivo, enquanto que C, que é dado por

$$C = \underbrace{(1-a)}_{<0} y_{km}, \quad (2.17)$$

C é do tipo capacitivo. Como B apresenta um efeito indutivo e C um efeito capacitivo, a tendência é a de aumentar V_m e diminuir V_k .

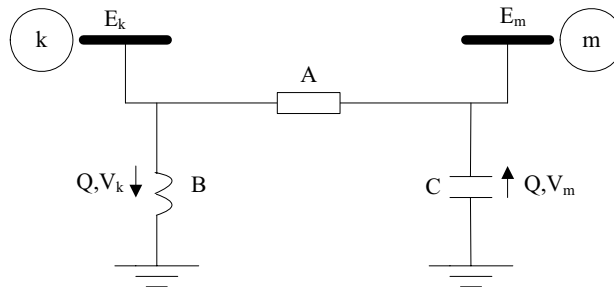


Figura 2.7 - Circuito equivalente π do transformador em-fase para $a > 1$.

2.5.3 CONVENÇÃO DE SINAIS PARA OS FLUXOS DE POTÊNCIA

A figura 2.8 apresenta a convenção para os fluxos de potência nas linhas de transmissão. Os fluxos são considerados positivos quando saem da barra e negativos quando entram na barra.



Figura 2.8 - Convenção para os fluxos de potência nas linhas de transmissão.

Os sentidos dos fluxos P_{km} e P_{mk} são definidos através de setas saindo da barra do primeiro índice em direção à barra do segundo índice.

Se $P_{km} > 0$, o fluxo de potência é da barra k para a barra m.

Se $P_{km} < 0$, o fluxo de potência é da barra m para k.

Se $P_{mk} > 0$, o fluxo de potência é da barra m para a barra k.

Se $P_{mk} < 0$, o fluxo de potência é da barra k para m.

2.6 EXPRESSÕES GERAIS DOS FLUXOS DE POTÊNCIA

Os fluxos de potência ativa e reativa em linhas de transmissão, transformadores em-fase, defasadores puros e defasadores, obedecem às expressões gerais:

$$\begin{aligned}
 P_{km} &= (a_{km} V_k)^2 g_{km} - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\
 Q_{km} &= -(a_{km} V_k)^2 (b_{km} + b_{km}^{\text{sh}}) - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\
 P_{mk} &= g_{km} V_m^2 - (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - b_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km})] \\
 Q_{mk} &= -(b_{km} + b_{km}^{\text{sh}}) V_m^2 + (a_{km} V_k) V_m [g_{km} \text{sen}(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km})]
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

No caso de linhas de transmissão, $a_{km} = 1$ e $\varphi_{km} = 0$. Para transformadores em-fase, $b_{km}^{\text{sh}} = 0$ e $\varphi_{km} = 0$. Para os defasadores puros, $a_{km} = 1$ e $b_{km}^{\text{sh}} = 0$. Finalmente, para os defasadores, $b_{km}^{\text{sh}} = 0$.

A expressão da injeção de corrente na barra k em função dos elementos da matriz admitância é dada por

$$I_k = Y_{kk} E_k + \sum_{m \in \Omega_k} Y_{km} E_m = \sum_{m \in K} Y_{km} E_m, \tag{2.19}$$

em que $Y_{km} = G_{km} + jB_{km} = -a_{km} e^{-j\varphi_{km}} y_{km}$, $Y_{kk} = jb_k^{\text{sh}} + \sum_{m \in \Omega_k} (jb_{km}^{\text{sh}} + a_{km}^2 y_{km})$, e K é o conjunto de

todas as barras m adjacentes à barra k , incluindo a própria barra k , ou seja, o conjunto K é formado pelos elementos do conjunto Ω_k mais a própria barra k .

Para a solução das equações (2.18) e (2.19) é necessário a utilização de métodos iterativos, dentre os quais pode-se destacar os métodos de *Newton-Raphson* e suas variações como os desacoplados rápidos.

O fluxo de potência só terá solução quando ΔP_k e ΔQ_k forem nulos.

$$\Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k(V, \theta) = 0 \tag{2.20}$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k(V, \theta) = 0 \quad (2.21)$$

em que:

$$P_k(V, \theta) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}); \quad (2.22)$$

$$Q_k(V, \theta) = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}); \quad (2.23)$$

$$P_k^{\text{esp}} = P_k^G - P_k^C - \text{Potência ativa especificada na barra } k;$$

$$Q_k^{\text{esp}} = Q_k^G - Q_k^C - \text{Potência reativa especificada na barra } k.$$

Na prática, considera-se ΔP_k e ΔQ_k menores que uma tolerância específica.

2.7 MÉTODO DE *NEWTON-RAPHSON* NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

Na medida em que os sistemas elétricos foram crescendo em tamanho e complexidade o método de *Newton-Raphson* passou a ser o mais utilizado. Segundo a literatura especializada o método de *Newton-Raphson* é o método com melhor desempenho para redes de transmissão e sub-transmissão, isto porque o método converge para um ótimo local seguindo a direção da Jacobiana do sistema elétrico. Portanto a convergência depende muito do ponto inicial de partida (por exemplo, ângulos iguais a zero e as magnitudes de tensões das barras iguais a um para as barras PQ e ângulos iguais a zero para as barras PV).

Há versões derivadas do método de *Newton-Raphson* que utilizam uma Jacobiana constante ao longo do processo de solução, aumentando assim o eficiência computacional do algoritmo; entretanto, estes métodos em alguns casos não apresentam a mesma boa convergência do método de *Newton-Raphson* e suas versões desacopladas.

Cabe ressaltar que desenvolveram-se métodos especializados para sistemas elétricos que apresentam características específicas (métodos especializados), como o caso dos métodos

para redes de distribuição onde a relação R/X e o número de barras são frequentemente maiores que em sistemas de transmissão. Estes métodos apresentam um melhor desempenho computacional comparando-se com o método de *Newton-Raphson* para redes de distribuição (CASTRO 2005).

2.7.1 ALGORITMO BÁSICO

O método de *Newton* é aplicado à resolução do subsistema 1 (S1) que é dado por:

$$S1 = \begin{cases} \Delta P = P^{\text{esp}} - P(V, \theta) = 0 \\ \Delta Q = Q^{\text{esp}} - Q(V, \theta) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_k = P_k^{\text{esp}} - P_k(V, \theta) = 0 & k \in \{\text{barras PQ e PV}\} \\ \Delta Q_k = Q_k^{\text{esp}} - Q_k(V, \theta) = 0 & k \in \{\text{barras PQ}\} \end{cases} \quad (2.24)$$

onde P_k^{esp} e Q_k^{esp} são os respectivos valores das injeções de potência ativa e reativa especificados para as barras, sendo dados por $P_k^{\text{esp}} = P_k^G - P_k^C$ e $Q_k^{\text{esp}} = Q_k^G - Q_k^C$. $P_k^{\text{calc}}(V, \theta)$ e $Q_k^{\text{calc}}(V, \theta)$, são calculados através das equações das potências nodais. ΔP_k e ΔQ_k são chamados de *mismatches* (resíduos) de potência ativa e reativa, respectivamente. O ponto central da resolução do subsistema 1 consiste em determinar o vetor de correções Δx (sendo x é o vetor das variáveis dependentes):

$$\underline{g}(\underline{x}^i) = -J(\underline{x}^i)\Delta \underline{x}^i \Rightarrow \Delta \underline{x}^i = [J(\underline{x}^i)]^{-1} \underline{g}(\underline{x}^i)$$

Assim, tem-se:

$$\Delta \underline{x}^i = \begin{bmatrix} \Delta \theta^i \\ \Delta V^i \end{bmatrix} \begin{cases} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{cases}$$

$$\underline{g}(\underline{x}^i) = \begin{bmatrix} \Delta P^i \\ \Delta Q^i \end{bmatrix} \begin{cases} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{cases}$$

Considerando as expressões dos vetores ΔP e ΔQ dadas em (2.24), em que P^{esp} e Q^{esp} são constantes, a matriz Jacobiana pode ser escrita da seguinte maneira:

$$J(x^i) = \begin{array}{cc} \underbrace{\left[\begin{array}{cc} -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} & -\frac{\partial P(V, \theta)}{\partial V} \\ -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} & -\frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V} \end{array} \right]}_{\text{NPV+NPQ}}^{(i)} & \left. \begin{array}{l} \text{NPV+NPQ} \\ \text{NPQ} \end{array} \right\} \end{array} \quad (2.25)$$

sendo que as submatrizes dadas em (2.25) são representadas por:

$$H = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial \theta} \quad N = \frac{\partial P(V, \theta)}{\partial V}$$

$$M = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial \theta} \quad L = \frac{\partial Q(V, \theta)}{\partial V}$$

Assim, a equação que define a aplicação do método de *Newton-Raphson* ao fluxo de potência fica sendo:

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P^i \\ \hline \Delta Q^i \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline H & N \\ \hline M & L \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta^i \\ \hline \Delta V^i \\ \hline \end{array}$$

As submatrizes que compõem a matriz Jacobiana são dadas por:

$$H = \begin{cases} H_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \\ H_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 B_{kk} - V_k \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \end{cases} \quad (2.26)$$

$$N = \begin{cases} N_{km} = \frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \\ N_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k G_{kk} + \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \end{cases} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{M} = \begin{cases} M_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = -V_k V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \\ M_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = -V_k^2 G_{kk} + V_k \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}] \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{L} = \begin{cases} L_{km} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \\ L_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k B_{kk} + \sum_{m \in K} V_m [G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}] \end{cases} \quad (2.29)$$

Os passos a serem executados para solução do fluxo de potência pelo método de *Newton-Raphson* são os seguintes:

- i. Fazer $i = 0$, escolher os valores iniciais dos ângulos das tensões das barras PQ e PV e as magnitude das tensões das barras PQ;
- ii. Calcular $P_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ e PV, $Q_k(V^i, \theta^i)$ para as barras PQ, e determinar o vetor dos resíduos (“*mismatches*”) ΔP_k^i e ΔQ_k^i ;
- iii. Testar a convergência: se $\max_{k \in \{PQ+PV\}} \{|\Delta P_k^i|\} \leq \epsilon_p$ e $\max_{k \in \{PQ\}} \{|\Delta Q_k^i|\} \leq \epsilon_q$, o processo convergiu para a solução (V^i, θ^i) ; caso contrário, continuar;
- iv. Calcular a matriz Jacobiana

$$J(V^i, \theta^i) = \begin{array}{|c|c|} \hline H(V^i, \theta^i) & N(V^i, \theta^i) \\ \hline M(V^i, \theta^i) & L(V^i, \theta^i) \\ \hline \end{array}$$

- v. Determinar a nova solução (V^{i+1}, θ^{i+1}) , em que $\theta^{i+1} = \theta^i + \Delta \theta^i$ e $V^{i+1} = V^i + \Delta V^i$, sendo que ΔV^i e $\Delta \theta^i$, são obtidos com a solução do seguinte sistema linear

$$\begin{array}{|c|} \hline \Delta P(V^i, \theta^i) \\ \hline \Delta Q(V^i, \theta^i) \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline H(V^i, \theta^i) & N(V^i, \theta^i) \\ \hline M(V^i, \theta^i) & L(V^i, \theta^i) \\ \hline \end{array} \begin{array}{|c|} \hline \Delta \theta^i \\ \hline \Delta V^i \\ \hline \end{array}$$

- vi. Fazer $i = i + 1$ e voltar para o passo (ii).

A Figura 2.9 apresenta na forma de fluxograma, o algoritmo do método de *Newton-Raphson*.

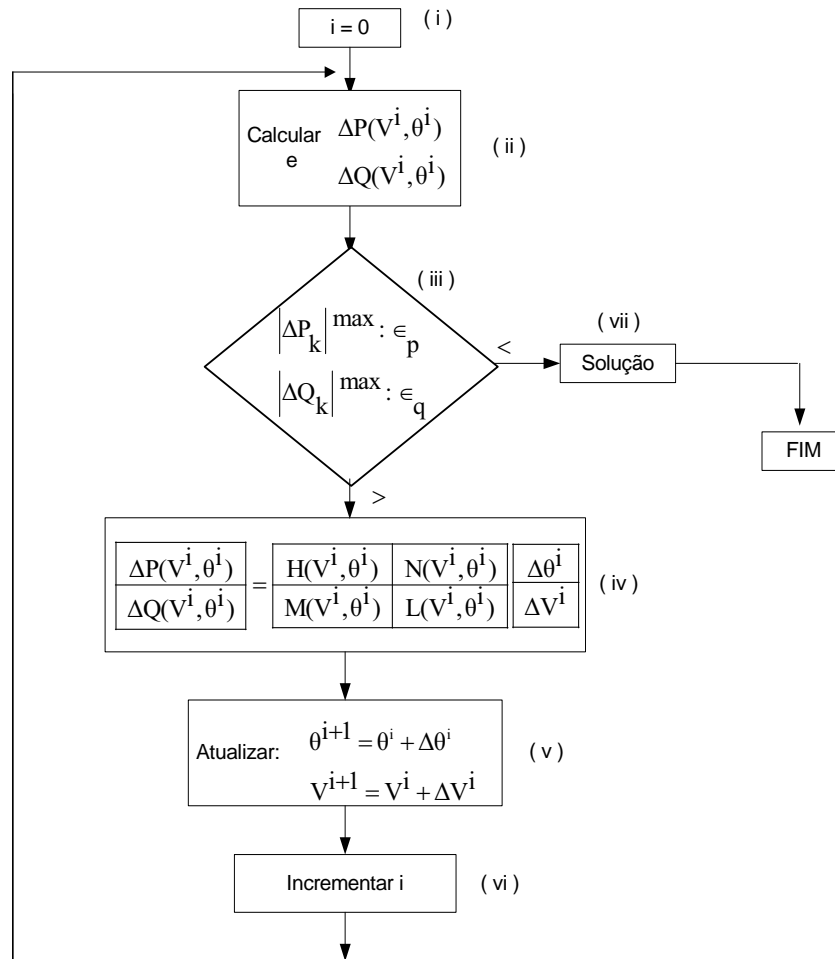


Figura 2.9 - Fluxograma do método de *Newton-Raphson*.

2.8 MÉTODO DE *NEWTON DESACOPLADO* NA SOLUÇÃO DE FLUXO DE POTÊNCIA

O método de *Newton Desacoplado* é baseado no desacoplamento de $P\theta$ e QV . O desacoplamento é baseado numa característica inerente a qualquer sistema de potência que é a forte dependência entre os fluxos de potência ativa e os ângulos das tensões nas barras, e entre os fluxos de potência reativa e a magnitude das tensões nas barras, a qual é verificada

principalmente para sistema de extra-alta-tensão (magnitude das tensõe acima de 230 KV) e ultra-alta-tensão (acima de 750KV) (MONTICELLI, 1983).

O desacoplamento permite uma resolução alternada para cada subproblema P θ e QV. Na resolução do subproblema P θ são utilizados os valores atualizados de V; na resolução do subproblema QV são utilizados os valores atualizados de θ .

No método de *Newton* Desacoplado as submatrizes jacobianas N e M são feitas iguais à zero. Comparando com o método de *Newton-Raphson* original, o método *Newton* Desacoplado irá convergir, geralmente com um maior número de iterações, porém os resultados de ambos os métodos são praticamente os mesmos.

2.8.1 ALGORITMO BÁSICO DO MÉTODO DE *NEWTON* DESACOPLADO

As equações do método de *Newton* podem ser colocadas na forma:

$$\begin{aligned}\Delta P(V^i, \theta^i) &= H(V^i, \theta^i)\Delta\theta^i + N(V^i, \theta^i)\Delta V^i \\ \Delta Q(V^i, \theta^i) &= M(V^i, \theta^i)\Delta\theta^i + L(V^i, \theta^i)\Delta V^i \\ \theta^{i+1} &= \theta^i + \Delta\theta^i \\ V^{i+1} &= V^i + \Delta V^i\end{aligned}\tag{2.30}$$

Devido ao desacoplamento de P θ e QV os termos N ΔV e M $\Delta\theta$ são ignorados, resultando em:

$$\begin{aligned}\Delta P(V^i, \theta^i) &= H(V^i, \theta^i)\Delta\theta^i \\ \Delta Q(V^i, \theta^i) &= L(V^i, \theta^i)\Delta V^i \\ \theta^{i+1} &= \theta^i + \Delta\theta^i \\ V^{i+1} &= V^i + \Delta V^i\end{aligned}\tag{2.31}$$

A equação acima está na forma simultânea, onde θ e V são atualizados ao mesmo tempo. A próxima etapa para obter o método desacoplado é aplicar o esquema de resolução alternado, resultando:

$$\begin{aligned}
 \Delta P(V^i, \theta^i) &= H(V^i, \theta^i) \Delta \theta^i \\
 \theta^{i+1} &= \theta^i + \Delta \theta^i \\
 \Delta Q(V^i, \theta^i) &= L(V^i, \theta^i) \Delta V^i \\
 V^{i+1} &= V^i + \Delta V^i
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Desta forma θ e V são atualizados a cada meia-iteração, com isso os subproblemas $P\theta$ e QV podem ter velocidades de convergência distintas para cada subproblema (CASTRO, 2005).

As figuras 2.10 e 2.11 apresentam respectivamente os fluxogramas do método de *Newton* Desacoplado, considerando os algoritmos simultâneo e alternado.

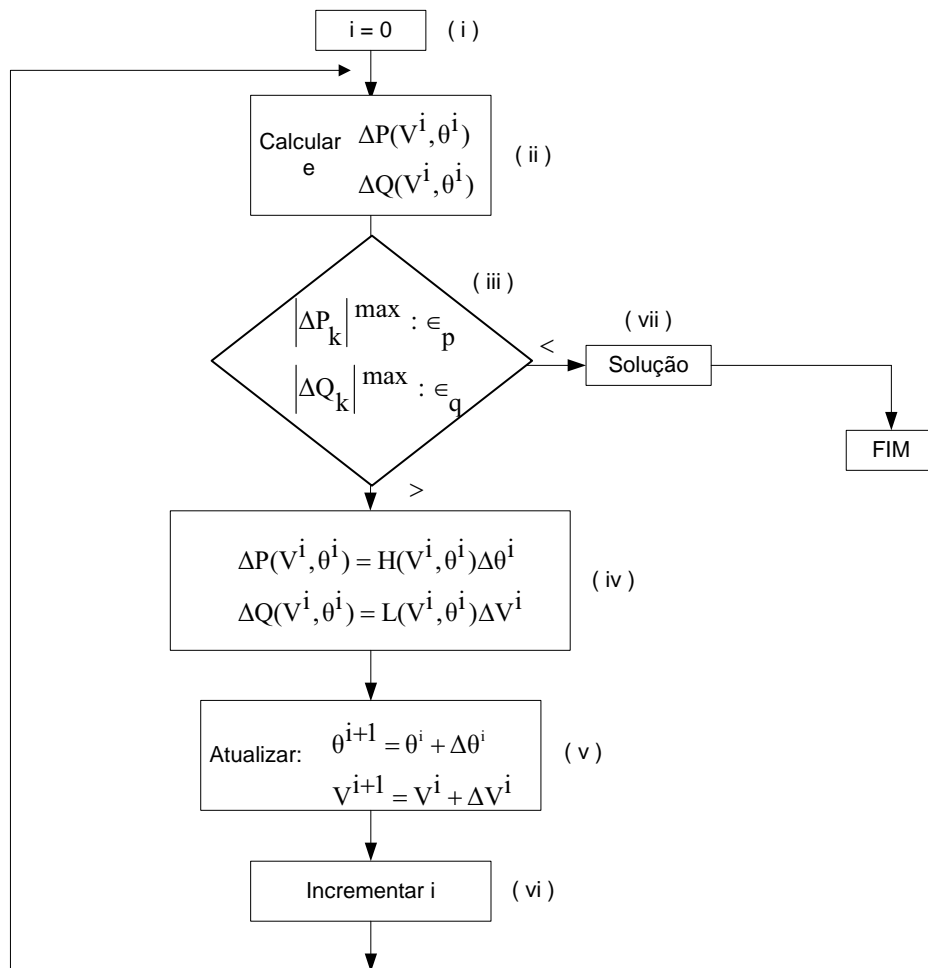


Figura 2.10 - Fluxograma do método de *Newton* desacoplado simultâneo.

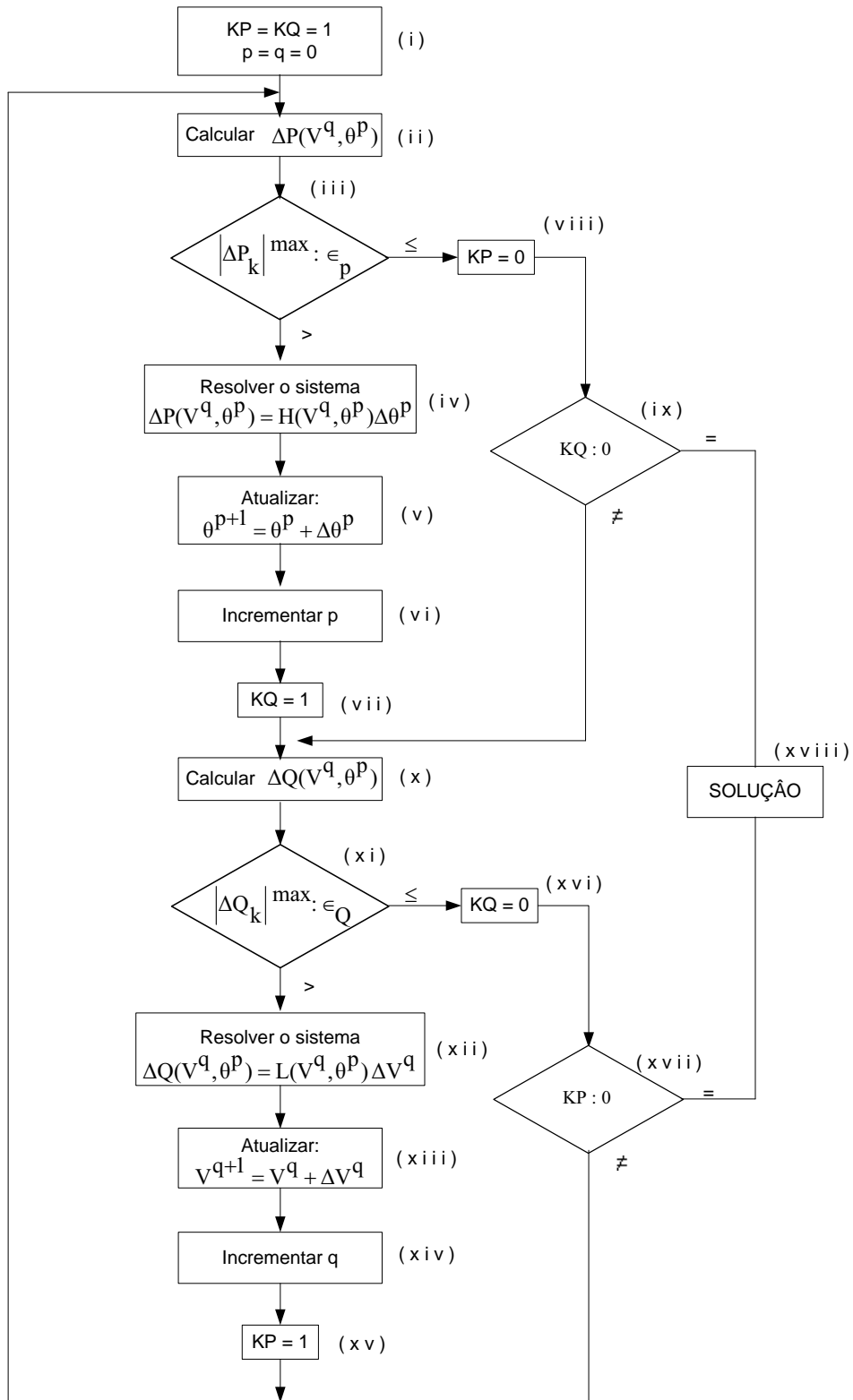


Figura 2.11 - Fluxograma do método de *Newton* desacoplado alternado.

As variáveis p e q são os contadores de iteração enquanto que as variáveis KP e KQ são utilizadas para indicar a convergência dos subproblemas $P\theta$ e QV (MONTICELLI, 1983).

2.9 CONTROLES AUTOMÁTICOS DE TENSÃO

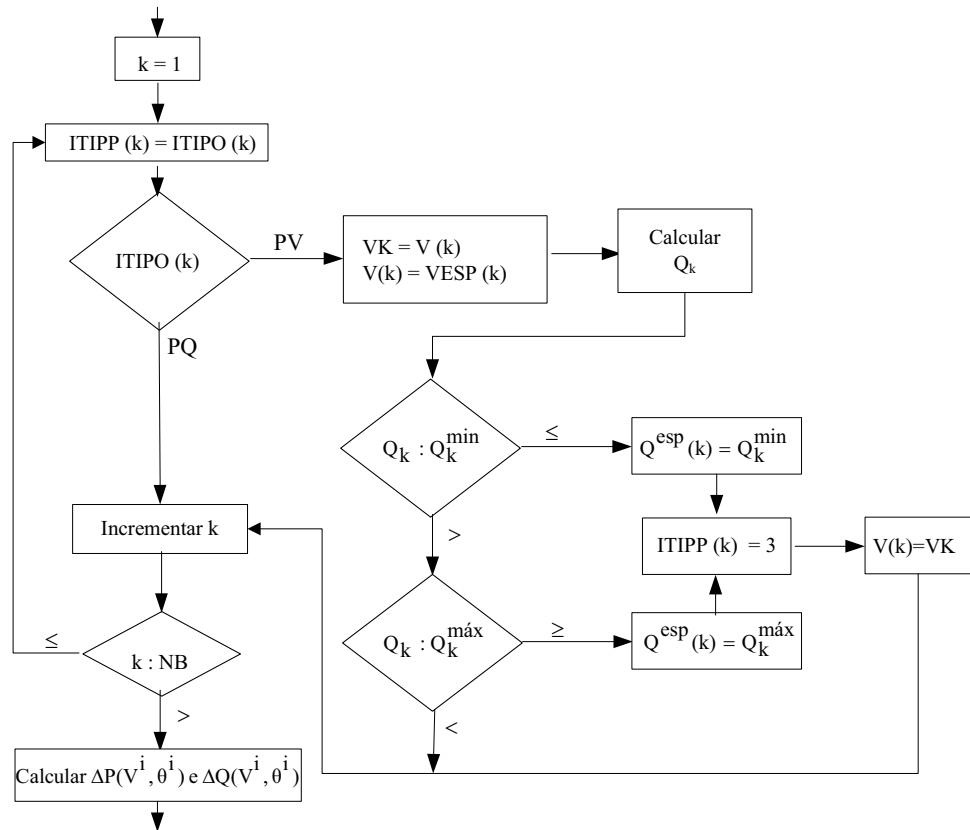
Para que o ponto de operação de um sistema de potência, obtido através da solução de um fluxo de potência, corresponda o mais perto possível do ponto de operação real do sistema, é necessário a inclusão, nos métodos de solução, de técnicas que possibilitem simular a operação de dispositivos de controle, bem como dos limites de operação dos equipamentos que normalmente existem no sistema. Entre os controles mais comuns está o controle da magnitude de tensão em barra ou por injeção de reativos, ou por ajuste de *taps* de transformadores em fase. Já no que se refere aos limites, podem-se citar os limites físicos de injeção de potência reativa em barras PV (barras que contêm geradores ou compensadores síncronos), e o de posição de *tap* em transformadores.

2.9.1 CONTROLE AUTOMÁTICO DE TENSÃO EM BARRAS PV

O fluxograma da Figura 2.12 exemplifica o controle exercido nas barras de tensão controladas do tipo PV. Este fluxograma é inserido antes do cálculo de $\Delta P(V,\theta)$ e $\Delta Q(V,\theta)$ na Figura 2.9. Como foi visto anteriormente, para uma barra k qualquer, do tipo PV, especifica-se a potência ativa ($P_k = P_k^{esp}$) e a magnitude de tensão ($V_k = V_k^{esp}$), e determina-se a potência reativa gerada (Q_k). A magnitude de tensão deve ser mantida constante em V_k^{esp} . Isso é possível enquanto a potência reativa gerada permanecer entre seus limites máximo ($Q_k^{m\acute{a}x}$) e mínimo ($Q_k^{m\acute{i}n}$), ou seja, $Q_k^{m\acute{i}n} \leq Q_k \leq Q_k^{m\acute{a}x}$. Enquanto essas condições forem atendidas, a equação

referente a Q_k não é incluída no subsistema de equações S1, equação (2.24). Assim, a matriz Jacobiana não contém a linha cujos elementos são $\partial Q_k/\partial\theta_m$, $\partial Q_k/\partial\theta_k$, $\partial Q_k/\partial V_m$ e $\partial Q_k/\partial V_k$, e a coluna correspondente às derivadas $\partial P_m/\partial V_k$, $\partial P_k/\partial V_k$, $\partial Q_m/\partial V_k$ e $\partial Q_k/\partial V_k$. Portanto, a correção ΔV_k será nula durante o processo iterativo. Quando a injeção de potência reativa gerada atingir um dos limites, não será mais possível manter a magnitude da tensão no nível especificado, ou seja, igual a V_k^{esp} .

Se ao longo do processo iterativo, na tentativa de manter a tensão no nível especificado, a injeção de potência reativa gerada atingir o seu limite máximo (mínimo), a magnitude da tensão da barra tenderá a cair (subir), isto porque não haverá mais suporte de reativos. Neste caso, a barra k deve ser redefinida, passando de PV para PQ. A tensão agora varia e passa a fazer parte do vetor de variáveis dependentes x . A injeção de potência reativa gerada passa a ser igual ao seu valor máximo, $Q_k^{\text{esp}} = Q_k^{\text{máx}}$ (mínimo, $Q_k^{\text{esp}} = Q_k^{\text{mín}}$). A equação correspondente a Q_k é incluída no subsistema S1. Na iteração seguinte, deve-se verificar a possibilidade da barra k voltar ao seu tipo original (PV) através da verificação do valor da magnitude de tensão calculada V_k^{cal} . Se $V_k^{\text{cal}} < V_k^{\text{esp}}$ ($V_k^{\text{cal}} > V_k^{\text{esp}}$), a barra k deve continuar a ser PQ porque um aumento (uma diminuição) de V_k só é possível aumentando-se (diminuindo-se) Q_k , que já está no limite máximo (mínimo). Se $V_k^{\text{cal}} \geq V_k^{\text{esp}}$ ($V_k^{\text{cal}} \leq V_k^{\text{esp}}$), a barra k pode voltar a ser PV porque a tensão está acima (abaixo) do especificado, indicando que há folga (excesso) de reativos. Assim, basta diminuir (aumentar) Q_k , o que é possível. A barra volta a ser PV, com V_k igual a V_k^{esp} e a injeção de potência reativa gerada fica novamente liberada para variar.



ITIPO - vetor que indica o tipo original de cada barra.

ITIPP - vetor que indica o tipo de cada barra; pode ser alterado a cada iteração.

Figura 2.12 - Fluxograma de controle exercido nas barras de tensão controladas (PV).

2.9.2 TRANSFORMADORES EM FASE COM CONTROLE AUTOMÁTICO DE TAP

Nos transformadores em fase com controle automático de *tap* utilizados nesse trabalho, considerou-se que a magnitude da tensão controlada é a da barra m , ver Figura 2.3. Deseja-se controlar a magnitude da tensão de uma barra m qualquer, de forma que a mesma permaneça com seu valor fixo em V_m^{esp} , enquanto que o *tap* permanece entre seus limites máximo ($a^{\text{máx}}$) e mínimo ($a^{\text{mín}}$), ou seja, $a^{\text{mín}} \leq a \leq a^{\text{máx}}$. A barra m é considerada como do tipo PQV, ou seja, são especificados P_m , Q_m e V_m . A tensão V_m é substituída pela posição do *tap*

(a) no vetor das variáveis dependentes x . A nova matriz Jacobiana, que antes era dada por (2.25), fica:

$$J(x^i) = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -\frac{\partial P(V, \theta, a)}{\partial \theta} & -\frac{\partial P(V, \theta, a)}{\partial V} & -\frac{\partial P(V, \theta, a)}{\partial a} \\ \hline -\frac{\partial Q(V, \theta, a)}{\partial \theta} & -\frac{\partial Q(V, \theta, a)}{\partial V} & -\frac{\partial Q(V, \theta, a)}{\partial a} \\ \hline \end{array} \stackrel{(i)}{\left. \begin{array}{l} \} \text{NPV+NPQ+NPQV} \\ \} \text{NPQ} \\ \} \text{NPQV} \end{array} \right\} \quad (2.33)$$

Os novos elementos da matriz Jacobiana podem ser obtidos a partir das expressões dos fluxos de potência nos ramos apresentado em (2.18).

Capítulo 3

DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA PARA O PROGRAMA DE FLUXO DE POTÊNCIA E FLUXO DE CARGA CONTINUADO

3.1 INTRODUÇÃO

Uma área que tem despertado um crescente interesse por parte dos pesquisadores e concessionárias está relacionada com a visualização das informações (tensões das barras do sistema, fluxos de potência nas linhas de transmissão, perdas de potência ativa e reativa no sistema de transmissão) de sistemas elétricos de potência (KEZUNOVIC *et al.*, 2004). Tradicionalmente estas informações eram representadas em relatórios na forma de textos, de dados tabulares, em campos numéricos locados em diagramas unifilares e em painéis mímicos nos quais a variação dinâmica dos dados eram mostradas através de lâmpadas de cores diferentes. Antes do aparecimento das interfaces gráficas o processamento do fluxo de potência era feito por intermédio de arquivos de texto tanto para a saída quanto para a entrada de dados (informações retiradas de diagramas elétricos unifilares ou a serem plotadas sobre tais diagramas).

Com a crescente melhoria dos recursos e linguagens computacionais possibilitou-se o desenvolvimento de interfaces gráficas interativas muito mais eficientes e altamente apropriadas não só para a solução dos problemas relacionados com o fluxo de potência, mas também para facilitar e auxiliar a interpretação e análise dos resultados durante as fases de operação, análise e

planejamento dos sistemas elétricos (KEZUNOVIC *et al.*, 2004). Esses mesmos recursos também se tornaram extremamente úteis, tanto no treinamento dos operadores de sistemas elétricos de potência como na área educacional, que passou a utilizá-los na consolidação dos fundamentos e conceitos relacionados com a modelagem matemática (tipos de barras: barra de tensão controlada – PV, barras de carga – PQ e barra de referência – V θ ; matriz de admitância da rede; transformadores de *tap* fixo e de *tap* controlado; compensadores estáticos; etc.), e com os algoritmos de resolução do fluxo de potência (métodos de *Gauss*, *Gauss-Seidel*, *Newton*, e mais recentemente métodos da continuação) (KEZUNOVIC *et al.*, 2004); (PETERSON e MEYER, 1971). Também provêem um recurso prático e eficaz para o reforço e o aprofundamento do conhecimento matemático do sistema elétrico, adquiridos em sala de aula, através da representação gráfica, entre outros, dos efeitos causados no sistema pelas variações de parâmetros e de condições iniciais, e pelas mudanças na topologia tais como as manobras de linhas de transmissão (LT).

Neste capítulo apresenta-se a interface gráfica desenvolvida para um programa de fluxo de potência que proporciona não só um ambiente mais amigável para o usuário, mas também um pacote que auxilia e facilita o aprendizado dos estudantes de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica, na aquisição de conceitos e no desenvolvimento de programas relacionados com o problema do fluxo de potência.

O *software MATLAB*, versão 5.3, foi utilizado para programar a interface gráfica e os programas de fluxo de potência e fluxo de carga continuado. A interface gráfica para o fluxo de carga continuado é apresentada no capítulo 4. O elemento básico de informação no *MATLAB* é a matriz, a qual não requer dimensionamento prévio e permite a resolução de muitos problemas numéricos em apenas uma fração do tempo que se gastaria para escrever um programa

semelhante em uma outra linguagem como o *Fortran*, o *Basic* ou *C* (SILVIA, 2005). Apesar da existência de outras alternativas atraentes, a escolha foi baseada nas seguintes considerações:

- É uma linguagem comercial de alto nível e amplamente difundida nos cursos de engenharia;
- Apresenta uma estrutura de dados na forma de matrizes, sem exigir dimensionamento prévio;
- Inclui uma vasta seleção de *Toolboxes*: controle, redes neurais, otimização, *simulink*;
- Apresenta a disponibilidade de processos numéricos de alta qualidade, incluindo técnicas de esparsidade;
- Apresenta um ambiente de visualização e programação simples;
- Possui recursos para o desenvolvimento de interfaces gráficas portáteis e poderosas;
- Permite a criação dinâmica de *links* para subrotinas em *C* ou *Fortran* (AYASUN *et al.*, 2005).

Portanto, o *MATLAB* não só é um *software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico e científico, como também integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos num ambiente fácil de usar, onde problemas e soluções podem ser expressos como eles são escritos na matemática ou na forma de uma linguagem de programação.

3.2 CARACTERÍSTICAS DA INTERFACE GRÁFICA DESENVOLVIDA

A interface gráfica foi implementada aplicando a função *Figure* e suas propriedades (*Color, Units, MenuBar, NumberTitle, Position, Resize* e *Name*). Também se utilizou o comando de controle *Uicontrol* e suas propriedades: (*Units, Position, String, Style, Enable, Callback, Visible, BackgroundColor, ForegroundColor* e *HorizontalAlignment*) (MATHWORKS, 2005). Todos os comandos utilizados encontram-se descritos no Apêndice A.

Os testes foram feitos em computadores do departamento da engenharia elétrica DEE, com sistemas operacionais *Windows NT, 98* e *XP*. As principais características da Interface Gráfica desenvolvida são:

- Segue um conceito de orientação a eventos. Tanto a interface gráfica como os programas de fluxo de potência e do fluxo de potência continuado foram desenvolvidos na mesma linguagem, ou seja, no ambiente *MATLAB*. Isto permite que interajam diretamente entre si, proporcionando um melhor desempenho computacional.
- Permite que o usuário altere diretamente via janela, os parâmetros do sistema, tais como: os dados de barras e de linhas do sistema. A construção do diagrama unifilar também permite a retirada de LT com apenas um simples *click* do *mouse* sobre a LT escolhida.
- Os resultados são apresentados na forma de texto em diversos relatórios, ou diretamente no diagrama unifilar. Ambos os formatos podem ser impressos através de uma impressora a ser definida pelo usuário.

Os sistemas testes utilizados foram um sistema de 5 barras, outro de 9 barras e os sistemas testes do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) de 14 barras e de 30

barras. Seus respectivos diagramas unifilares encontram-se nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 a seguir.

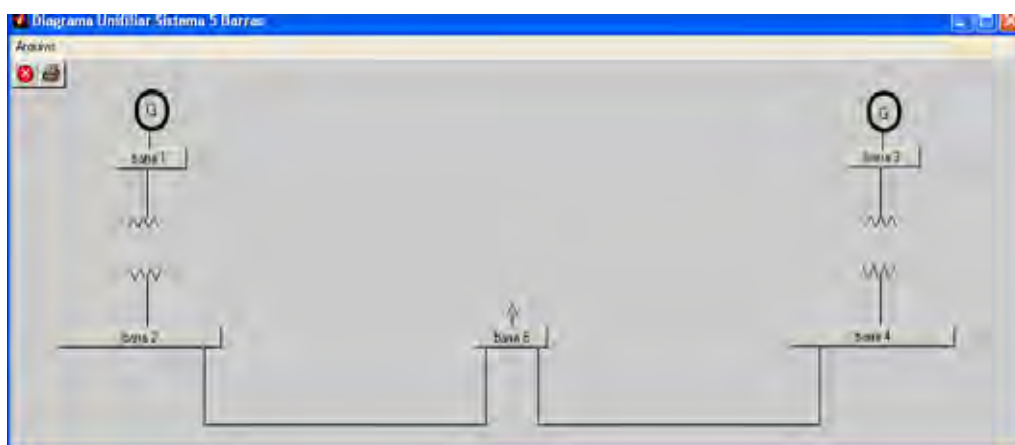


Figura 3.1 - Diagrama unifilar do sistema de 5 barras.

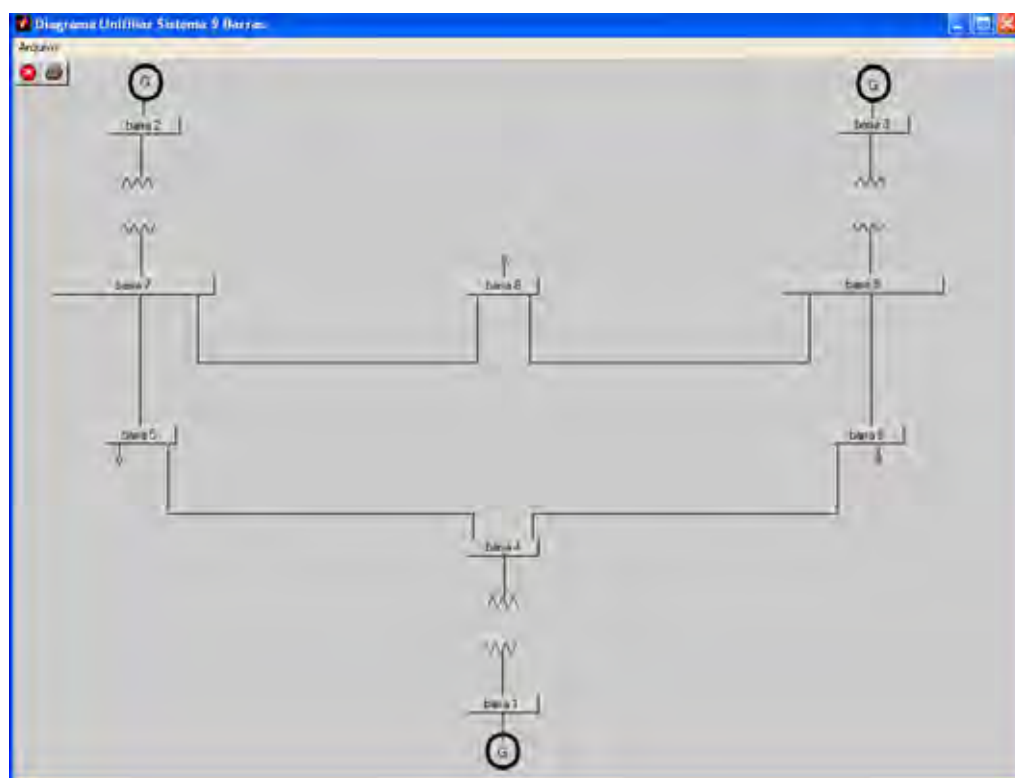


Figura 3.2 - Diagrama unifilar do sistema de 9 barras.

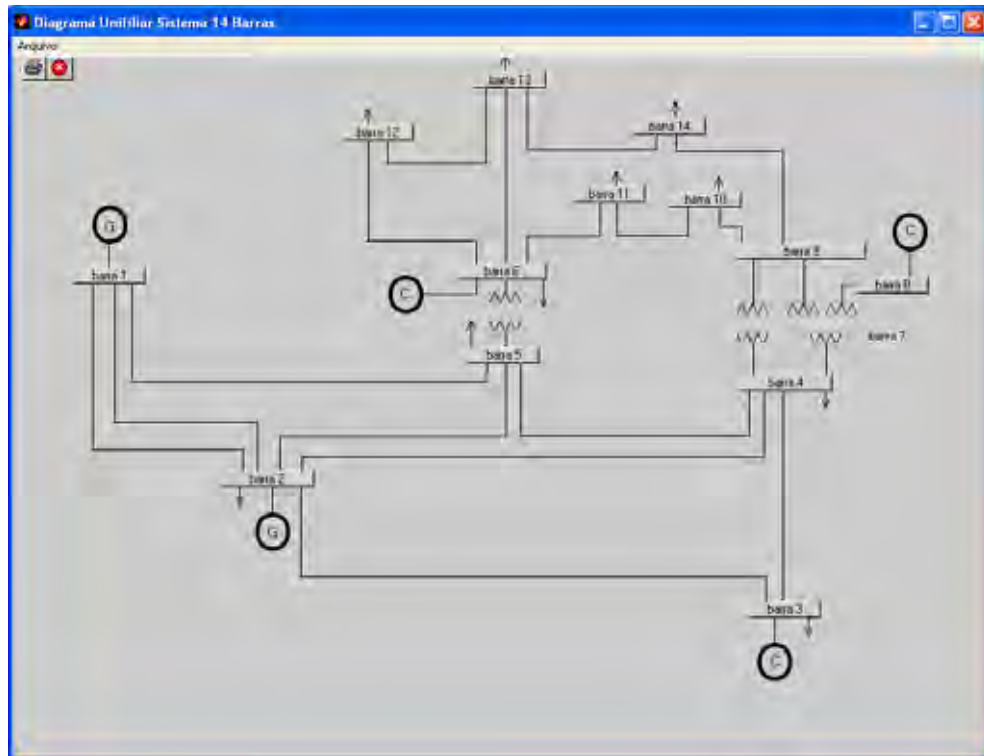


Figura 3.3 - Diagrama unifilar do sistema de 14 barras do IEEE.

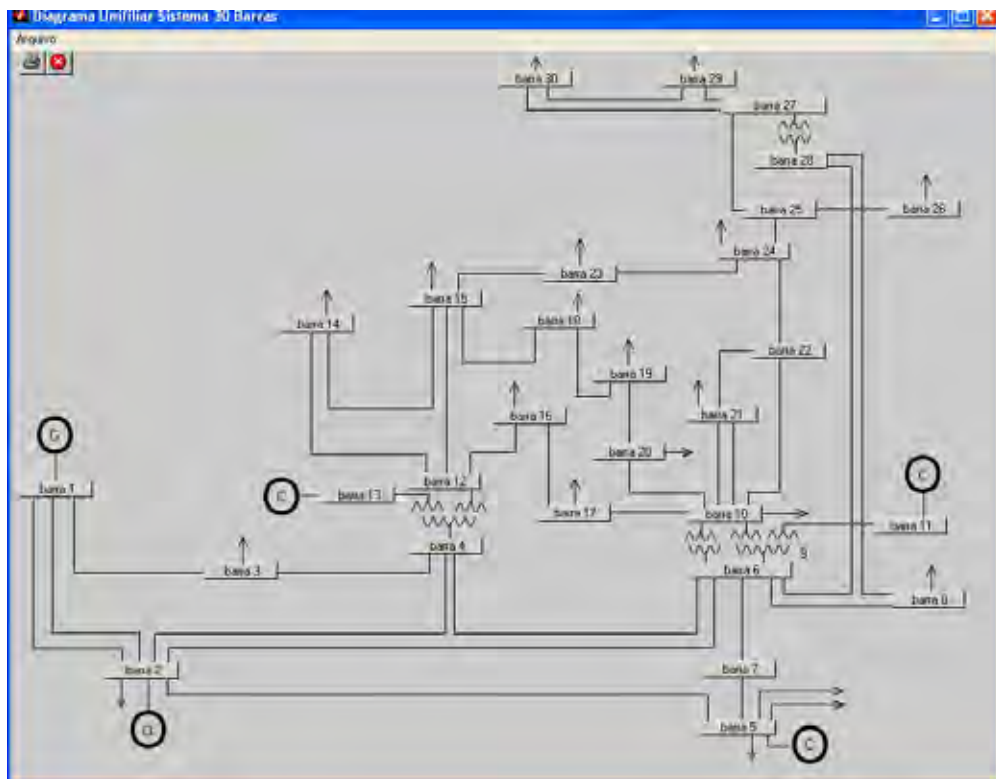


Figura 3.4 - Diagrama unifilar do sistema de 30 barras do IEEE.

3.3 CARACTERÍSTICAS DAS JANELAS DESENVOLVIDAS

Na seqüência são mostradas as janelas desenvolvidas para o programa de fluxo de potência utilizando o método de *Newton-Raphson*, para o fluxo de carga continuado e para análise de contingências em linhas de transmissão. Na Figura 3.5 é apresentada a janela inicial do programa com a respectiva *Barra de Menu* discriminada. Para inicializar o estudo de um dos sistemas disponíveis (2, 5, 9, IEEE 14, ou de IEEE 30 barras), o usuário deve primeiramente selecionar o sistema desejado a partir do acionamento da opção *Arquivo* da *Barra de Menu* ou do ícone *Carregar Sistema*, e abrir a caixa de diálogo **Escolha do Sistema** apresentada na Figura 3.6. Por meio desta janela, o usuário poderá escolher o sistema teste a ser simulado. Para isto, basta selecionar um dos sistemas disponíveis. A opção *Nova Rede* encontra-se inicialmente desabilitada porque só vai ser habilitada quando for criada uma nova rede. Todos os dados de linhas e de barras dos sistemas disponíveis encontram-se no Apêndice B.

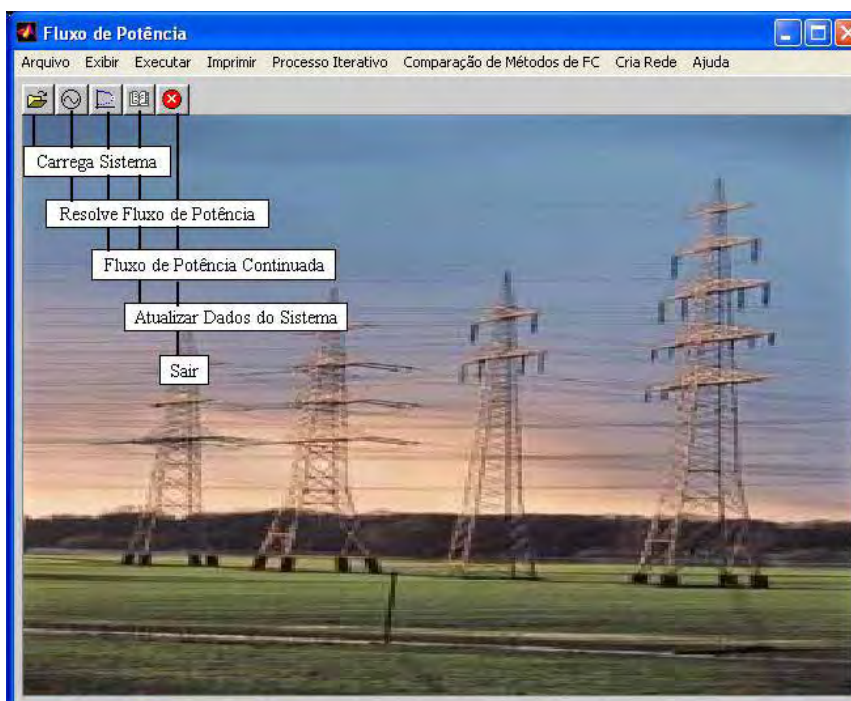


Figura 3.5 - Tela principal do programa **Fluxo de Potência**.

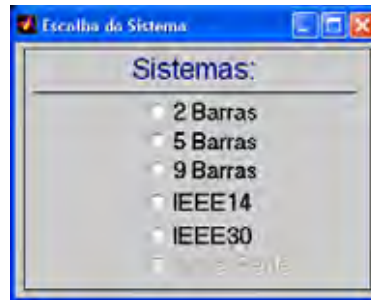


Figura 3.6 – Caixa de diálogo **Escolha do Sistema** para a escolha do sistema a ser simulado.

As janelas que seguem, bem como os relatórios, mostram que o programa desenvolvido apresenta as mesmas funcionalidades básicas que as apresentados na referência (FCE, 1986).

Na Figura 3.7 é apresentada a caixa de diálogo **Resolve Fluxo de Potência**, correspondente aos métodos de solução do fluxo de potência. Nesta tela, as opções disponíveis até o momento são: a escolha do *Método de Solução*: *Newton Desacoplado*, *Newton–Raphson* (fluxo de carga convencional) ou *Fluxo de Potência Continuado* (método da continuação); as *Opções de Controle*: *Solução com Fast-Start* e *Tap's Congelados*; a forma de atuação dos *Limites de Reativos*: *Limites Fechados*, *Limites Abertos*, *Uma Convergência c/ Limites Abertos*, *depois Fechar*, *Primeira Iteração com Limites Abertos*, e a opção de alteração do *Número Máximo de Iterações*, bem como escolher a *Tolerância*. Para escolher o método de solução, as opções de controle e a forma de atuação dos limites de reativos, basta ativar a opção desejada. No caso do número máximo de iterações e da tolerância, estes podem ser facilmente alterados pelo usuário digitando os valores desejados no campo correspondente. Se não for alterado, o número máximo de iterações é de 20 e a tolerância é 0,0001. Uma vez escolhido o método, ativado os campos desejados e definido o número máximo de iterações e tolerância, basta pressionar o botão *Resolver* ou ícone *Resolver Fluxo de Potência* da tela principal.

3.3.1 MÉTODO DE *NEWTON-RAPHSON*

Observa-se que para todos os testes realizados neste item, a tolerância adotada para os resíduos ou *mismatches* de potência é igual a 10^{-4} p.u. A solução é obtida com o método de fluxo de potência convencional considerando a opção em que $V=1,0$ p.u. e $\theta=0$ graus, condição conhecida como *Flat-Start*, ou seja, a estimativa inicial onde todos os ângulos são assumidos iguais a zero e as tensões iguais a 1,0 p.u. Os limites superior e inferior adotados para os *taps* de transformadores foram 1,05 e 0,95, respectivamente. O ajuste de *tap* nos transformadores OLTC (transformadores com comutação de *tap* sob carga) consiste da inclusão da posição do *tap* como variável dependente, ao passo que a magnitude da tensão das barras controladas são consideradas variáveis independentes (PETERSON e MEYER, 1971). A consideração dos limites de reativos (Q) nas barras PV é feita da mesma forma que no método de fluxo de carga convencional. Em cada iteração as gerações de reativos de todas as barras PV são comparadas com seus respectivos limites. No caso de violação, a barra PV é alterada para tipo PQ. Estas barras podem voltar a ser PV nas iterações futuras. As violações de limite de *tap* também são verificadas. Após a resolução do fluxo de potência, pode-se visualizar e imprimir diversos tipos de relatórios. A seguir, são apresentados alguns dos relatórios gerados pelo programa.

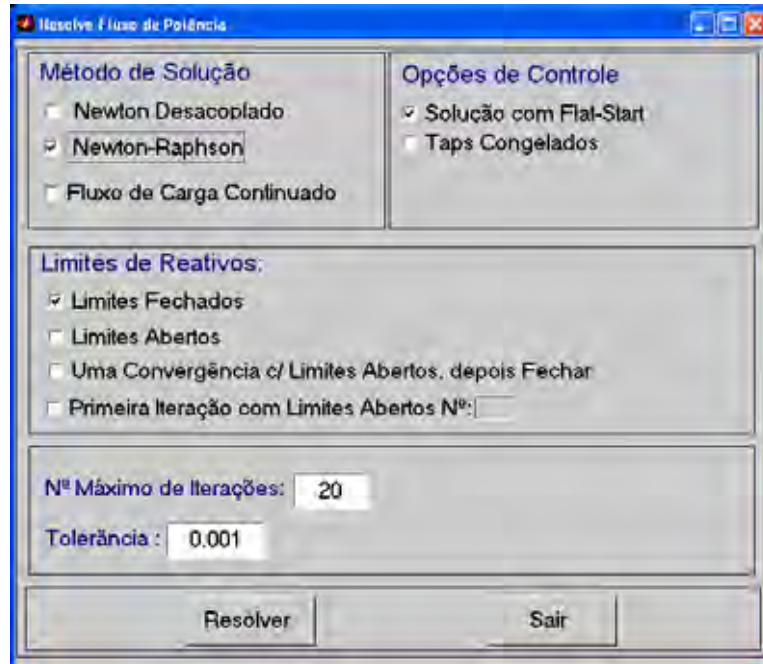


Figura 3.7 – Caixa de diálogo **Resolve Fluxo de Potência** para a escolha do método de solução.

3.3.1.1 RELATÓRIOS DE APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA

A Figura 3.8 mostra o relatório **Sumário de Mismatch**, que apresenta em cada iteração todos os *Mismatch*, inclusive os piores *Mismatches* de potência ativa e reativa. A Figura 3.9 apresenta o relatório **Sumário do Sistema por Áreas**, na qual consta o número total de barras, linhas, geradores, bem como o total de geração e consumo de potência ativa e reativa de cada área.

A Figura 3.10 mostra o relatório de **Sumário de Barras Slack**, que contém: número da barra, a área, a geração de potência ativa e reativa, a tensão e o ângulo da barra *Swing* também conhecida por barra *Slack* ou barra de referência.

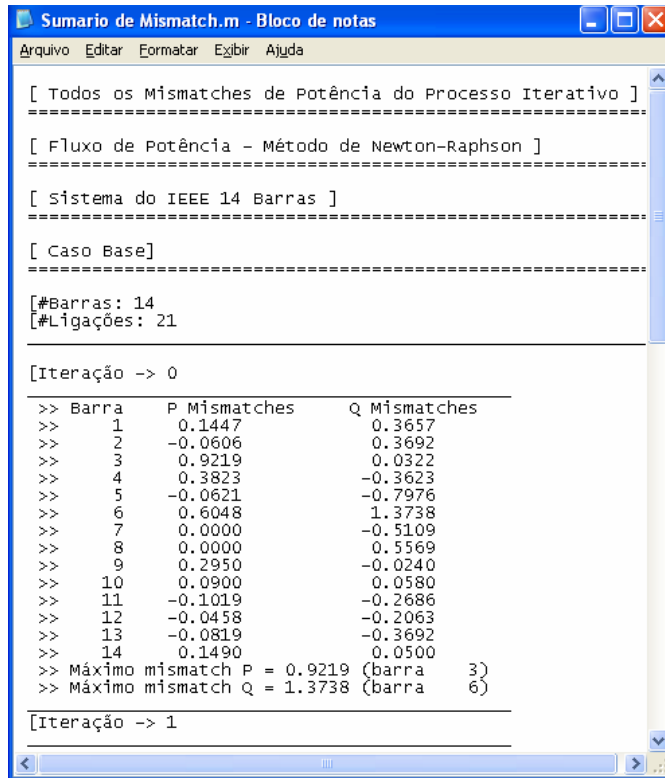


Figura 3.8 – Relatório Sumário de *Mismatch*.



Figura 3.9: Relatório Sumário do Sistema por Áreas.

```

Sumário de Barras Slack.m - Bloco de notas
Arquivo Editar Formatar Layout Ajuda

[ Fluxo de Potência - Método de Newton-Raphson ]
-----
[ Sistema do IEEE 14 Barras ]
-----
[ Caso Base ]
-----
[ Sumário de Barras Slack ]
-----
-----BARRA-----
NO.      ÁREA      GERAÇÃO      TENSÃO      ÂNGULO
1        1         MW          MVAR        p.u.        GRAUS
-----
1        1         232.441     -28.918     1.060       0.000
-----

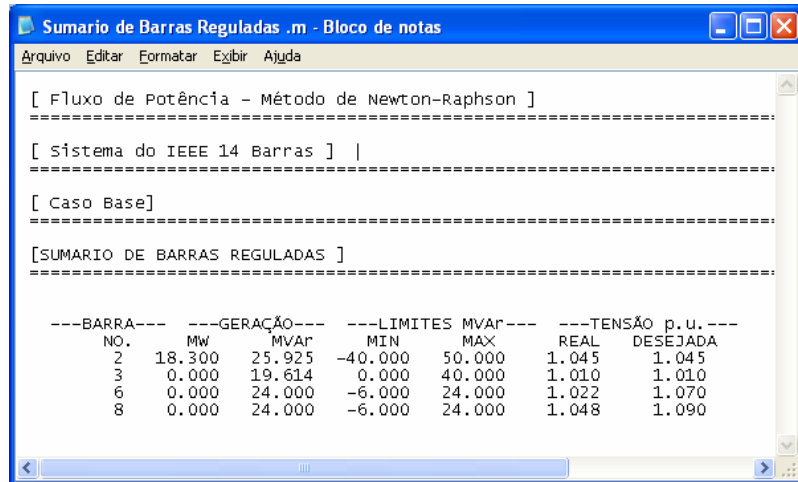
```

Figura 3.10 – Relatório **Sumário de Barras Slack**.

O relatório de **Sumário de Tensões Baixas**, apresenta os dados de barras e tensão que forem inferiores a 0,95 p.u. Neste exemplo nenhuma tensão ficou abaixo de 0,95 p.u. O relatório de **Sumário de Tensões Elevadas**, apresenta os dados de barras e tensão que forem superiores a 1,10 p.u. Neste exemplo nenhuma tensão ficou acima de 1,10 p.u.

A Figura 3.11(a) apresenta o **Sumário de Barras Reguladas**. Este relatório mostra os dados referentes às barras reguladas (barras PV) tais como: a geração de potência ativa e reativa, os limites máximo e mínimo de potência reativa e os valores reais (convergidos) e desejado (especificados) das magnitudes de tensão. Observe que as magnitudes das tensões das barras 6 e 8 (1,022 e 1,048 p.u.) são inferiores aos seus respectivos valores desejados (1,07 e 1,09 p.u.) porque as respectivas gerações de potência reativa atingiram seus limites máximos (24,0 MVar). A Figura 3.11(b) apresenta o **Sumário de Transformadores**. Este relatório mostra os dados referentes às barras com *taps* (barras PQV) tais como: os valores dos *taps* reais (convergidos), os limites mínimo e máximo dos *taps*, a barra que está sendo controlada e os valores reais (convergidos) e desejado das magnitudes de tensão.

A Figura 3.12 mostra o **Relatório de Fluxo de Potência**, que apresenta todos os dados de barras tais como magnitude e ângulo da tensão, potência ativa e reativa injetada e consumida e de fluxo nas linhas de transmissão e nos transformadores.

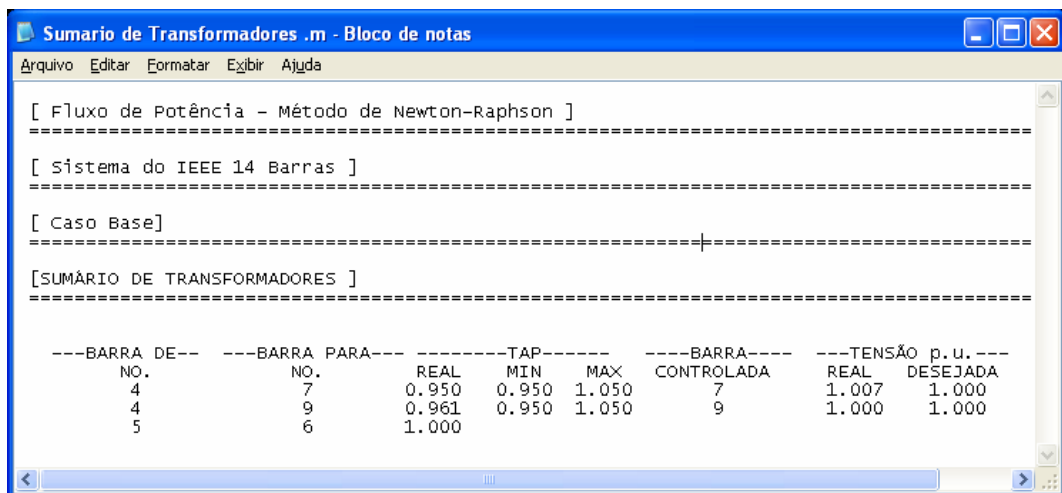


```

[ Fluxo de Potência - Método de Newton-Raphson ]
=====
[ Sistema do IEEE 14 Barras ] |
=====
[ Caso Base]
=====
[SUMARIO DE BARRAS REGULADAS ]
=====
---BARRA---  ---GERAÇÃO---  ---LIMITES MVar---  ---TENSÃO p.u.---
NO.      Mw      MVar      MIN      MAX      REAL      DESEJADA
2      18.300  25.925  -40.000  50.000  1.045     1.045
3       0.000  19.614   0.000    40.000  1.010     1.010
6       0.000  24.000  -6.000   24.000  1.022     1.070
8       0.000  24.000  -6.000   24.000  1.048     1.090

```

(a)



```

[ Fluxo de Potência - Método de Newton-Raphson ]
=====
[ Sistema do IEEE 14 Barras ]
=====
[ Caso Base]
=====
[SUMÁRIO DE TRANSFORMADORES ]
=====
---BARRA DE---  ---BARRA PARA---  ---TAP---  ---BARRA---  ---TENSÃO p.u.---
NO.      NO.      REAL  MIN  MAX  CONTROLADA  REAL  DESEJADA
4         7      0.950 0.950 1.050      7          1.007 1.000
4         9      0.961 0.950 1.050      9          1.000 1.000
5         6      1.000

```

(b)

Figura 3.11(a) – Relatório de **Sumário de Barras Reguladas** e
(b) Relatório de **Sumário de Transformadores**.

As apresentações de relatórios desses tipos visavam facilitar a interpretação e a análise dos resultados fornecidos pelo fluxo de potência e eram a forma mais apropriada posto que ainda não se dispunham dos recursos gráficos atuais. Assim, no caso de grande sistemas elétricos o emprego desse tipo de relatório facilitava apenas parcialmente a interpretação e a análise dos resultados fornecidos pelo fluxo de potência, podendo em muitos casos tornar essa tarefa muito enfadonha.

Relatório de Fluxo de Potencia.m - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

[FLUXO DE POTÊNCIA DA ÁREA 1 DO SISTEMA DO IEEE 14 BARRAS]

[Método de Newton-Raphson]

[Caso Base]

-----DADOS DA BARRA-----

NO.	Tensão	GERAÇÃO	CARGA	NO.	MW	MVAR
1	1.060	232.441	0.000	2	78.218	-14.599
	0.000	-28.918	0.000	5	76.004	0.281
2	1.045	18.300	0.000	1	-76.082	9.424
	-4.968	25.924	12.700	1	-76.082	9.424
				3	72.824	3.601
				4	56.104	-5.931
				5	41.536	-3.293
3	1.010	0.000	94.200	2	-70.527	1.453
	-12.664	19.614	19.000	4	-23.673	-0.839
4	1.025	0.000	47.800	2	-54.421	7.031
	-10.389	0.000	-3.900	3	24.042	-1.802
				5	-61.492	14.377
				7	28.081	-13.742
				9	15.990	-1.964
5	1.027	0.000	7.600	1	-73.222	5.845
	-8.870	0.000	1.600	2	-40.635	2.393
				4	62.002	-14.118
				6	44.256	4.280
6	1.022	0.000	11.200	5	-44.256	0.442
	-14.966	24.000	7.500	11	7.387	5.213
				12	7.849	2.733
				13	17.821	8.112
7	1.007	0.000	0.000	4	-28.081	15.888
	-13.812	0.000	0.000	8	0.000	-23.076
				9	28.081	7.188
8	1.048	0.000	0.000	7	-0.000	24.000
	-13.812	24.000	0.000			
9	1.000	0.000	29.500	4	-15.990	3.453
	-15.570	0.000	16.600	10	5.219	2.619
			19.000	14	9.352	2.606
				7	-28.081	-6.277
10	0.996	0.000	9.000	9	-5.208	-2.590
	-15.775	0.000	5.800	11	-3.792	-3.210
11	1.005	0.000	3.500	6	-7.312	-5.058
	-15.509	0.000	1.800	10	3.812	3.258
12	1.006	0.000	6.100	6	-7.767	-2.564
	-15.898	0.000	1.600	13	1.667	0.964
13	1.001	0.000	13.500	6	-17.578	-7.634
	-15.966	0.000	5.800	12	-1.659	-0.956
				14	5.737	2.791
14	0.981	0.000	14.900	9	-9.232	-2.351
	-16.853	0.000	5.000	13	-5.668	-2.649

Figura 3.12 - Relatório de Fluxo de Potência para o IEEE-14 barras.

3.3.1.2 INTERFACE GRÁFICA PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS DO FLUXO DE POTÊNCIA VIA DIAGRAMA UNIFILAR

Com o surgimento e evolução dos microcomputadores e *softwares* voltados para o desenvolvimento de interfaces gráficas, a apresentação de relatórios na forma de textos e de dados tabulares perdeu em muito a sua utilidade. Na referência (AZEVEDO E SOUZA, 1996) foi sugerido uma representação analógica alternativa na qual as magnitudes e os ângulos das tensões são representados, respectivamente, por círculos de diferentes raios e por setores circulares. As linhas de transmissão são representadas por linhas cujas espessuras são função do respectivo fluxo passante; a direção do fluxo é indicada por uma seta. Os transformadores, por serem elementos de fronteira entre dois níveis de tensão, são representados por retângulos divididos em duas cores. Os geradores são representados por círculos cujos raios são proporcionais aos seus valores máximos de potência gerada, enquanto que o valor da potência gerada é indicada por um círculo interno a aquele. As cargas são representadas por quadrados cujos lados são proporcionais às potências consumidas. A justificativa para tal escolha é a de que as informações analógicas são mais facilmente interpretadas, uma vez que os valores, o estado, e as tendências são imediatamente associadas aos nós. Particularmente ao que se refere à representação dos nós elétricos, os quais são tradicionalmente representados por barras horizontais ou verticais nos diagramas unifilares (KEZUNOVIC *et al.*, 2004; YANG *et al.*, 1998; SHIN *et al.*, 1999; SCHAFFNER, 2002), sugere-se a utilização de círculos, posto que com isso, possibilita-se um reconhecimento mais rápido das conexões da rede. A razão para a escolha dessa forma de representação é a de que a opção pela representação por barras leva, em geral, a uma representação mais complexa da rede, uma vez que para se conectar uma barra a outra pode ser necessário quebrar a representação da linha de transmissão em dois ou três segmentos. Entretanto, nesse trabalho utilizou-se a representação tradicional, na qual os nós são representados como barras, as linhas de transmissão

como linhas contínuas ligando as barras, sendo os sentidos dos fluxos ativos e reativos indicados por setas, e os transformadores por símbolos apropriados. Os resultados da simulação são plotados no diagrama unifilar na forma de números, ou seja, na representação digital. Essa escolha é intencional, uma vez que o objetivo é o de utilizar o programa para fins educacionais. Assim, essa escolha facilitará o aprendizado do aluno uma vez que o mesmo poderá realizar diversos cálculos parciais com os resultados apresentados, tais como o cálculo das perdas de potência ativa e reativa, bem como dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e, posteriormente, confrontá-los com os fornecidos pela interface. Também, poderá realizar o balanço de potência reativa através do modelo π adotado para representar as linhas de transmissão e os transformadores em-fase.

A referência (WIEGMANN *et al.*, 2002) apresenta os resultados experimentais da avaliação de um grupo de pessoas no tocante ao uso de três formas de apresentação dos resultados no diagrama unifilar: somente numérica, numérica mais cores, apenas cores. O objetivo era o de verificar o quão rápido os participantes seriam tanto na identificação da violação (inferior) da tensão, quanto na realização das ações corretivas. Os resultados indicaram que o uso de apenas números leva ao menor tempo de solução, enquanto o uso de somente cores leva ao menor tempo de identificação de violação de tensão. Assim, neste trabalho foi adotado uma solução intermediária, ou seja, o uso de apresentação numérica associada a um mapa de cores com o intuito de atrair a atenção do usuário para as violações de tensão, facilitando com isso o reconhecimento das regiões e das condições mais críticas do sistema.

A seguir são mostradas algumas figuras onde podem se visualizar a apresentação de alguns desses relatórios diretamente no diagrama unifilar. A Figura 3.13 mostra o diagrama unifilar do sistema de 14 barras e a figura 3.14 apresenta o diagrama unifilar do sistema de 30

barras com todas as tensões e ângulos calculados pelo método de *Newton-Raphson*; cada faixa de tensão é classificada com um tipo de cor, conforme mostra a tabela de cores. O número de cores que podem ser usadas numa tela é limitada pela capacidade de interpretação humana, posto que o usuário/operador necessita diferenciar entre as cores para identificar rapidamente qual nível de tensão ela representa. De acordo com a referência (WIEGMANN *et al.*, 2002), as experiências realizadas mostraram que os erros de identificação começam a surgir quando existem mais do que cinco ou seis estímulos diferentes ao mesmo tempo. Esse padrão de comportamento se aplica exclusivamente às cores ou quando estas estão sendo usadas para representar um valor ou um significado. Assim, foram escolhidos ao todo cinco tonalidades de cores. A verde foi estabelecida para representar as tensões que se encontram na faixa considerada como normal do ponto de vista operativo (0,95 a 1,05 p.u.) e a amarela aquelas que se encontram na faixa considerada como estado de alerta (0,90 a 0,95 p.u.), enquanto que as cores laranja e vermelha foram usadas para apresentar as tensões que se encontram abaixo da faixa considerada como normal do ponto de vista operativo. A cor azul claro foi utilizada para representar tensões acima da faixa operativa normal, isto é, 1,05 p.u. Como se pode ver, a apresentação numérica dos mesmos resultados, associados a um conjunto predeterminado de gradiente de cores diretamente no diagrama unifilar, facilita e agiliza a identificação de barras com problemas de tensão. Com a escolha e a classificação de cada faixa de tensão através de uma cor adequada, conforme mostra a tabela de cores, fica mais fácil à visualização das barras com a maior e com a menor tensão.

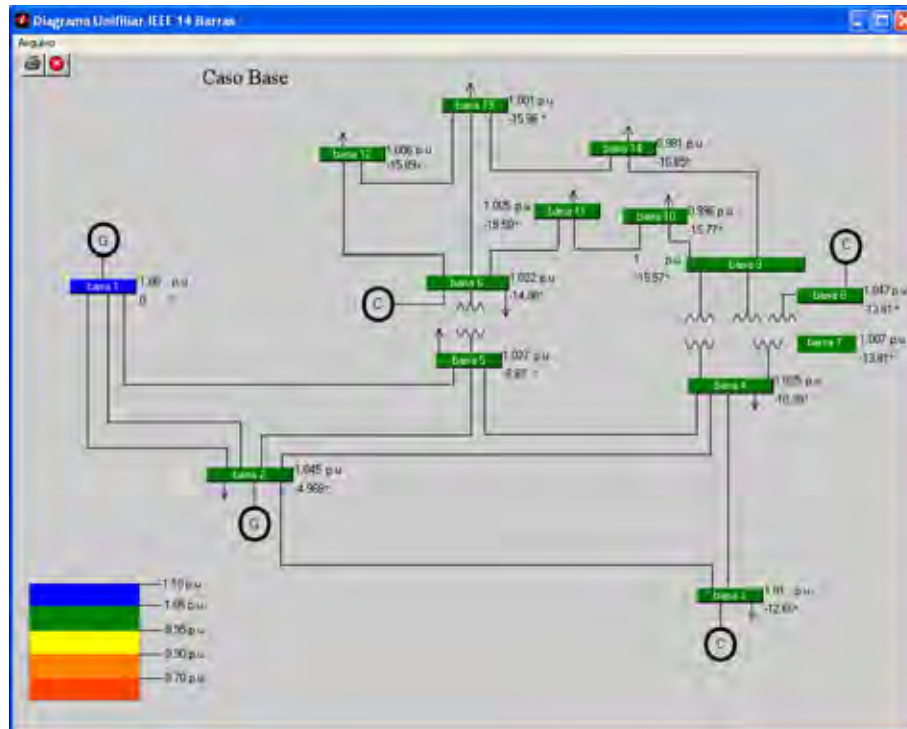


Figura 3.13 - Diagrama unifilar do sistema IEEE-14 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras, obtidas pelo método de *Newton-Raphson*.

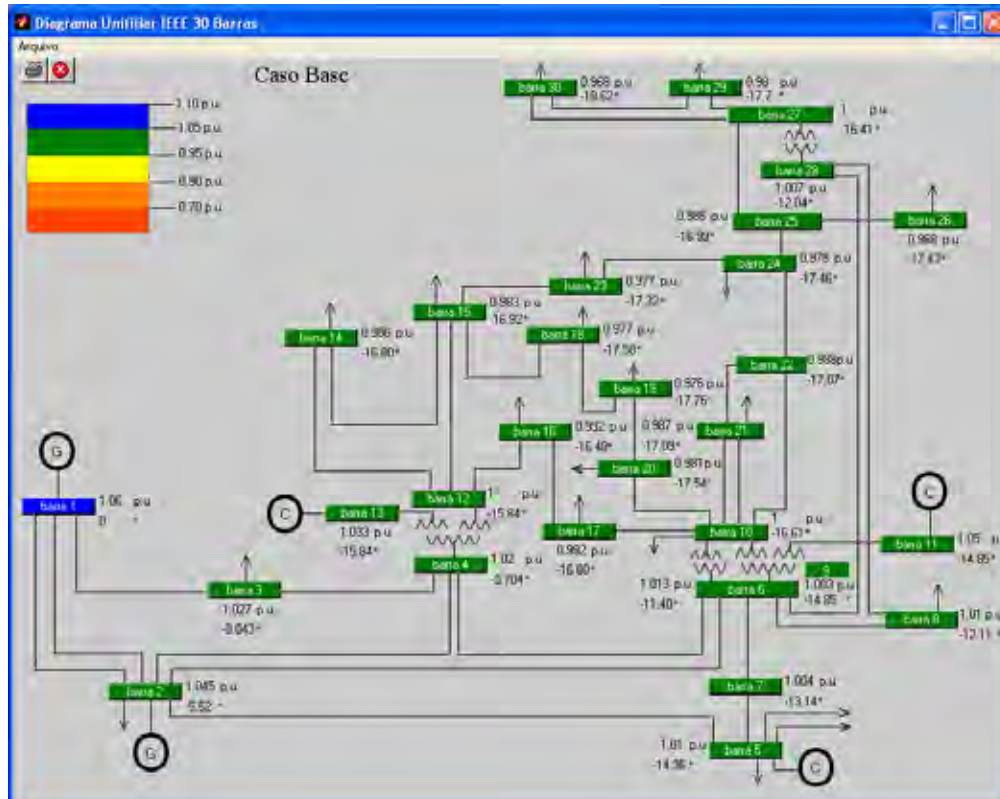


Figura 3.14 - Diagrama unifilar do sistema IEEE-30 com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras, obtidas pelo método de *Newton-Raphson*.

A partir do diagrama unifilar do sistema IEEE-14 apresentado na Figura 3.13, pode-se visualizar as perdas de potência ativa e reativa, bem como os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão de todo o sistema, como mostram as Figuras 3.16 a 3.19. Para isso basta clicar em cima da barra e escolher uma das opções disponíveis na caixa de diálogo **Visualização de Fluxos e Perdas** apresentada na Figura 3.15. Esses fluxos são apresentados para todas as linhas de transmissão pertencentes à primeira vizinhança da barra selecionada. Os sentidos dos fluxos são dados pelo sentido das respectivas setas. Por exemplo, na Figura 3.16 pode-se ver que na barra 5 está chegando 40,635 MW de potência ativa proveniente da barra 2, enquanto que da barra 2 sai, em direção à barra 5, ou seja, pela mesma linha de transmissão, um fluxo de potência ativa de 41,536 MW. A diferença entre estes fluxos é de 0,901 MW, e corresponde às perdas de potência ativa nesta linha de transmissão, como mostra a Figura 3.17.

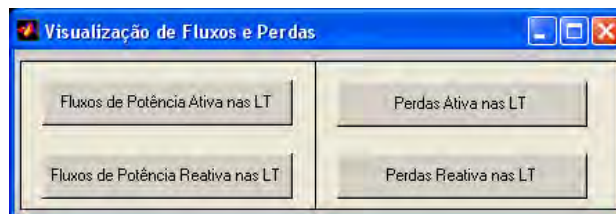


Figura 3.15 - Caixa de diálogo **Visualização de Fluxos e Perdas** para visualização das perdas ativa e reativas e dos fluxos de potência ativa e reativa, nas LT pertencentes a primeira vizinhança da barra selecionada.

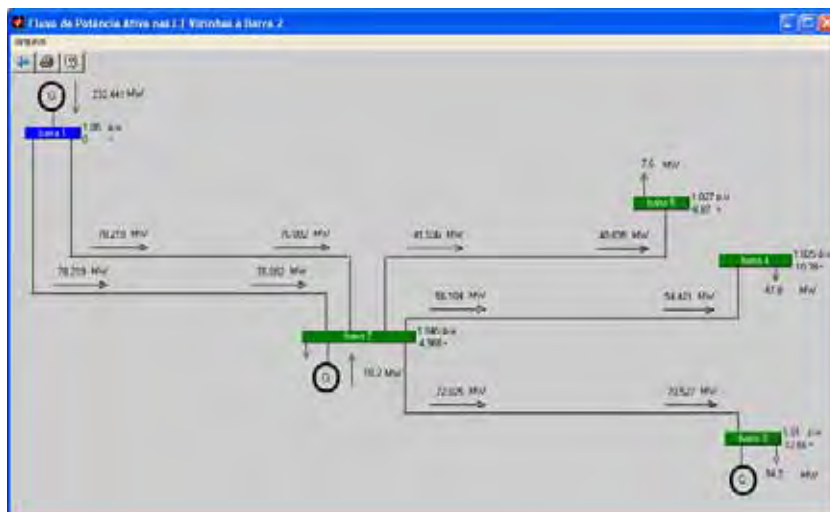


Figura 3.16 – Fluxo de potência ativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 2.

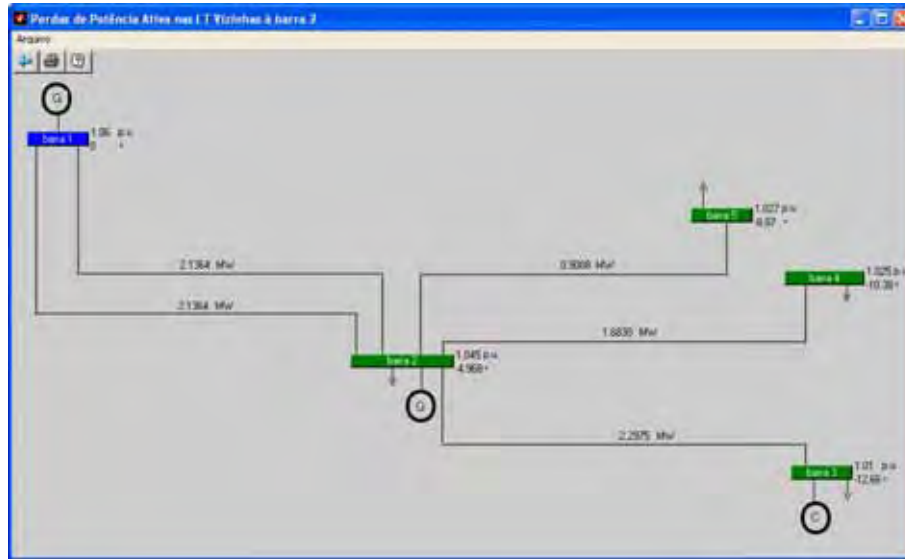


Figura 3.17 – As perdas de potência ativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 2.

Ao contrário do fluxo de potência ativa que possui um sentido único nas extremidades da linha de transmissão, o fluxo de potência reativa da linha 2-3 pode gerar alguma confusão para um iniciante na análise dos resultados de fluxo de potência.

A Figura 3.18 ilustra bem esta situação. Como se pode ver nesta figura, ambos os fluxos de potência reativa da linha 2-3 estão com o mesmo sinal, isto é, saindo das respectivas barras 2 e 3, ou entrando nas respectivas barras 3 e 4 de suas correspondentes linhas de transmissão. Como se pode ver na Figura 3.18, da barra 2 está saindo 3,601 MVar de potência reativa, enquanto que na outra extremidade da linha de transmissão, da barra 3, está saindo 1,453 MVar. Nesse caso, a perda de potência reativa nesta linha de transmissão é de 5,054 MVar, ou seja, a linha está consumindo 5,054 MVar, como se pode constatar na Figura 3.19. No caso da linha de transmissão 3-4, na barra 3 está chegando 0,833 MVar de potência reativa, enquanto que na outra extremidade da linha de transmissão, na barra 4, está chegando 1,808 MVar. Nesse caso, como pode ser visto na Figura 3.19, a perda de potência reativa nesta linha de transmissão é de -2,641 MVar, ou seja, a linha de transmissão está fornecendo à rede 2,641 MVar.



Figura 3.18 – Fluxo de potência reativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 3.



Figura 3.19 – As perdas de potência reativa nas linhas de transmissão pertencentes à vizinhança da barra 3.

Balanco de potência reativa no modelo π da LT

Para melhor entender essas situações pode-se visualizar os respectivos balanços de potência reativa através do modelo π adotado para representar as linhas de transmissão, conforme apresentado nas Figuras 3.20 e 3.21. Para se visualizar esses modelos, basta clicar sobre a linha de transmissão correspondente nas Figuras 3.18 e 3.19. O consumo de potência reativa numa linha de transmissão é dado por $S_{base}(xI^2)$, onde S_{base} é a potência base (100 MVA), x é a reatância da linha de transmissão e I é o módulo da corrente que passa por esta reatância. Assim, no caso da Figura 3.20, a potência reativa fornecida (4,626 MVA) pelos dois elementos *shunts* (b_{shLT}) do

modelo π , não serão suficientes para suprir o consumo de 9,68 MVar, havendo assim a necessidade de um suprimento adicional de potência reativa de 3,601 MVar e 1,453 MVar a partir das barras 2 e 3. Já na Figura 3.21 a potência reativa fornecida (3,582 MVar) pelos dois elementos *shunts* (b_{shLT}) é mais que o suficiente, e assim, o excedente (2,641 MVar) é fornecido para a rede.

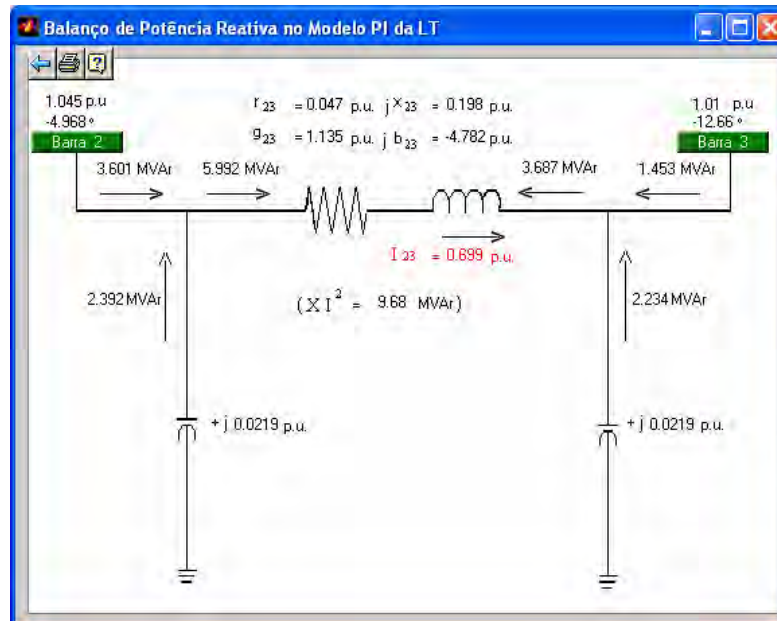


Figura 3.20 – Balanço de potência reativa no modelo π da LT entre as barras 2 e 3.

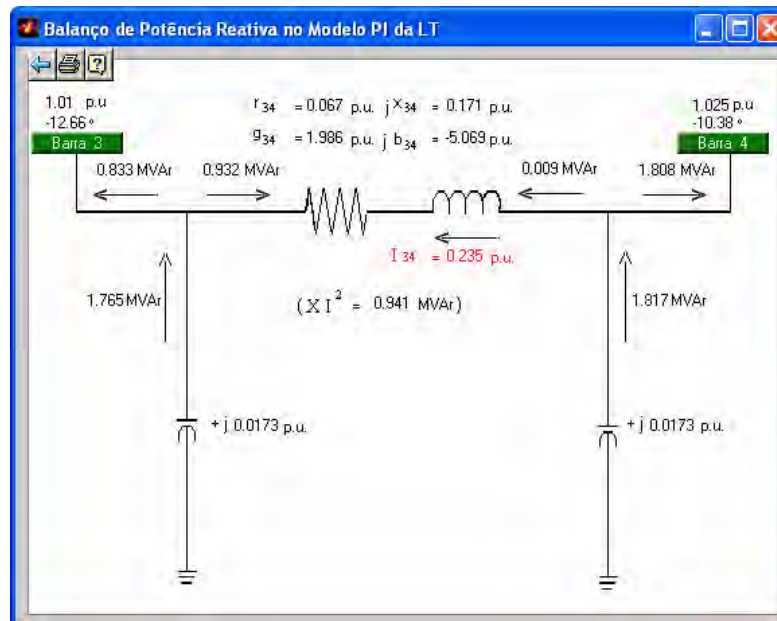


Figura 3.21 – Balanço de potência reativa no modelo π da LT entre as barras 3 e 4.

Balanco de potência reativa no modelo do transformador em-fase

Na Figura 3.22, é apresentado o fluxo de potência reativa num transformador em-fase, localizado entre as barras 4 e 9. O modelo representa um transformador com *tap* fora do valor nominal, isto é, aquele dado pela relação entre as tensões nominais do primário e do secundário. Ele é composto por um transformador ideal com relação de transformação $1:a$ (no caso $a=0,961$), localizado entre as barras 4 e uma barra fictícia, em série com a admitância de dispersão do ensaio de curto-circuito, a qual é igual a 0,556 p.u. Observe que a relação entre as magnitudes das tensões terminais da barra 4 e da barra fictícia ($1,025/0,984=1,042$), bem como entre as magnitudes de correntes que saem da barra fictícia e a que sai da barra 4 ($0,1636/0,157=1,042$), correspondem à razão $1:a$. As pequenas discrepâncias entre os valores apresentados se deve apenas ao valor da tolerância de 10^{-4} adotada no critério de convergência dos desbalanços de potência.

No que se refere ao balanço de potência reativa no transformador, a diferença entre o fluxo de potência reativa proveniente da barra 9, igual a 3,453 MVar, e o que está chegando na barra 4, igual a 1,964 MVar, corresponde à perda de potência reativa no transformador, que é de 1,488 MVar, ou seja, igual ao valor obtido pelo produto da reatância de dispersão (0,556 p.u.) pelo quadrado da corrente (0,1636 p.u.). Observe que o valor dessa perda não pode ser obtido a partir do modelo π do transformador porque esse modelo é um circuito equivalente do modelo do transformador em fase. Essa equivalência se dá apenas em relação aos terminais externos dos modelos, ou seja, não permite uma interpretação dos fenômenos internos do transformador. Por outro lado, conforme foi visto no capítulo 2, o modelo π , representado pelas admitâncias $A=ay_{49}$, $B= a(a-1)y_{49}$ e $C=(1-a)y_{49}$, não só é útil na formação da matriz de admitância nodal, mas também para a análise do efeito da relação de transformação $1:a$ sobre as magnitudes das tensões

terminais, no caso desse exemplo, sobre as magnitudes das tensões das barras 4 e 9. Como o valor $a=0,961$ é menor do que 1, B tem um sinal contrário a y_{49} e, portanto, é do tipo capacitivo e está injetando 7,105 MVar na barra 4. O parâmetro C tem o mesmo sinal da admitância y_{49} e, portanto, é do tipo indutivo e está consumindo 7,039 MVar na barra 9. Assim há uma tendência a aumentar a tensão da barra 4 e diminuir a tensão na barra 9.

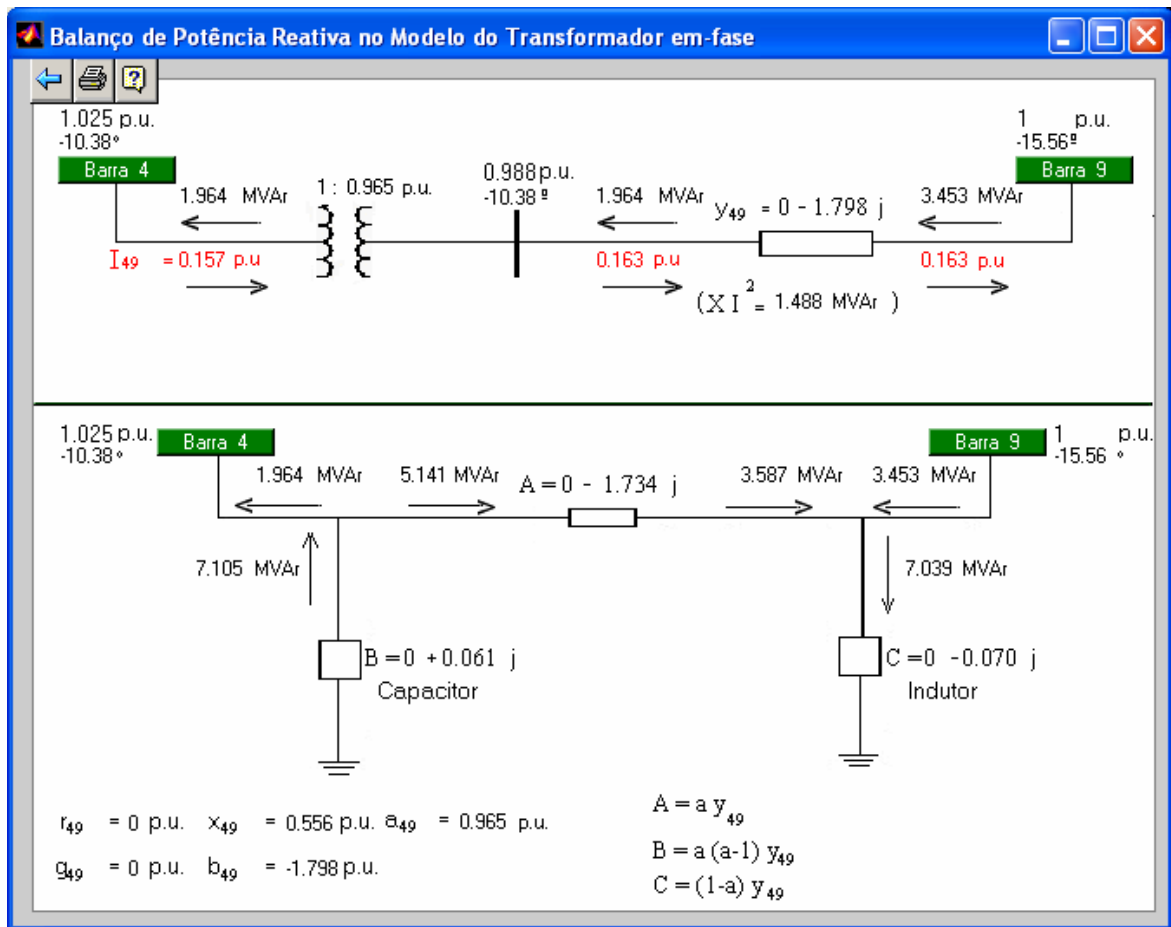


Figura 3.22 – Modelo do transformador em-fase, situado entre as barras 4 e 9, e o correspondente modelo π .

O gráfico de *Coluna* mostrado na Figura 3.23 apresenta as magnitudes de tensão de todas as barras do sistema IEEE-14 correspondentes ao resultado do fluxo de carga para o caso base. Outras formas de gráficos tais como de *Linha* e de *Pizza* encontram-se disponíveis ao usuário.

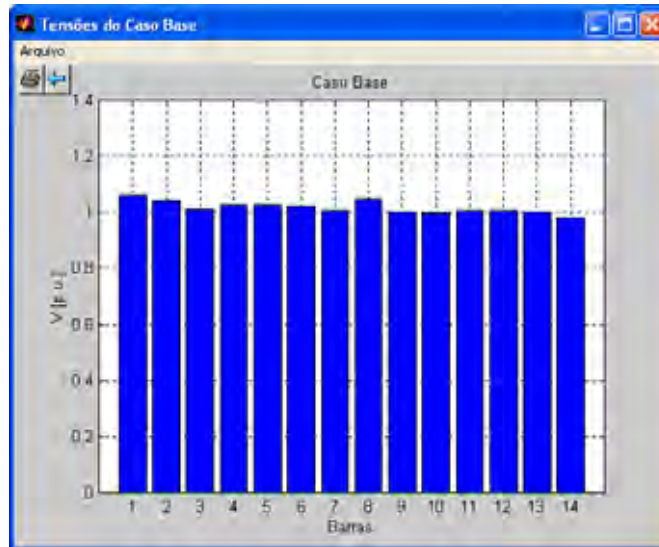


Figura 3.23 - Gráfico de Colunas de todas as tensões do sistema IEEE-14 correspondentes ao resultado do Fluxo de Carga para o caso base.

3.3.1.3 TELAS PARA CONSULTA E ALTERAÇÃO DOS DADOS DO SISTEMA, E ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA VIA DIAGRAMA UNIFILAR

A partir do diagrama unifilar do sistema de 14 barras apresentado anteriormente na Figura 3.3, o usuário pode alterar os dados de barras e linhas, bem como efetuar a retirada de linhas de transmissão. Para executar uma dessas atividades basta clicar com o *mouse* sobre a barra ou linha de transmissão para a qual se deseja alterar os parâmetros ou que se deseja retirar. Para consultar ou alterar os dados de uma barra, basta clicar com o *mouse* na barra desejada. A Figura 3.24 apresenta a caixa de diálogo **Exibe Dados do Sistema**. Essa opção permite a visualização de dados do sistema tais como: *Dados de Barras*, *Dados de Transformadores*, *Dados de Circuitos* e *Dados de Barras de Geração*. Até o momento o usuário pode ver apenas uma área.

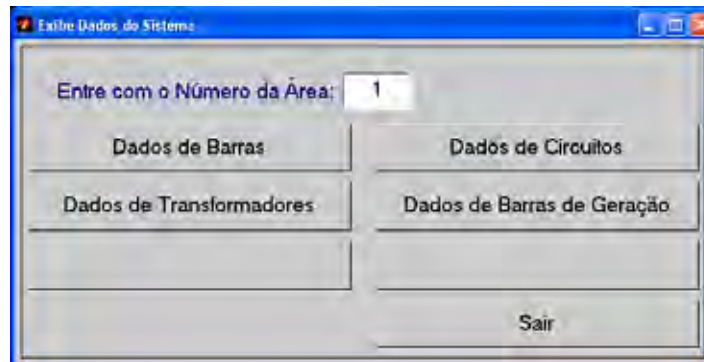


Figura 3.24 – Caixa de diálogo **Exibe Dados do Sistema** para escolha do tipo de dados do sistema a serem visualizados ou alterados.

A Figura 3.25 mostra a tela com todos os dados referentes à barra 2 que foi escolhida como exemplo. Nela o usuário pode visualizar ou alterar os parâmetros da barra tais como: magnitude de tensão, ângulo de fase da tensão da barra, potências ativa e reativa consumida pela carga, e gerações de potência ativa e reativa. No caso de ser uma barra de tensão controlada (tipo PV), pode-se alterar também, os valores dos limites máximo e mínimo de geração de potência reativa.

Se por outro lado, o usuário desejar consultar, alterar ou retirar uma linha de transmissão (LT) do sistema mostrado na Figura 3.3, basta clicar sobre a LT desejada, nesse caso a linha de transmissão situada entre as barras 2 e 3 (LT₂₃). A seguir, conforme se vê na Figura 3.26, é apresentada a caixa de diálogo **Alteração da Topologia da Rede** com as opções *Retirar* ou *Consultar* os dados da LT. Se a opção escolhida for *Consultar*, é apresentada a tela com todos os dados da LT escolhida, como mostra a Figura 3.27. Nela o usuário pode alterar ou visualizar os parâmetros da LT escolhida tais como: *Área* a que ela pertence, e os correspondentes valores em p.u. da *Resistência*, da *Reatância* e da *Susceptância*. No caso de ser um transformador, além desses dados, pode-se alterar também os valores dos parâmetros específicos um transformador tais como: *Tap*, *Tap Mínimo* e *Tap Máximo*.

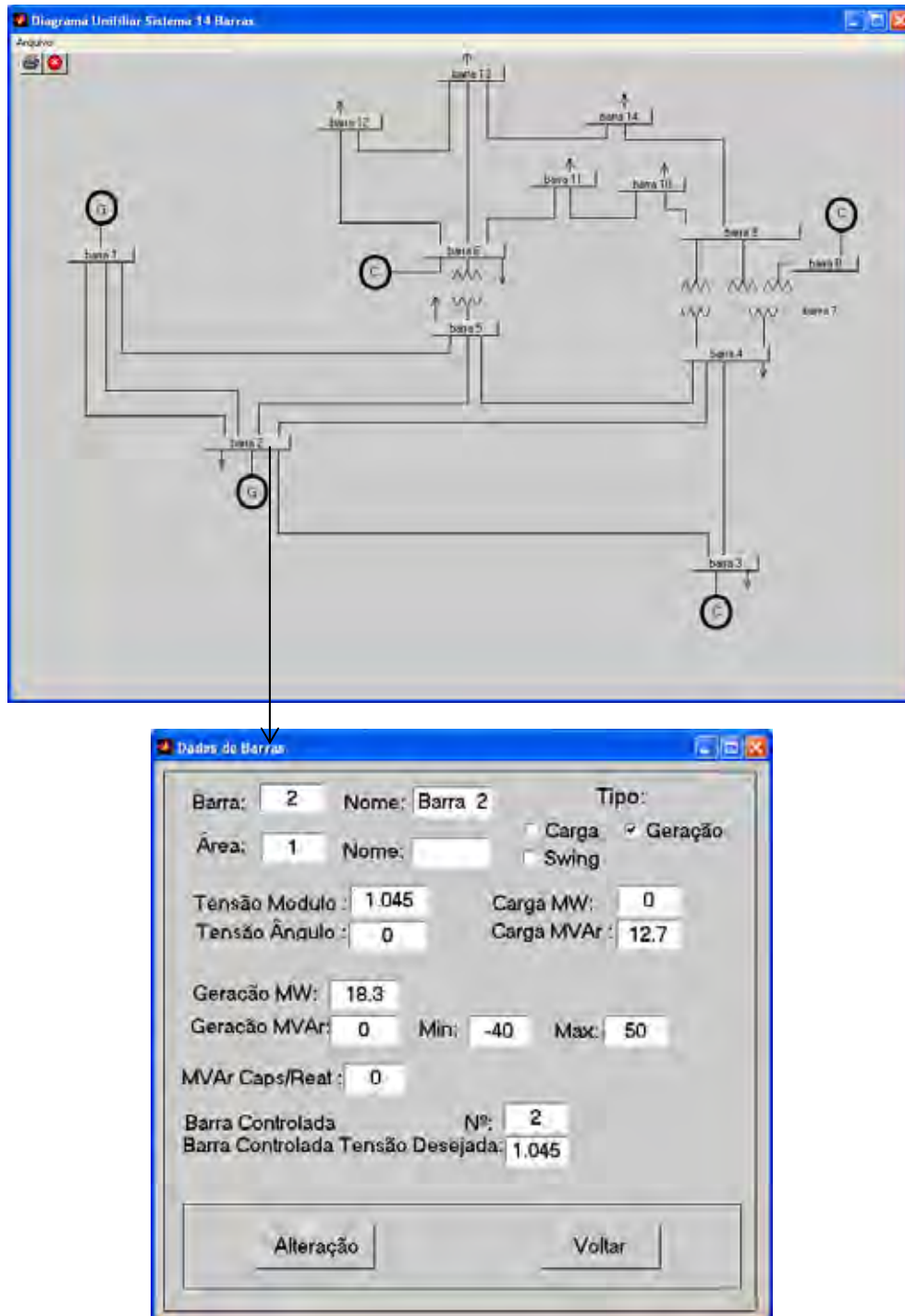


Figura 3.25 – Diagrama unifilar e caixa de diálogo **Dados de Barras** com os dados referentes à barra 2.

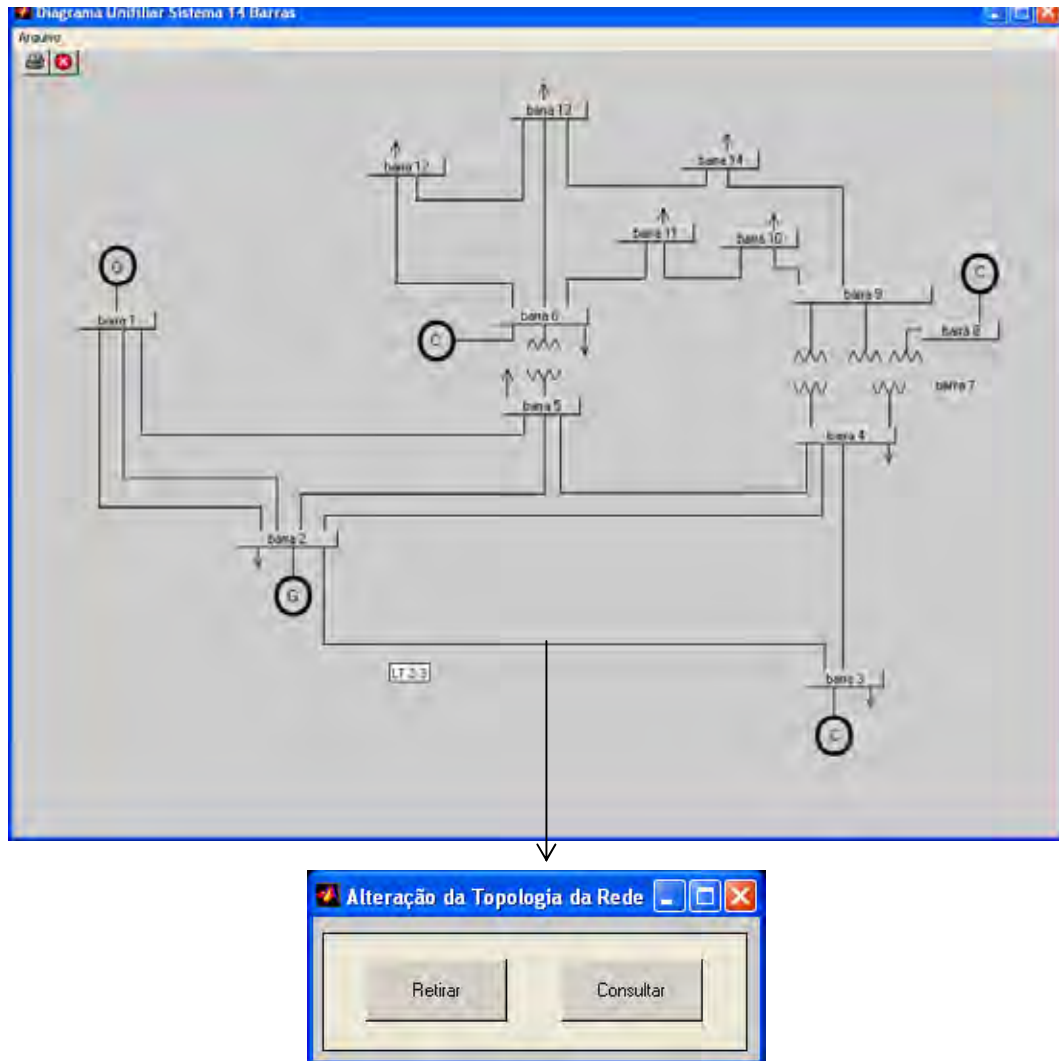


Figura 3.26 – Caixa de diálogo para a **Alteração da Topologia da Rede**.

The 'Dados de Circuito' dialog box contains the following fields and values:

De:	2	Área:	1	Nº Circuito:	1	
Para:	3	Área:	1	Proprietaria:		
Circuito	Resistência:	0.046	Carreg. Normal:	<input type="checkbox"/>		
	Reatância:	0.197	Carreg. Emerg.:	<input type="checkbox"/>		
	Susceptância:	0.043				
Trato	Tap:	<input type="checkbox"/>	Tap Min:	<input type="checkbox"/>	Tap Max:	<input type="checkbox"/>
	Barra Controlada:	<input type="checkbox"/>				
Ângulo do Trato Defasador <Graus>:			<input type="checkbox"/>	Barra de Ref:		<input type="checkbox"/>
Alteração			Voltar			

BARRA DE NO.	BARRA PARA NO.	IMPEDANÇIA R<p.u.>	X<p.u.>	shunt Bsh1<p.u.>
2	2	0.0388	0.1183	0.1058
1	1	0.0399	0.1183	0.1058
3	3	0.0470	0.1980	0.0438
4	4	0.0591	0.1763	0.0374
5	5	0.0570	0.1739	0.0340
4	4	0.0570	0.1710	0.0346
4	5	0.0134	0.0411	0.0128
4	7	0.0000	0.7091	0.0000
4	9	0.0000	0.5562	0.0000
5	6	0.0000	0.2520	0.0000
6	11	0.0950	0.1989	0.0000
6	12	0.1229	0.2558	0.0000
6	13	0.0642	0.1303	0.0000
9	10	0.0318	0.0845	0.0000
9	14	0.1271	0.2704	0.0000
10	11	0.0820	0.1921	0.0000
12	13	0.2209	0.1999	0.0000
13	14	0.1709	0.3460	0.0000
7	8	0.0000	0.1762	0.0000
7	9	0.0000	0.1100	0.0000

Figura 3.29 - Banco de dados das linhas de transmissão do sistema IEEE-14 após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5.

Após a seleção e retirada da LT desejada, o programa foi novamente executado com o novo banco de dados, isto é, o banco devidamente alterado. Observa-se que os dados de barra permanecem inalterados. Nas Figuras 3.30 e 3.31 são apresentados, respectivamente, o relatório de **Sumário de Mismatch** e o **Relatório de Fluxo de Potência** o qual pode ser comparado com o apresentado na Figura 3.12. Observe da comparação destes dois relatórios, que o fluxo de potência ativa que circulava anteriormente pela LT₁₅ (76 MW) é redirecionado para as duas LT situadas entre as barras 1 e 2, e assim todos os fluxos de potências ativa e reativa, assim como as perdas, das LT's pertencentes à vizinhança da barra 2, aumentam.

```

Sumario de Mismatch.m - Bloco de notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda

[ Todos os Mismatches de Potência do Processo Iterativo ]
=====
[ Fluxo de Potência - Método de Newton-Raphson ]
=====
[ Sistema do IEEE 14 Barras ]
=====
[ Contigência da LT entre as barras 1 5 ]
=====

[#Barras: 14
[#Ligações: 20

-----
[Iteração -> 0

>> Barra    P Mismatches    Q Mismatches
>>   1      0.0796      0.1240
>>   2     -0.0606      0.3692
>>   3      0.9219      0.0322
>>   4      0.3823     -0.3623
>>   5     -0.0006     -0.5188
>>   6      0.6049      1.3736
>>   7      0.0000     -0.5108
>>   8      0.0000      0.5568
>>   9      0.2950     -0.0240
>>  10      0.0900      0.0580
>>  11     -0.1019     -0.2686
>>  12     -0.0458     -0.2063
>>  13     -0.0819     -0.3690
>>  14      0.1490      0.0500
>> Máximo mismatch P = 0.9219 (barra 3)
>> Máximo mismatch Q = 1.3736 (barra 6)

-----
[Iteração -> 1

```

Figura 3.30 – Relatório **Sumário de Mismatch** para o sistema IEEE-14 após a retirada da LT situada entre as barras 1 e 5.

Relatorio de Fluxo de Potencia.m - Bloco de notas

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda

[FLUXO DE POTÊNCIA DA ÁREA 1 DO SISTEMA DO IEEE 14 BARRAS]

[Método de Newton-Raphson]

[Contigência da LT entre as barras 1 5]

-----DADOS DA BARRA-----

NO.	DADOS DA BARRA		FLUXOS NAS LINHA		
			NO.	MW	MVAR
1	Tensão	1.060	2	120.031	-18.870
	GERAÇÃO	240.062	2	120.031	-18.870
	CARGA	0.000			
2	Tensão	1.040	1	-114.998	22.574
	GERAÇÃO	18.300	1	-114.998	22.574
	CARGA	0.000	3	86.922	-0.266
3	Tensão	1.010	2	-83.636	9.509
	GERAÇÃO	0.000	4	-10.564	3.589
	CARGA	94.200			
4	Tensão	1.008	2	-79.708	12.302
	GERAÇÃO	0.000	3	10.656	-6.877
	CARGA	47.800	5	-25.827	10.321
5	Tensão	1.007	7	29.331	-18.208
	GERAÇÃO	0.000	9	17.749	6.374
	CARGA	7.600	2	-74.717	8.931
6	Tensão	1.010	4	25.931	-11.294
	GERAÇÃO	0.000	6	41.186	0.763
	CARGA	11.200	5	-41.186	3.453
7	Tensão	1.002	11	5.577	3.369
	GERAÇÃO	0.000	12	7.560	2.533
	CARGA	0.000	13	16.849	7.145
8	Tensão	1.002	4	-29.331	20.911
	GERAÇÃO	0.000	8	0.000	-23.066
	CARGA	0.000	9	29.331	2.161
9	Tensão	1.042	7	-0.000	24.000
	GERAÇÃO	0.000			
	CARGA	0.000			
10	Tensão	1.000	4	-17.750	-4.518
	GERAÇÃO	0.000	10	6.990	4.385
	CARGA	29.500	14	10.591	3.738
11	Tensão	0.994	7	-29.331	-1.205
	GERAÇÃO	0.000			
	CARGA	9.000			
12	Tensão	0.999	9	-6.968	-4.327
	GERAÇÃO	0.000	11	-2.032	-1.473
	CARGA	3.500	6	-5.537	-3.285
13	Tensão	0.995	10	2.037	1.485
	GERAÇÃO	0.000			
	CARGA	6.100	6	-7.484	-2.374
14	Tensão	0.990	13	1.384	0.774
	GERAÇÃO	0.000			
	CARGA	13.500	6	-16.631	-6.717
15	Tensão	0.977	12	-1.378	-0.769
	GERAÇÃO	0.000	14	4.510	1.686
	CARGA	14.900			
16	Tensão	0.977	9	-10.431	-3.396
	GERAÇÃO	0.000	13	-4.469	-1.604
	CARGA	5.000			

Figura 3.31 - Relatório do Fluxo de Potência para o sistema IEEE-14 sem a LT situada entre as barras 1 e 5.

(*swing*), na solução do problema do fluxo de potência. Muito embora os estudantes possam executar ou escrever programas de fluxo de potência, não poucas vezes isso se dá sem uma perfeita compreensão dos conceitos relacionados com seu uso. Entre as muitas questões relacionadas com a especificação da barra de folga, pode-se citar as seguintes:

- Qual é a sua real necessidade?
- A solução do problema dependerá de sua escolha?
- A barra de folga (*slack*) assume a perda total de potência ativa (e reativa)?
- No caso de um sistema sem perdas, não haveria a sua necessidade?

3.4.1 INFLUÊNCIA NO BALANÇO DE POTÊNCIA DO SISTEMA E NAS PERDAS NA TRANSMISSÃO

A barra de folga é considerada como um artifício matemático criado pelos analistas de fluxo de potência, porém sem nenhum elo direto com o sistema físico (STOTT E ALSAÇ, 1974). Ela é usada com uma dupla função, atuar como referência angular e para fechar o balanço de potência do sistema. Ela é necessária para estabelecer uma referência angular para a resolução das equações do fluxo potência uma vez que os mesmos, conforme apresentado na equação (2.18) da seção 2.6, são expressos como diferenças angulares ($\theta_k - \theta_m$), isto é, o problema de fluxo de potência é indeterminado nas variáveis θ de cada barra (MONTICELLI, 1983). Como as perdas totais de potência (ativa e reativa) não podem ser determinadas antes de se ter a solução final do problema, é preciso ter ao menos uma barra de folga, cuja geração possa ser reprogramada para fornecer as potências ativa e reativa adicionais necessárias para suprir as perdas (ativa e reativa) na transmissão e fechar o balanço de potência do sistema. Essas potências, adotando a barra 1 como sendo a barra de referência, podem ser calculadas por meio das equações:

$$P_l^G = \sum_{j=1}^{NC} P_j^C - \sum_{i=2}^{NG} P_i^G + \sum_{km \in \Omega} g_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2 V_k V_m \cos \theta_{km}) \quad (3.1)$$

$$Q_l^G = \sum_{j=1}^{NC} Q_j^C - \sum_{i=2}^{NG} Q_i^G + \sum_{km \in \Omega} [-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2) - b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2 V_k V_m \cos \theta_{km})] \dots \\ - \sum_{n=1}^{NB} b_n^{sh} V_n^2 \quad (3.2)$$

onde NB é o número de barras da rede, e NG e NC são os respectivos conjuntos de barras de geração e de demanda (carga), e Ω é o conjunto de todas as barras. Observe na equação 3.2 que $-b_{km} (V_k^2 + V_m^2 - 2 V_k V_m \cos \theta_{km})$ é a perda reativa nos elementos série das linhas de transmissão (LT's), enquanto que $-b_{km}^{sh} (V_k^2 + V_m^2)$ e $b_n^{sh} V_n^2$ correspondem à geração de potência reativa nos elementos *shunts* da LT (para LT reais, $b_{km} < 0$ e $b_{km}^{sh} > 0$) e de barra (banco de capacitores e/ou reatores). A equação (3.1) ((3.2)) mostra que a barra de folga deve gerar a diferença entre a carga ativa (reativa) total do sistema de potência mais as perdas ativa (reativa no elemento série mais a geração de potência reativa nos elementos *shunts*), e a soma de potência ativa (reativa) especificada (calculada) nas barras de geração ou PV's. Essas diferenças são conhecidas como desbalanço (*mismatch*) de potência do sistema. Em geral, na ausência de um melhor critério, o maior gerador, isto é, aquele que apresentar uma maior reserva de potência, é escolhido como barra de folga. Entretanto, outros critérios foram sugeridos para a escolha da barra de geração mais apropriada para ser usada como barra de folga, considerando que sejam capazes de suprir as perdas do sistema, entre estes pode-se citar a barra que apresenta:

- maior corrente de curto-circuito, isto é, aquela cujo elemento da diagonal da matriz de impedância de barras da rede elétrica ($Z_{barra} = [Y_{barra}]^{-1}$) apresenta o menor valor;
- maior número de LT's conectada a ela;

- menor geração de perda ao suprir as perdas do sistema.

Apesar da característica de convergência da solução do fluxo de potência não ser afetada pela barra que será adotada como barra de folga, as perdas na transmissão e, portanto, o desbalanço de potência do sistema será afetado pela sua escolha. A título de exemplo, considere o sistema de 5 barras apresentado no Apêndice B, cujas tensões das barras de folga e de tensão controlada (PV) são iguais a 1,0 p.u. Considere também, que o suprimento de uma carga de potência ativa igual a 90 MW, localizada na barra 5, seja efetuada integralmente pela barra de tensão controlada (PV), e que a barra de folga seja responsável apenas pelo fechamento do balanço de potência do sistema. Adotou-se que as resistências dos transformadores são iguais a zero, ou seja, sem perdas. Nas Figuras 3.33 e 3.34 a seguir, observa-se o estado convergido com os fluxos de potência ativa e reativa considerando como barra de folga respectivamente, a barra 1 e a barra 3. Observe que a perda ativa total (3,205 MW) será maior no caso da escolha da barra 1 como barra de folga, do que no caso da escolha da barra 3 (1,399 MW). Isso já era esperado face ao maior valor da resistência (0,039 p.u.) da LT localizada entre as barras 4 e 5. No caso da Figura 3.34, o suprimento de potência ativa (90MW) será efetuado pela barra 1 através da LT situada entre as barras 2 e 5 cuja resistência (0,017 p.u.) é menor, produzindo com isso menores perdas. Observe também nas figuras que o mesmo se sucede com perda reativa total, ou seja, há uma redução. O mesmo se sucederia caso o suprimento da carga fosse dividido igualmente entre as duas barras, conforme mostrado nas Figuras 3.35 e 3.36. Uma análise similar se aplica ao fluxo de potência reativo. Com base nestes resultados constata-se que a escolha da barra de folga afetará o valor da perda ativa (reativa) total, isto é, resultará em maiores ou menores perdas na transmissão. Entretanto, a redução das perdas através da escolha adequada da barra de folga está além do escopo do fluxo de potência no qual as potências geradas são preestabelecidas pelo despacho econômico.



Figura 3.33 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson*, considerando a barra 1 como referência angular.

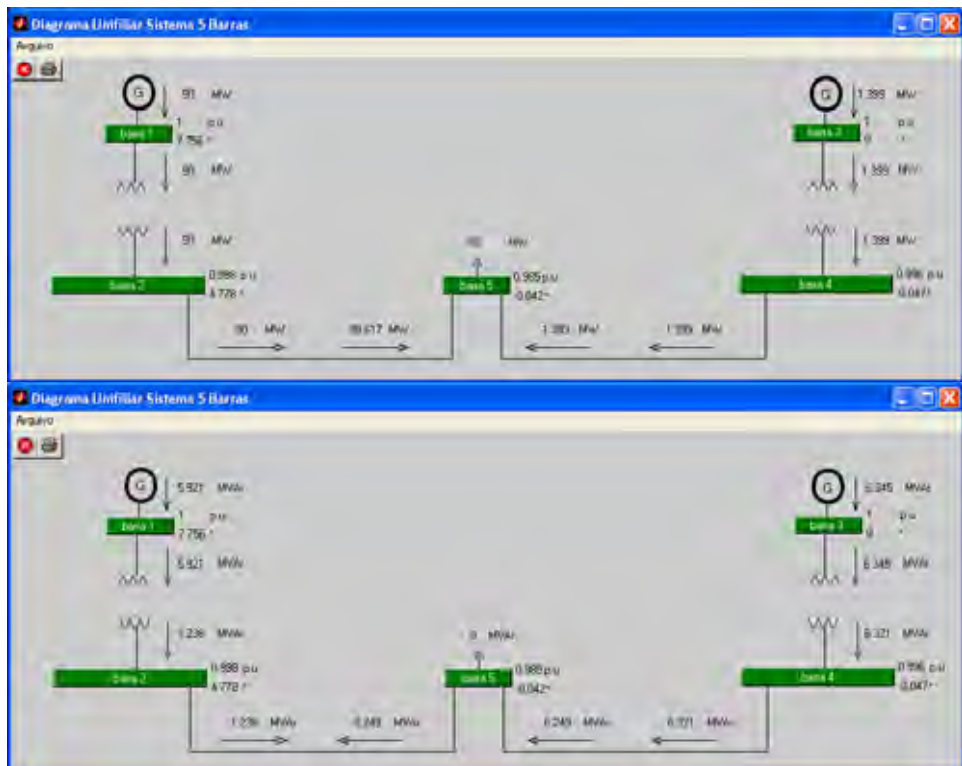


Figura 3.34 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson*, considerando a barra 3 como referência angular.

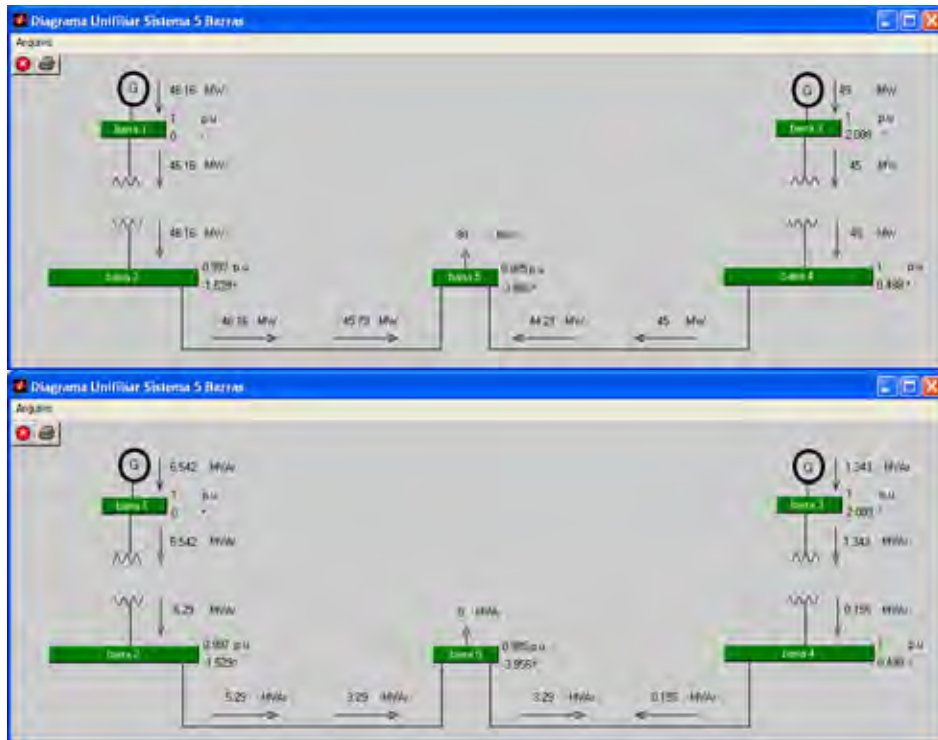


Figura 3.35 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson*, considerando a barra 1 como referência angular e a barra 3 atendendo metade da carga.

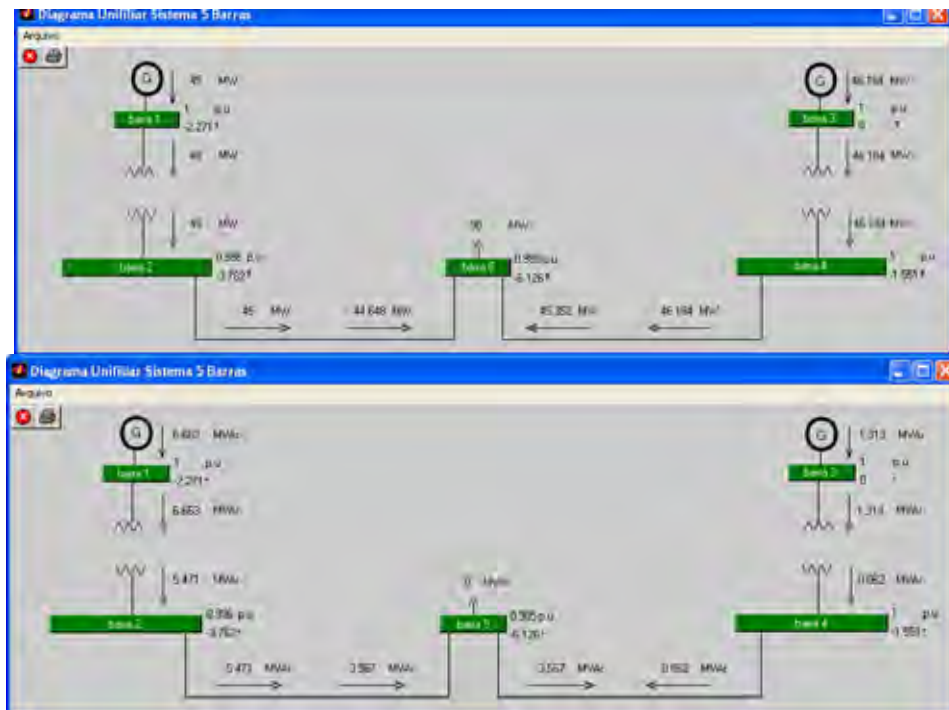


Figura 3.36 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson*, considerando a barra 3 como referência angular e a barra 1 atendendo metade da carga.

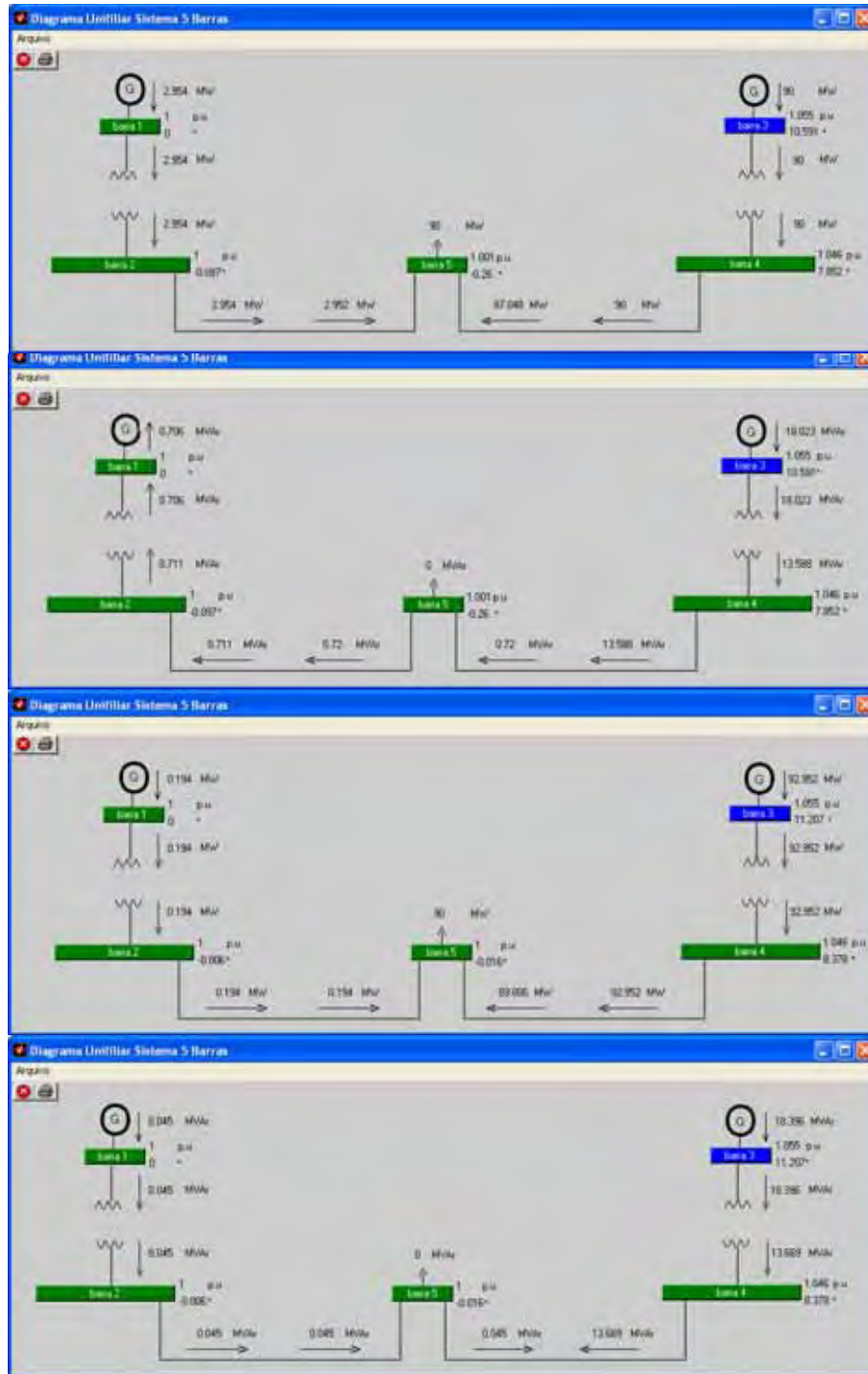
3.4.1.1 PROCEDIMENTO DE AJUSTE SUCESSIVOS

Para compreender um pouco mais qual é o papel desempenhado pela barra de folga, procuremos encontrar se existe um estado tal que somente a barra geração (PV) esteja suprindo a carga, isto é, um estado tal que a barra de folga não esteja apenas servindo de referência angular. Para fins de ilustração tentemos obter este estado por um procedimento de ajustes sucessivos (tentativa e erro).

Da Figura 3.33 verifica-se que a barra de folga está fornecendo 3,205 MW e 14,859 MVar de potência ativa e reativa, respectivamente. Assim, para se conseguir que o suprimento da carga se dê integralmente a partir do gerador localizado na barra 3 (PV), o primeiro passo a ser executado seria, considerado o maior acoplamento (Q-V) existente entre o fluxo de potência reativa e a variável tensão, alterar o perfil de tensão de forma a procurar anular o fluxo de potência reativa. Assim, pode-se incrementar sucessivamente a tensão da barra 3, mantendo a tensão da barra de folga fixa em 1,0 p.u., até se conseguir uma inversão do fluxo de potência reativa nas LT's.

Observe na Figura 3.37(a) que para uma tensão de 1,055 p.u. na barra 3, o fluxo de reativo da LT_{52} , localizado entre as barras 5 e 2, não só inverteu o sentido, mas ficou reduzido a um pequeno valor de apenas 0,72 MVar, ou seja, a barra 3 passa a gerar praticamente todo o fluxo reativo necessário. Ainda na Figura 3.37(a), verifica-se que para esse valor de magnitude de tensão há um fluxo de 2,952 MW chegando na barra 5, oriundo da barra de folga. Este fluxo corresponde exatamente ao valor das perdas na LT_{45} , localizada entre as barras 4 e 5, ou seja, dos 90 MW gerados pelo gerador da barra 3 apenas 87,048 MW ($90 - 2,952$ MW) são entregues à carga, os restantes 2,952 MW são dissipados na resistência da LT_{45} . Assim, o próximo passo

necessário para eliminar a contribuição da barra de folga seria incrementar a potência ativa gerada pelo gerador da barra 3 desse montante.



(a)

(b)

Figura 3.37 – Fluxos de potência para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 1 como referência angular: (a) fluxos de potência ativa e reativa com a tensão da barra 3 igual a 1,055 p.u. e a

potência ativa gerada fixa em 90 MW, (b) fluxos de potência ativa e reativa com a tensão da barra 3 igual a 1,055 p.u. e a potência ativa gerada fixa em 92,952 MW.

A Figura 3.37(b) apresenta o estado e os fluxos ativos e reativos após o incremento da potência ativa do gerador da barra 3. Observa-se agora que houve uma redução adicional dos fluxos ativos e reativos na LT₂₅, localizada entre as barras 2 e 5 e portanto, nos correspondentes valores gerados pela barra de folga. Verifique que ocorreu novamente uma inversão do fluxo de potência reativa na LT₂₅. Assim, deve-se novamente incrementar a tensão da barra 3, por exemplo para 1.05535 p.u., e posteriormente a potência ativa, e assim sucessivamente. O resultado final pode ser visto na Figura 3.38, de onde se verifica que o gerador da barra 3 agora é responsável pelo suprimento integral (carga mais as perdas) de potência ativa e reativa, ficando a barra de folga apenas como referência angular.

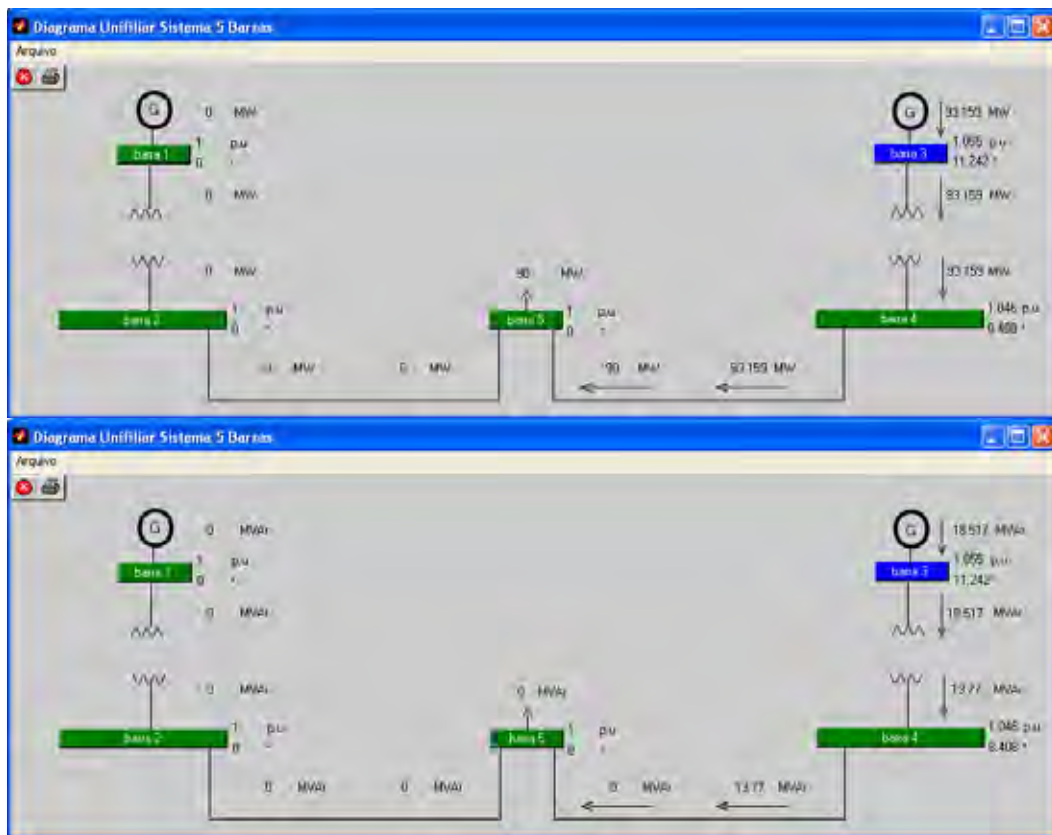


Figura 3.38 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 1 como referência angular e a tensão da barra 3 igual a 1,05535 p. u. e a potência ativa gerada fixa em 93,159 MW.

3.4.2 REFERÊNCIA ANGULAR

Conforme comentado anteriormente, pelo fato dos fluxos de potências serem expressos como diferenças angulares ($\theta_k - \theta_m$), será obtido uma mesma distribuição caso seja adicionado uma constante arbitrária a todos os ângulos nodais. Isto pode ser visto na Figura 3.39, para a qual se considerou que o ângulo inicial da barra de referência ou barra de folga é igual a 40° e não mais 0° , como foi no caso da Figura 3.33. Comparando os fluxos de potência ativa e reativa verifica-se que são exatamente os mesmos. Uma observação importante é que o algoritmo irá divergir caso se inicie do *flat-start* e se considere um valor inicial maior que 40° para o ângulo da barra de referência. Por outro lado, o algoritmo convergirá novamente caso se considere para as demais barras um valor inicial igual ou próximo do adotado para o ângulo da barra de folga (*slack*).

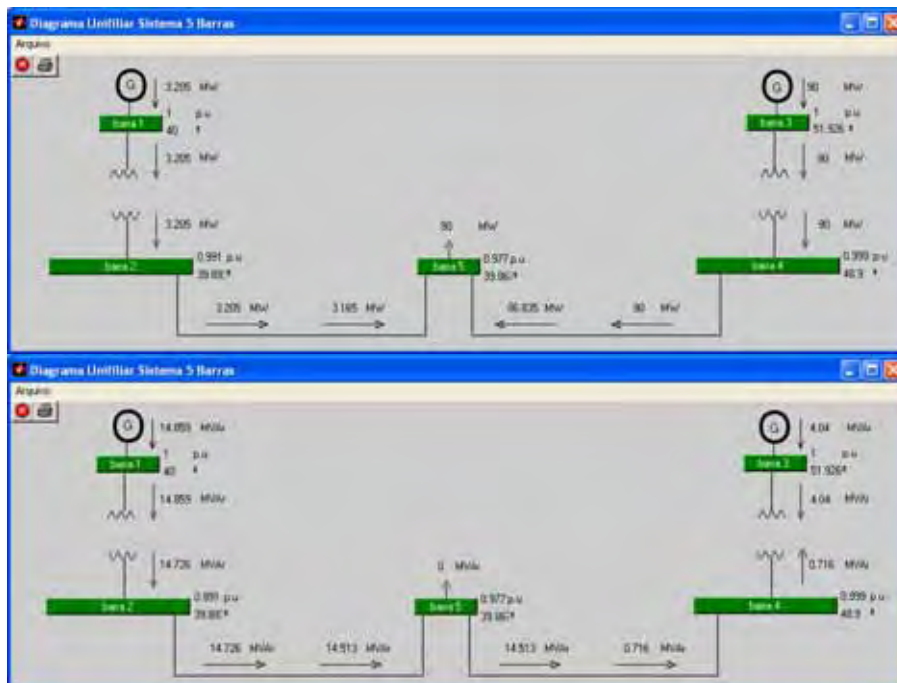


Figura 3.39 – Fluxos de potência ativo e reativo para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson*, considerando a barra 1 como referência angular com ângulo igual a 40° .

3.4.2.1 FORNECIMENTO DAS PERDAS

Das Figuras 3.33 e 3.34 constata-se que a potência ativa gerada pela barra de folga (3,205 MW) é exatamente igual ao valor da perda ativa total. A princípio isso leva o iniciante nos estudos de fluxo de potência a acreditar que a barra de folga é responsável pelo fornecimento das perdas na transmissão. Entretanto, observando-se mais atentamente, verifica-se que o valor do fluxo de potência ativa que chega à barra 5 pela LT_{45} é igual a 86,835 MW, ou seja, a potência ativa de 90MW, entregue pela barra de geração (barra 3), corresponde a soma da perda ativa na LT_{45} (3,165 MW) mais a parcela da potência entregue para a carga. Assim, o fato da barra de folga estar fornecendo um valor de potência ativa exatamente igual ao das perdas ativa total trata-se apenas de uma coincidência. Na realidade, pode-se concluir que a barra de folga não está fornecendo a perda total de potência ativa, mas sim a parcela extra no valor de 3,165 MW, necessária ao atendimento da carga, mais a parcela no valor de 0,04 MW correspondente a perda ativa devida ao fluxo de potência pela LT_{25} , localizada entre as barras 2 e 5.

Conforme foi demonstrado anteriormente através de um procedimento de ajustes sucessivos é possível obter para este sistema, um estado tal que a barra de folga não forneça nem potência ativa nem reativa, ou seja, esteja apenas servindo de referência angular. Entretanto, ressalta-se que embora esse procedimento seja útil para uma compreensão dos acoplamentos entre as variáveis $P-\theta$ e $Q-V$ e de suas influências no sentido dos respectivos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão, ele não é a forma mais eficiente de se obter a solução, isto é, o estado almejado. Também, esse não seria o único estado para o qual o suprimento da carga é efetuado somente pela barra geração (PV), isto é, aquele para o qual a barra de folga está apenas servindo de referência angular, não fornecendo nem potência ativa nem reativa. Uma forma mais eficiente seria a de se considerar a barra PV (barra 3) como uma barra de folga, com a

tensão especificada no valor final desejado de magnitude de tensão, e a barra folga (barra 1) como uma barra de carga com os valores de potência ativa e reativa iguais a zero. Para esse sistema em particular, isso obrigaria o estado do sistema a convergir para aquele no qual somente a barra de folga supre tanto a carga quanto as perdas nas linhas de transmissão. Por exemplo, a Figura 3.40 apresenta o estado e os fluxos ativos e reativos para esse sistema, considerando o valor de 1,025 p.u. como sendo o valor final desejado de magnitude de tensão da barra 3. Após obter-se esse resultado, basta agora considerar novamente a barra 1 como barra de folga, com o valor de 0,9663 p.u. para a magnitude de tensão, e a barra 3 como barra de geração (PV), com as respectivas magnitude de tensão e potência ativa gerada iguais a 1,025 p.u. e 93,383 MW, ver Figura 3.41. Observe dessas figuras que as magnitudes de tensão bem como as dos fluxos são as

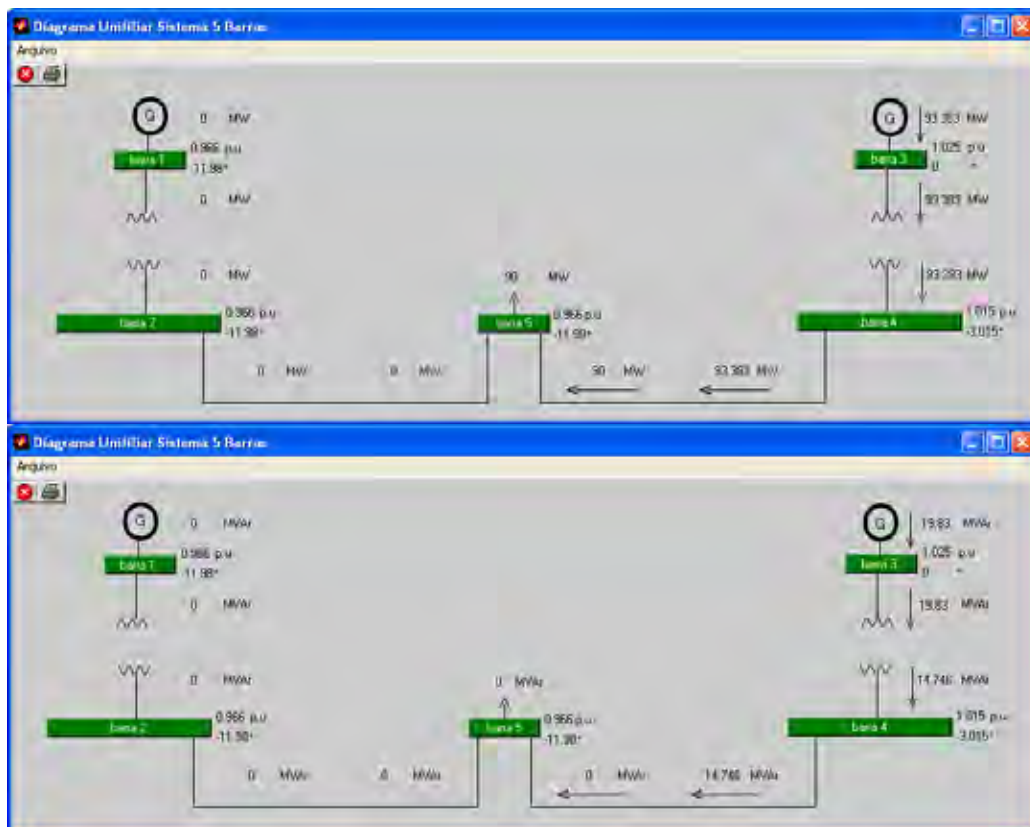


Figura 3.40 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 3 como referência angular com magnitude de tensão igual a 1,025 p.u. e a barra 1 como barra de carga igual com potência igual a zero.

mesmas. Já, conforme era esperado, aos valores dos ângulos apresentados na Figura 3.40 foi adicionada uma constante igual a $11,98^\circ$, devido à consideração do valor de 0° para a barra de folga.

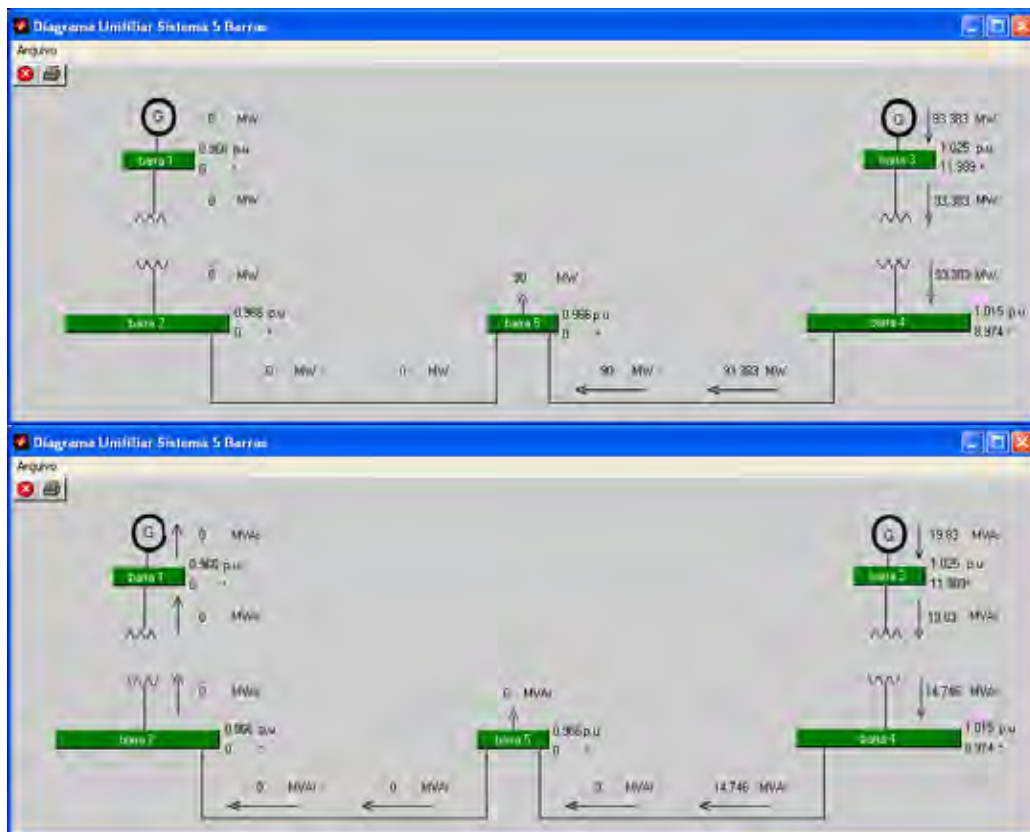


Figura 3.41 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 5 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 1 como referência angular com magnitude de tensão igual a 0,9663 p.u. e fase zero, e a barra 3 como barra de geração com as respectivas magnitude de tensão e potência ativa gerada iguais a 1,025 p.u. e 93,383 MW.

A Figura 3.42 a seguir apresenta o estado convergido com os fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 9 barras, para uma condição operativa onde uma carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida totalmente pela geração localizada na barra 2, sendo que, nessas condições, tanto a barra 3 (PV) quanto a barra de folga não fornecem nem potência ativa nem reativa. Por este sistema apresentar uma topologia malhada, portanto, diferente da configuração radial do sistema de 5 barras, a utilização do procedimento de ajustes sucessivos já se mostra

praticamente inviável. Assim, este resultado foi obtido usando o mesmo procedimento utilizado para obter a Figura 3.41, isto é considerou-se inicialmente a barra PV (barra 2) como uma barra de folga, com tensão especificada no valor final desejado de magnitude de tensão (1,025 p.u.), e a barra de folga (barra 1) e a barra PV (barra 3) como barras de carga com os valores de potência ativa e reativa iguais a zero. Isso obriga o estado do sistema a convergir para aquele no qual somente a barra de folga, no caso a barra 2, supre tanto a carga quanto as perdas ativa e reativa nas linhas de transmissão. Após obter-se o resultado, como mostra a Figura 3.43, considerou-se novamente a barra 1 como barra de folga, com o valor de 1,048 p.u. para a magnitude de tensão, a barra 3 (barra PV) com o valor de 1,013 p.u. para a magnitude de tensão, e finalmente a barra 2 como barra de geração (PV) com a respectiva magnitude de tensão e potência ativa gerada iguais a 1,025 p.u. e 414,586 MW, ver a Figura 3.42. Esse é mais um exemplo, agora num sistema com malha, em que a barra de folga atua apenas como referência angular. Verifica-se também, que o atendimento da carga se dá por dois caminhos paralelos alternativos, sendo que o maior fluxo de potência ativa ocorre pelo caminho de menor impedância.

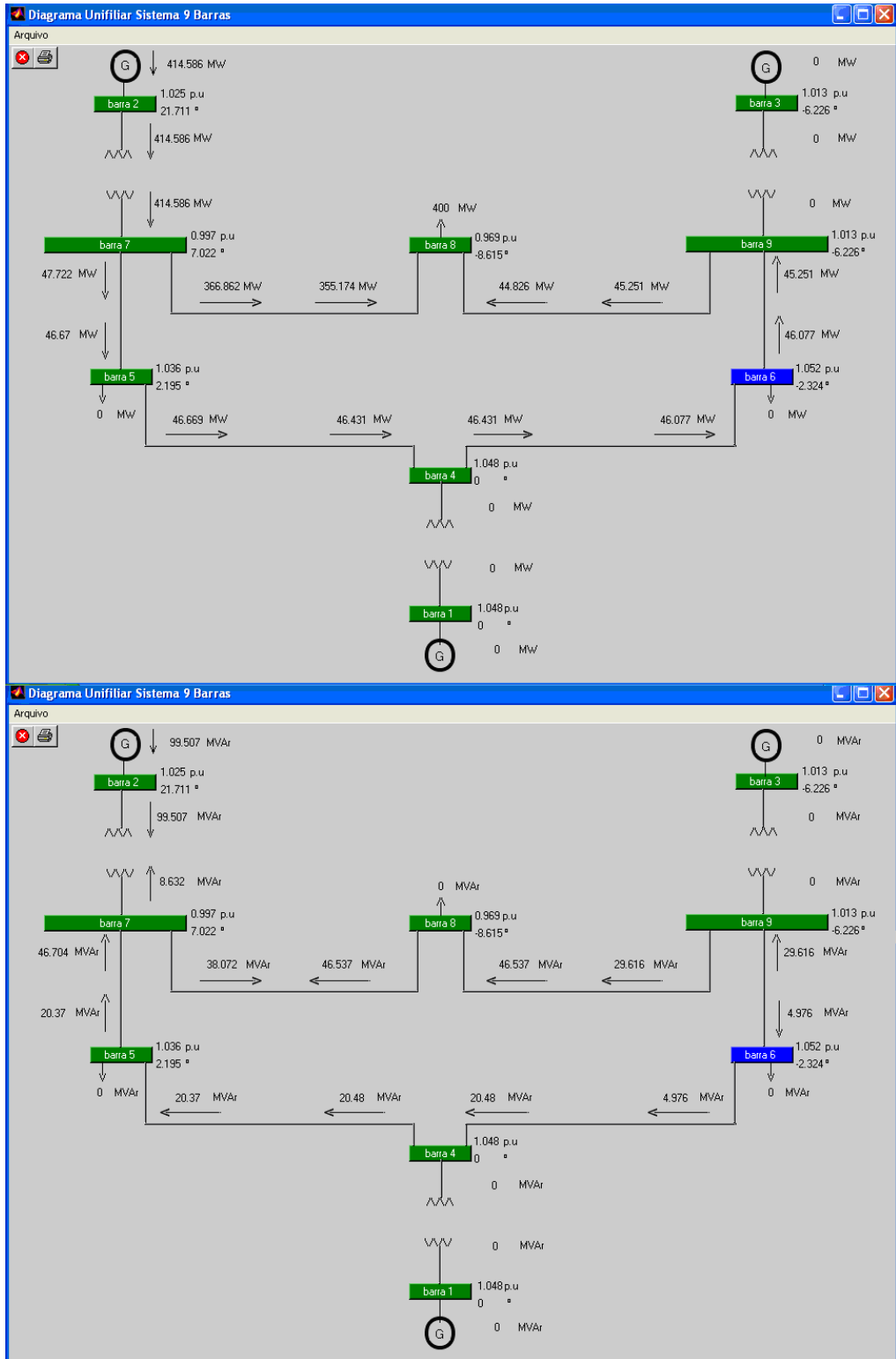


Figura 3.42 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 9 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 1 como referência angular e o suprimento de uma carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida totalmente pela geração localizada na barra 2.

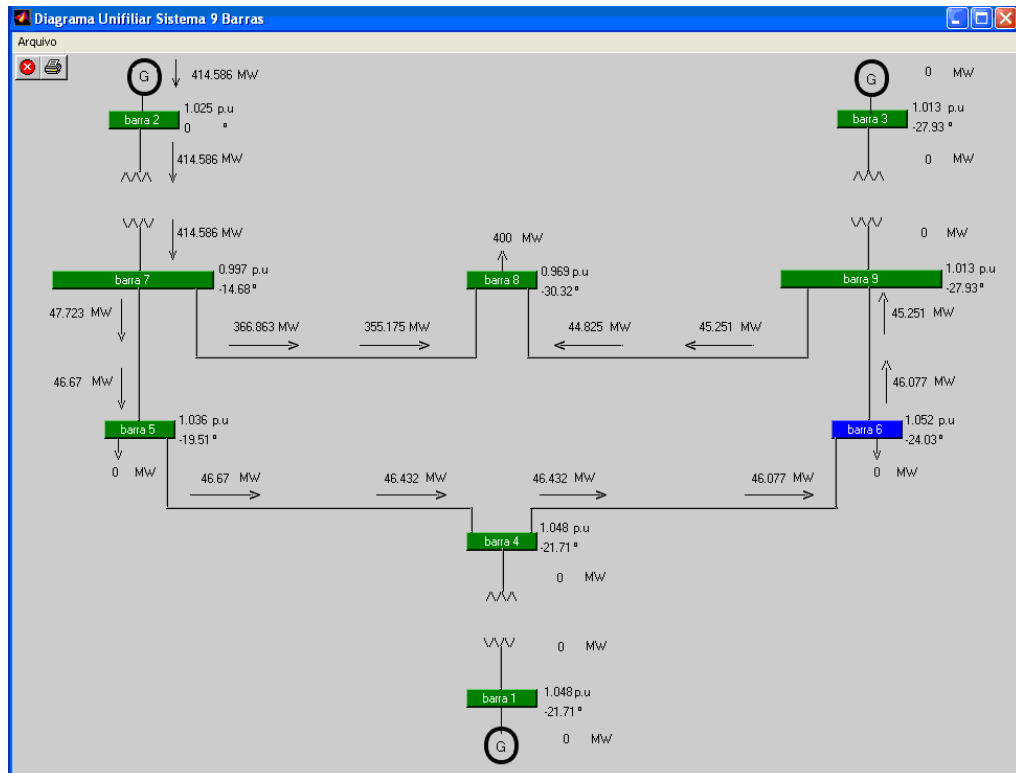


Figura 3.43 – Mostra a barra PV (barra 2) como uma barra de folga, com tensão especificada no valor final desejado de magnitude de tensão (1,025 p.u.), e a barras de carga (barra 1) e PV (barra 3), como barras de carga com os valores de potência ativa e reativa iguais a zero.

A Figura 3.44 mostra uma outra condição operativa onde a carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida parcialmente pelas gerações localizada nas barra 2 e 3. Observe que nessas condições, tanto a barra 3 (PV) quanto a barra de folga não fornecem potência reativa, e que a barra 3 fornece apenas 200 MW, ou seja, metade do valor da carga. Nesse caso, apesar de a barra 2 estar fornecendo 200 MW mais as perdas (208,12 MW), já não se pode afirmar que os 200 MW gerados na barra 3 são fornecidos integralmente a carga face às perdas existentes nas linhas de transmissão. Assim, embora a barra de folga continue a atuar apenas como referência angular, esse exemplo mostra que num sistema com malhas é muito difícil se determinar qual é a parcela que cada gerador está fornecendo para cada carga existente na rede.

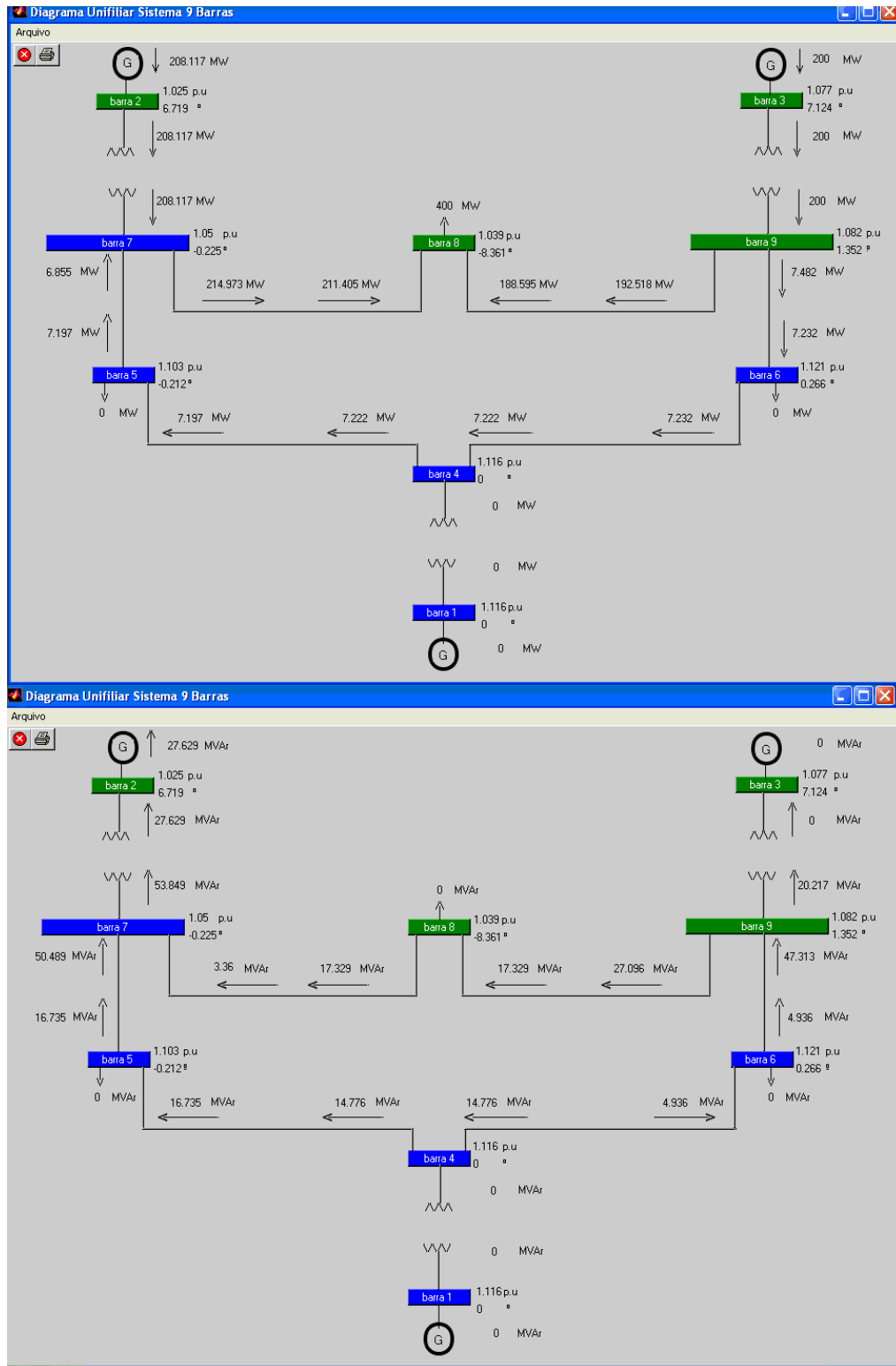


Figura 3.44 – Fluxos de potência ativa e reativa para o sistema de 9 barras obtidos pelo método de *Newton-Raphson* considerando a barra 1 como referência angular e o suprimento de uma carga de 400 MW localizada na barra 8 é atendida parcialmente pelas gerações localizadas nas barras 2 e 3.

3.5 EFEITOS DA ATUALIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DA MATRIZ JACOBIANA DURANTE O PROCESSO ITERATIVO DE *NEWTON-RAPHSON*

Nos estudos em geral, as principais características esperadas para o método de fluxo de potência a ser utilizado são a robustez e a eficiência computacional. Nesse sentido o método convencional de fluxo de potência utilizando o algoritmo de *Newton-Raphson* mostrou-se como o mais robusto. Nesse algoritmo, a cada iteração, um conjunto de equações não lineares é linearizado em torno da solução atual, e a atualização do estado é obtida pela solução destas equações. Assim, nesse procedimento, os elementos pertencentes à matriz Jacobiana são atualizados a cada iteração. No entanto, após vários estudos realizados concluiu-se que a Jacobiana é importante para a convergência do processo, mas não influencia a solução final. Observe que embora as correções a cada iteração sejam aproximações, o valor da função é calculado de forma exata. Uma vez que na maioria das vezes o processo iterativo parte de uma boa estimativa inicial, a robustez do método é tal que é possível se considerarem aproximações na matriz Jacobiana (J) sem que se perca a convergência global, e isso, às custas apenas de um aumento relativamente pequeno do número de iterações. Um outro ponto que ficou bem claro é que a convergência dos métodos de fluxo potência é significativamente afetada pelo ajuste das soluções em decorrência da violação dos limites de potência reativa nas barras de geração (barras PV). Assim, no tocante a eficiência computacional, um procedimento que passou a ser comumente utilizado é o de não atualizar a matriz J a cada iteração, mas somente quando o sistema sofrer alguma mudança significativa (mudanças na topologia do sistema) ou após o número de iterações exceder um valor predefinido de iterações. Esse procedimento, conhecido como *Very Dishonest Newton Method* [CHAI e BOSE, 1993], possibilita um ganho considerável no tempo de processamento.

O objetivo desse item é o de possibilitar que o usuário compare entre si os desempenhos dos métodos de *Newton-Raphson* convencional (NR) e *Newton-Raphson* desacoplado (NRD), algoritmos simultâneo (NRDS) e alternado (NRDA), apresentados no item 2.8 do capítulo 2. Inicialmente é apresentado e analisado o caso base do sistema IEEE-14 barras usando o NR, e considerando a atualização da matriz J a cada iteração. A seguir são comparados os desempenho dos métodos entre si. Também são comparados entre si os desempenhos desses métodos considerando as matrizes constantes.

3.5.1 CASO BASE DO IEEE-14 BARRAS USANDO O MÉTODO NEWTON-RAPHSON

As Figuras 3.45 e 3.46 apresentam para o caso base do sistema IEEE-14 barras, o processo iterativo de *Newton* considerando a atualização da matriz Jacobiana a cada iteração. Na Figura 3.45 pode-se visualizar a rápida convergência de todos os *mismatches* ativo e reativo. A Figura 3.46 mostra a convergência das tensões e das potências reativas geradas nas barras *PV*'s, e as tensões e os *tap*'s das barras controladas por *tap*.

Da Figura 3.46 pode se ver que as potências reativas geradas nas barras 6 e 8 atingiram seu limite máximo de 24 MVar e conseqüentemente, as magnitudes de tensões convergiram para valores (1,0224 e 1,0477 p.u., respectivamente) inferiores aos especificados (1,07 e 1,09 p.u., respectivamente). Já as potências reativas geradas nas barras 2 e 3 ficaram abaixo de seus respectivos limites máximos, 50 e 40 MVar, e portanto as magnitudes de tensões dessas barras convergiram para seus respectivos valores especificados, 1,045 e 1,01 p.u. Com relação às barras controladas por *tap*, barras 7 e 9, verifica-se que o *tap* que controla a magnitude de tensão da barra 7 convergiu para seu valor mínimo de 0,95. Assim, a tensão desta barra convergiu para um valor maior do que a especificada, cujo valor é de 1,0 p.u. No caso da barra 9,

o *tap* que controla sua magnitude de tensão variou entre os valores máximo e mínimo e, portanto, a tensão desta barra permaneceu fixa (controlada) no valor especificado de 1,0 p.u. Ressalta-se aqui não só a importância como também a facilidade de interpretação que a visualização gráfica trás para a análise dos resultados, quando comparada aos relatórios no formato de texto.

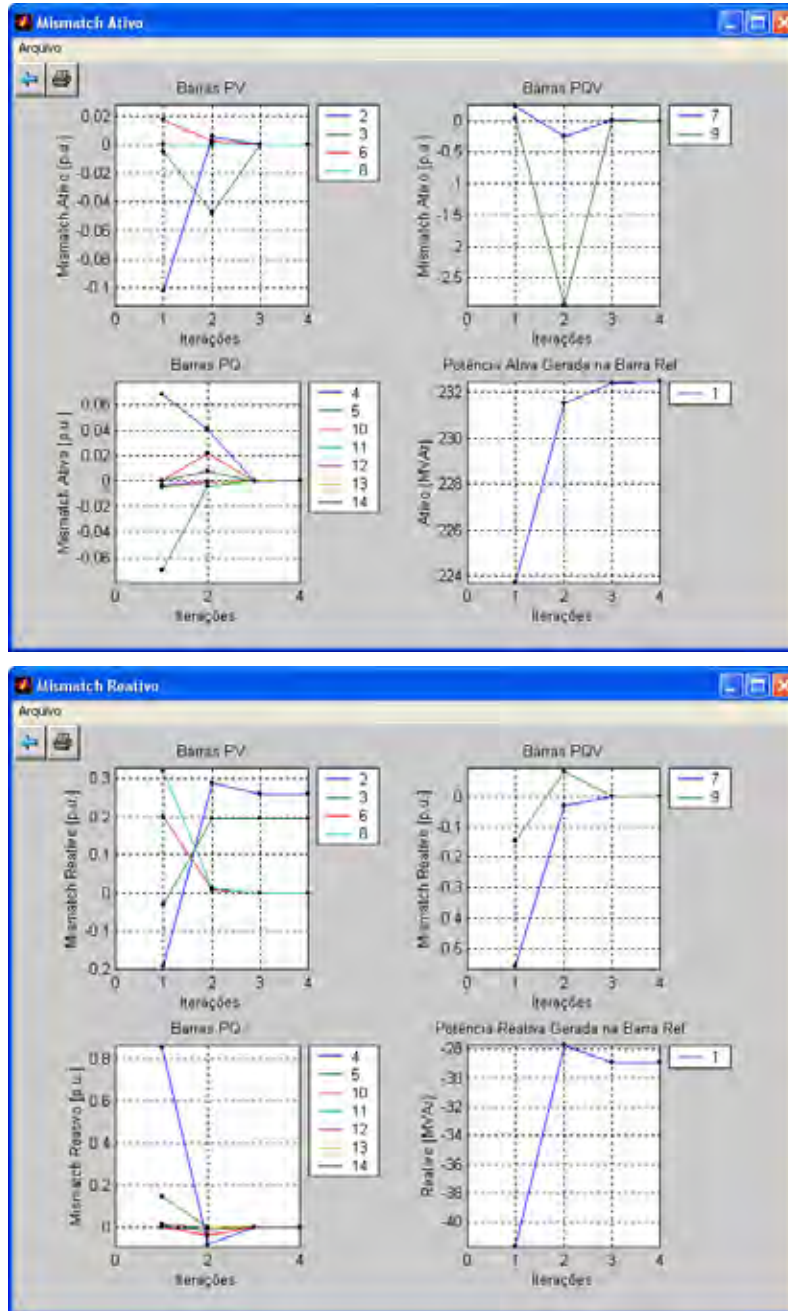


Figura 3.45 - *Mismatches* de potência ativa e reativa de todas as barras do sistema IEEE-14 barras.

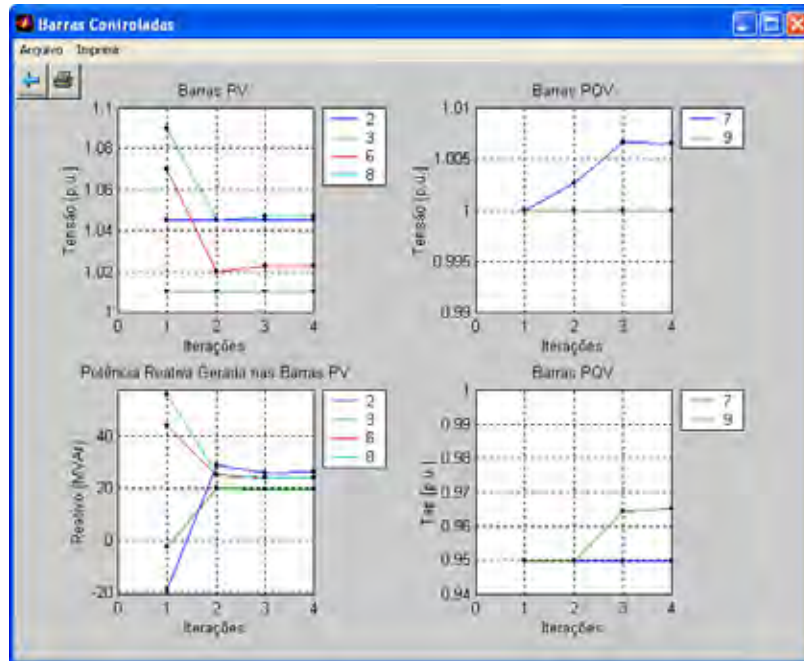


Figura 3.46 – Tensões e potência reativa gerada das barras *PV*'s, e tensões e *tap*'s das barras controladas por *tap*, do sistema IEEE-14 barras.

3.5.2 COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS *NEWTON-RAPHSON* E *NEWTON-RAPHSON* DESACOPLADOS

Para realizar as comparações o usuário deve primeiramente abrir a caixa de diálogo **Comparação de Métodos de Newton** apresentada na Figura 3.47, a partir da *Barra de Menu*. Por meio desta janela, o usuário poderá escolher o algoritmo desejado.

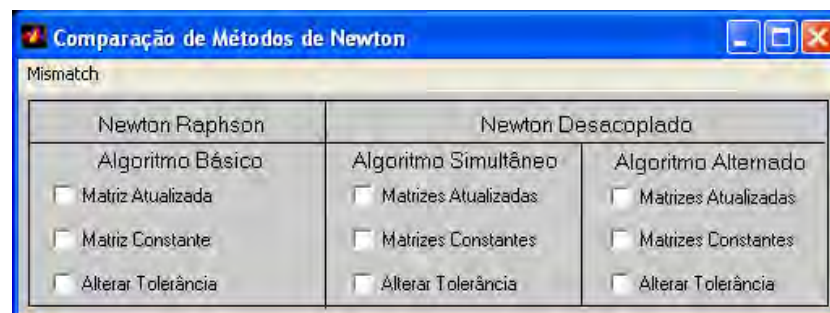
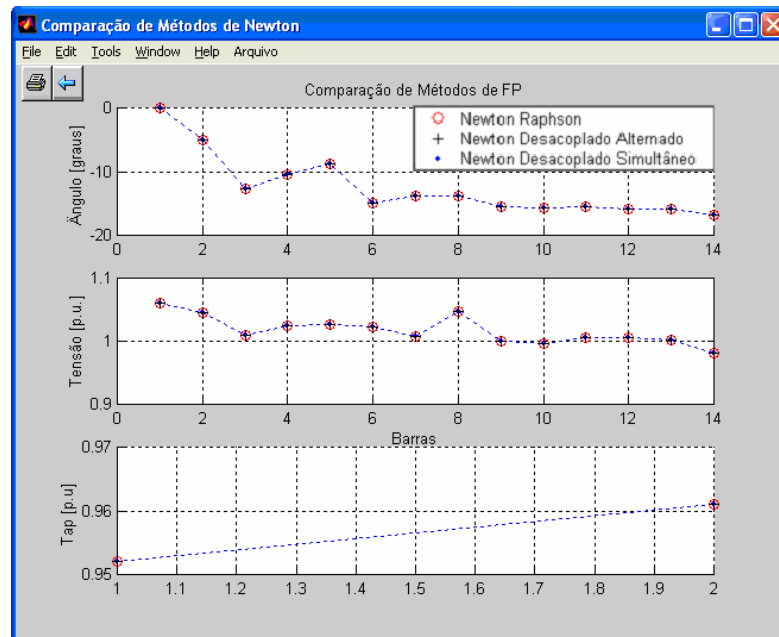


Figura 3.47 – Caixa de diálogo **Comparação de Métodos de Newton** para a escolha do algoritmo.

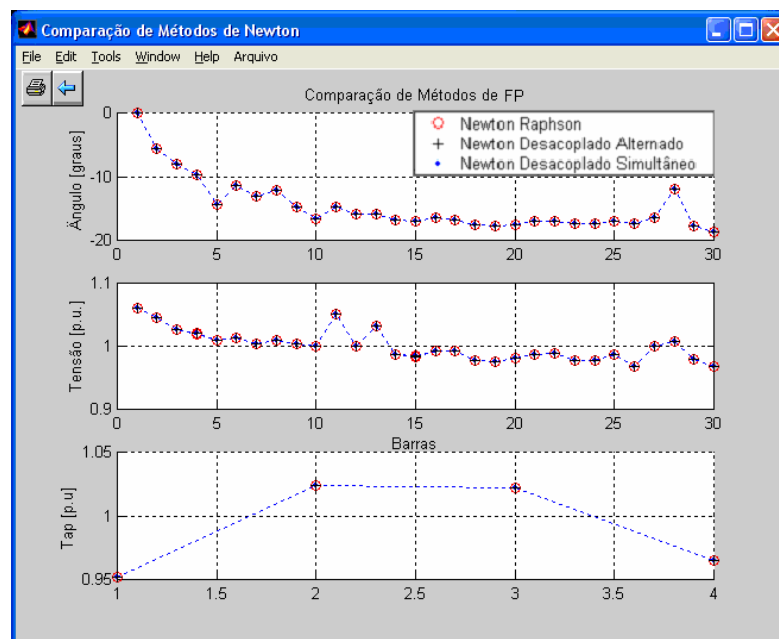
Nesta tela, o usuário poderá escolher entre as opções: *Newton–Raphson* convencional ou *Algoritmo Básico* e *Newton Desacoplado: Algoritmo Simultâneo* ou *Algoritmo Alternado*. Para cada um dos algoritmos disponíveis o usuário poderá optar entre *Matriz Atualizada* (ou *Matrizes Atualizadas*) e *Matriz Constante* (ou *Matrizes Constantes*). Na primeira opção, a matriz J (ou matrizes H e L) é atualizada a cada iteração, e na segunda, somente quando o sistema sofrer alguma mudança significativa (mudanças na topologia do sistema ou do tipo de barra, por exemplo). Caso o usuário deseje alterar a tolerância ou o número máximo de iterações, basta ativar a opção e efetuar as alterações desejadas na tela correspondente. Caso não haja alterações, o número máximo de iterações é de 20 e a tolerância é 0,001. Para escolher entre os métodos basta ativar a opção desejada e automaticamente o algoritmo será executado e o estado convergido será apresentado conforme Figura 3.48. A seguir, através da caixa de diálogo **Comparação de Métodos de Newton**, pode-se executar os demais algoritmos desejados, cujos estados serão plotados na mesma figura, no caso para os sistemas IEEE-14 e IEEE-30 barras. Das figuras constata-se que o estado convergido sempre será o mesmo, independente do método utilizado.

A partir da mesma caixa de diálogo também é possível comparar o desempenho dos métodos por meio dos seus respectivos *Mismatches* (no caso o máximo valor absoluto), ver Figura 3.49. Destas figuras se observa o melhor desempenho do algoritmo alternado em relação ao simultâneo, tanto quando as matrizes são atualizadas a cada iteração, como quando são mantidas constantes. Com relação a manter as matrizes constantes, em geral se observa um ligeiro aumento da iteração para o método de *Newton*, enquanto que para os desacoplados a variação no número de iteração dependerá do sistema, aumenta para o IEEE-14 barras e reduz para o IEEE-30 barras.

Quanto à mudança de tolerância para 10^{-2} , conforme se pode observar na Figura 3.50, esta causará muito pouca alteração no número de iterações para o método de *Newton*. Por outro lado, ela implicará numa sensível redução no caso dos desacoplados. No que se refere ao estado convergido, ele será praticamente o mesmo.

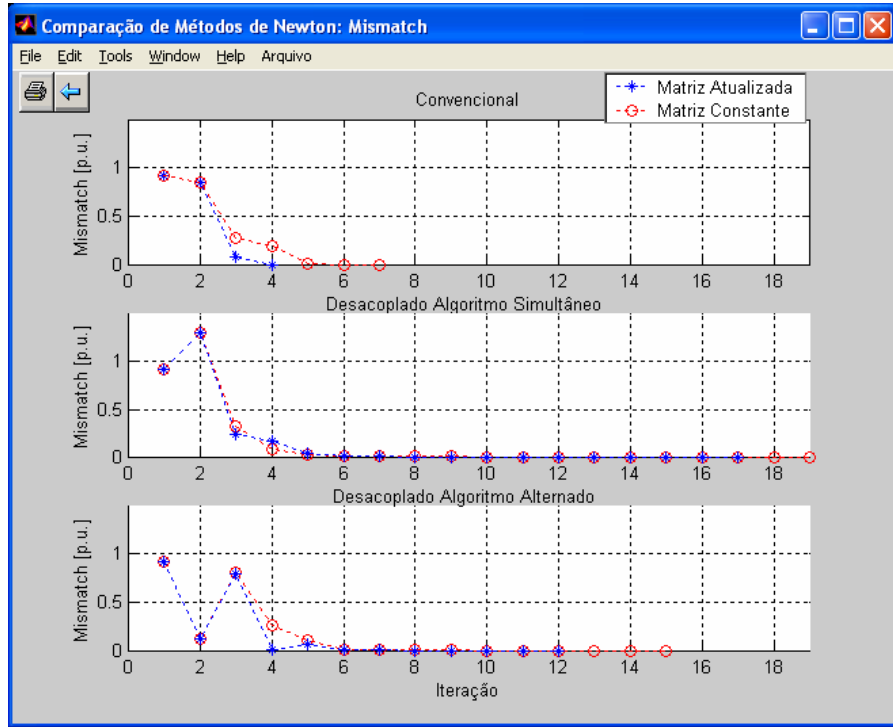


(a)

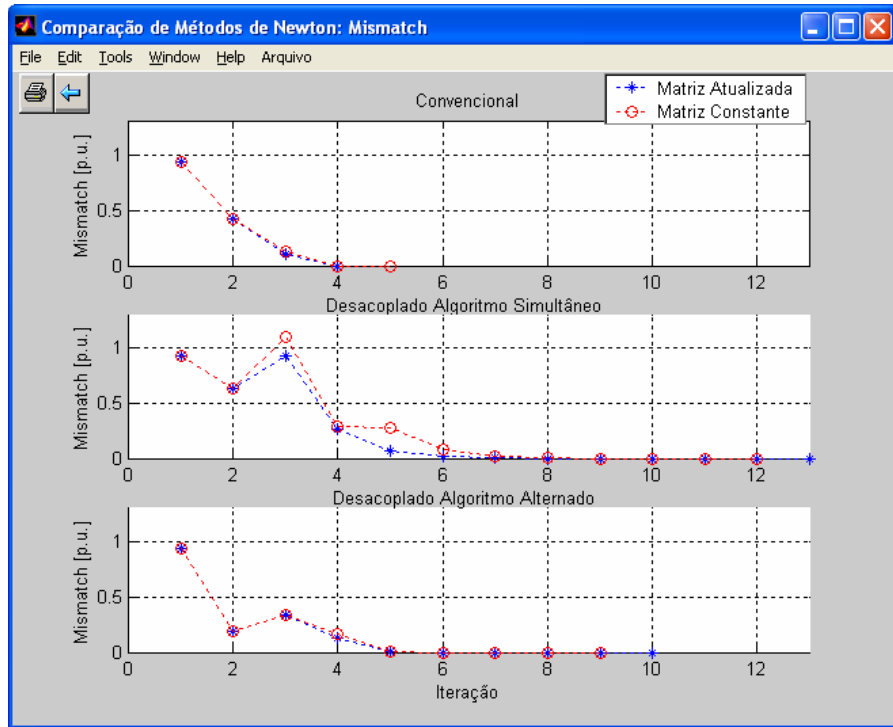


(b)

Figura 3.48 – Estados convergidos (tolerância de 10^{-3}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14 barras, (b) IEEE-30 barras.



(a)



(b)

Figura 3.49 – Variação do *Mismatch* de cada um dos algoritmos (tolerância de 10^{-3}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14 barras, (b) IEEE-30 barras.

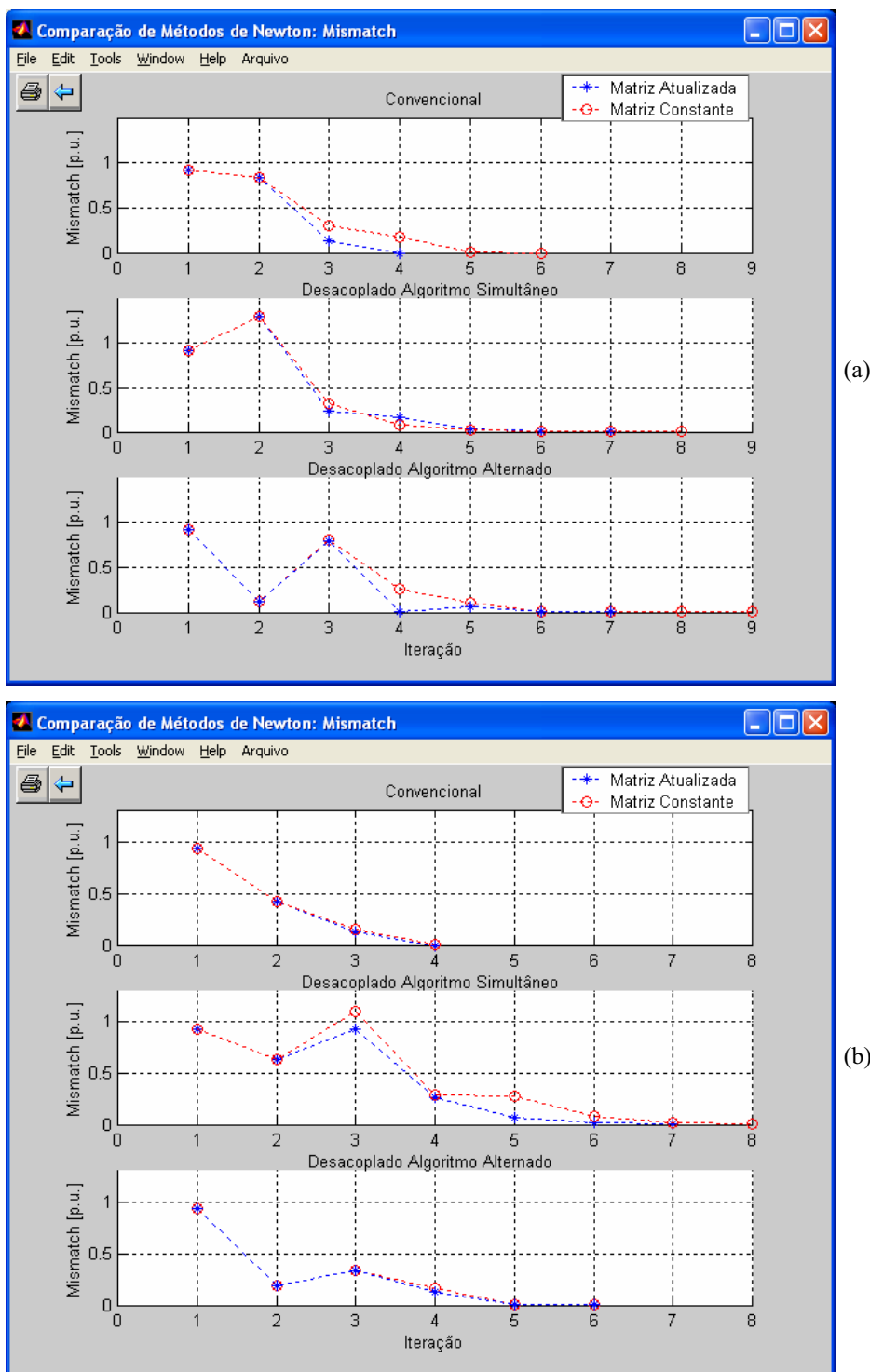


Figura 3.50 – Variação do *Mismatch* de cada um dos algoritmos (tolerância de 10^{-2}) para o caso base do sistema: (a) IEEE-14 barras, (b) IEEE-30 barras.

Finalmente, o usuário poderá acompanhar o processo iterativo passo a passo a partir do acionamento da opção *Processo Iterativo* da *Barra de Menu*, e abrir a caixa de diálogo **Processo Iterativo** apresentada na Figura 3.51. Por meio desta janela, o usuário poderá além de acompanhar processo iterativo passo a passo, observar o desempenho do método de *Newton-Raphson* convencional (NR) especificando a atualização da matriz J para um número qualquer de iterações. Também poderá verificar o efeito de se considerar a matriz constante, mas não atualizá-la quando o sistema sofrer alguma mudança significativa (mudanças na topologia do sistema), no caso, quando da mudança do tipo da barra de PQV (barras cujas magnitudes de tensão são controladas por *tap*) para PQ.

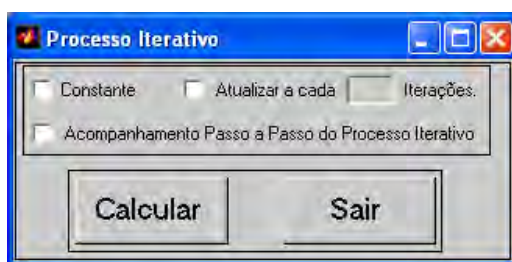


Figura 3.51 – Caixa de diálogo **Processo Iterativo** para o acompanhamento do processo de convergência do algoritmo de *Newton-Raphson*.

Capítulo 4

FLUXO DE CARGA CONTINUADO

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a interface gráfica desenvolvida para o programa de fluxo de carga continuado. A interface visa auxiliar e facilitar o aprendizado dos estudantes de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica, na aquisição de conceitos relacionados com o problema de análise estática de estabilidade de tensão em sistemas de potência. Esta análise pode ser realizada através da obtenção do perfil de tensão das barras em função de seu carregamento (curvas P-V, Q-V, e S-V). Entre outras aplicações, estes perfis são usados para determinar os limites de transferência de potência entre áreas de um sistema, ajustar margens, observar o comportamento das tensões das barras do sistema em análise, e comparar estratégias de planejamento. Estas curvas possibilitam a compreensão das condições de operação do sistema para diferentes carregamentos, e têm sido recomendadas pelas empresas do setor elétrico nacional (FORÇA TAREFA, 1999) e internacional (WSCC, 1998), para avaliação das margens de estabilidade de tensão, i.e., para a determinação do maior aumento de carga que um sistema pode suportar a partir de um dado ponto de operação (IEEE-PSSC, 1999). Para se calcular essa margem, primeiramente é necessário a obtenção do ponto de máximo carregamento (PMC) do sistema.

Nos métodos tradicionais de fluxo de potência, a obtenção do PMC se dá através de sucessivas soluções das equações de fluxo de potência. Essas soluções são realizadas considerando um aumento gradual da carga, a que por sua vez é efetuada através da variação manual do fator de carregamento (λ). Este procedimento é repetido até que o processo divirja. Esses métodos não possibilitam obter o PMC, mas apenas chegar até bem próximo a ele. Isso ocorre porque a matriz Jacobiana torna-se singular no PMC. Conforme foi visto no capítulo 3, a solução do fluxo de potência também depende das características comuns aos processos de solução de equações algébricas não-lineares, tais como da existência da solução, das múltiplas soluções existentes, do método utilizado na resolução, da estimativa inicial, etc. Assim, muito embora o uso de métodos de fluxo de potência convencionais possibilitem o cálculo de pontos de operação muito próximos ao PMC, sempre será necessário ponderar se os problemas de não convergência são devidos aos problemas numéricos ou a limitações físicas do sistema. Em geral, as diferenças não são óbvias.

O método de fluxo de potência continuado (FPC) possibilita a obtenção do PMC através da variação automática do valor do parâmetro (λ). As dificuldades numéricas são superadas pela adição de equações parametrizadas. A reformulação das equações de fluxo de potência visa remover a singularidade da matriz no PMC e, por conseguinte, eliminar os problemas numéricos que surgem em sua vizinhança. Dessa forma, possibilitam que algoritmos com precisão simples sejam usados tanto na vizinhança quanto no próprio PMC. Essa é a razão principal de sua ampla utilização para o traçado das curvas P-V (AJJARAPU e CHRISTY, 1992), (CHIANG *et al.*, 1995).

4.2 MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

O conjunto das equações de fluxo de potência, em sua forma mais geral, apresenta a seguinte forma:

$$G(V, \theta, \lambda) = 0, \quad (4.1)$$

onde V é o vetor das magnitudes de tensão nodais, θ é o vetor dos ângulos de fase nodais, λ é o fator de carregamento, e G é um vetor composto pelas equações dos balanços de potências ativa e reativa nodais. A equação (4.1) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \lambda P^{\text{esp}} - P(V, \theta) &= 0 \quad \text{para barras PQ e PV} \\ \lambda Q^{\text{esp}} - Q(V, \theta) &= 0 \quad \text{para barras PQ,} \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde $P^{\text{esp}} = P_{\text{gen}} - P_{\text{carga}}$ é a diferença entre as potências ativas geradas e consumidas para as barras de carga (PQ) e geração (PV), e $Q^{\text{esp}} = Q_{\text{gen}} - Q_{\text{carga}}$ é a diferença entre as potências reativas geradas e consumidas para as barras PQ. Para o caso base, o fator de carregamento é $\lambda=1$. Para uma barra k qualquer, $P(V, \theta)$ e $Q(V, \theta)$ serão dados por:

$$\begin{aligned} P_k(V, \theta) &= G_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \cos \theta_{kl} + b_{kl} \sin \theta_{kl}), k \in \text{PQ, PV} \\ Q_k(V, \theta) &= -B_k V_k^2 - V_k \sum_{l \in \Omega_k} V_l (g_{kl} \sin \theta_{kl} - b_{kl} \cos \theta_{kl}), k \in \text{PQ} \end{aligned} \quad (4.3)$$

onde Ω_k é o conjunto de todas as barras diretamente conectadas à barra k . $(G_k + jB_k)$ é o elemento da diagonal (k,k) da matriz admitância nodal, e $(g_{kl} + jb_{kl})$ corresponde à admitância série do ramo que conecta as barras k e l . O sistema de equações (4.2) pressupõe que o carregamento da rede é proporcional ao do caso base e considera o fator de potência constante. É também possível realizar uma variação de carregamento individual, isto é, para cada barra do sistema, considerando para cada uma, um crescimento de carga com fatores de potência diferentes dos casos base. Tradicionalmente, assume-se que o aumento de carga de uma

determinada área é feita com fator de potência constante e proporcional ao carregamento do caso base com modelo de carga de potência constante (WSCC, 1998).

Conforme já comentado, a resolução do sistema de equações (4.2) pelo método de *Newton-Raphson* convencional é feita através da especificação do valor do λ e subsequente resolução; neste caso, λ não é tratado como variável dependente. Entretanto, no procedimento utilizado pelos métodos da continuação em geral, λ é considerado como variável dependente e, portanto, variado automaticamente. Dessa forma, o sistema, cuja dimensão era $n = 2n_{PQ} + n_{PV}$, onde n_{PQ} e n_{PV} corresponde ao número de barras PQ e PV, respectivamente, passa a ter $n + 1$ incógnitas. A diferença entre os métodos da continuação está na forma de tratar esta nova variável e em como contornar a singularidade da matriz Jacobiana J . Para a obtenção de curvas P-V a adição de equações parametrizadas é um procedimento padrão (SEYDEL, 1994). A parametrização fornece uma forma de identificar cada solução ao longo da trajetória a ser obtida.

Entre os diversos métodos de fluxo de potência continuado descritos na literatura, o mais amplamente utilizado consiste em quatro elementos básicos:

- I) Um passo preditor;
- II) Um procedimento de parametrização;
- III) Um controle de passo;
- IV) Um passo corretor.

4.2.1 PREDITOR

Após encontrada a solução para o caso base ($\theta_0, V_0, \lambda_0 = 1$) do sistema de equações (4.2) pelo método convencional de fluxo de potência, o método da continuação é utilizado para calcular as soluções adicionais, até que o PMC seja alcançado. Primeiro é executado um passo

preditor para encontrar uma estimativa para a próxima solução. Entre as diversas técnicas de previsão diferentes encontradas na literatura o método da tangente (AJJARAPU e CHRISTY, 1992), (AJJARAPU e BATTULA, 1994) e o da secante (CHIANG et al., 1995), (CHIANG et al., 1999) são os mais populares. Nesse estudo utilizou-se somente o método preditor tangente.

A Figura 4.1 será usada aqui para ilustrar os passos do método da continuação com preditor tangente (AJJARAPU e CHRISTY, 1992), (AJJARAPU e BATTULA, 1994). Neste método, a estimativa da próxima solução pode ser encontrada dando um passo, de tamanho apropriadamente escolhido, na direção do vetor tangente à curva P-V calculado na solução atual.

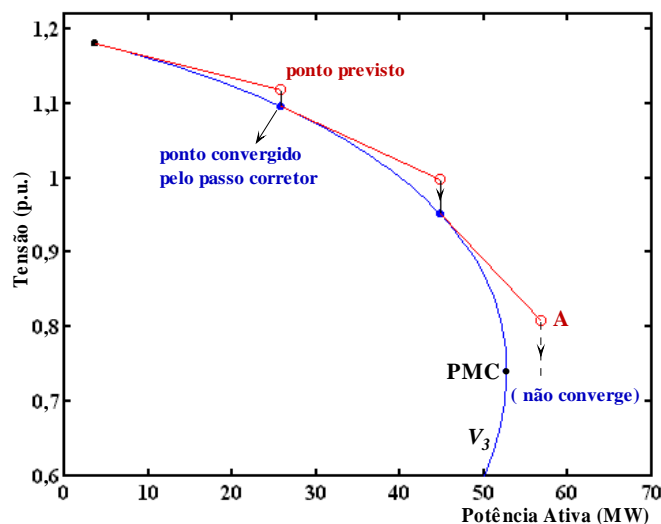


Figura 4.1 - Método da continuação com preditor tangente.

O cálculo do vetor tangente é obtido tomando a diferencial da equação (4.1), e que posto na forma matricial fornece:

$$[G_{\theta} \ G_V \ -G_{\lambda}] \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = [J \ -G_{\lambda}] t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

onde G_{θ} , G_V , e G_{λ} são as derivadas parciais de G em relação a θ , V , e λ , respectivamente. G_{θ} e G_V compõem a matriz J do fluxo de potência convencional. Acresce-se a J uma coluna ($-G_{\lambda}$)

correspondente a nova variável λ . O vetor t é chamado de vetor tangente e é o que se procura obter. Uma vez que na equação (4.4) o número de incógnitas é maior do que o número de equações, uma variável do vetor t deve ser especificada com um valor diferente de zero. Esta variável é denominada de parâmetro da continuação. Uma nova equação ($e_k \times t = t_k = \pm 1$) será acrescida a equação (4.4). Assim, passa a ter a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} G_\theta & G_V & -G_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_\theta & G_V & -G_\lambda \\ & e_k & \end{bmatrix} t = J_a t = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

onde e_k é um vetor linha apropriadamente dimensionado, com todos os elementos nulos exceto o k -ésimo, que é igual a ± 1 . A escolha do índice k é feita de forma que o vetor t tenha uma norma não nula e garanta que a matriz Jacobiana aumentada (J_a) seja não singular no PMC. A escolha do sinal $+$ ou $-$ dependerá de como a variável escolhida como parâmetro estará variando, positivo se ela estiver aumentando de valor, e negativo se estiver diminuindo. Uma vez obtido o vetor t , a estimativa para a próxima solução será dada por:

$$\begin{bmatrix} \theta^e \\ V^e \\ \lambda^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_j \\ V_j \\ \lambda_j \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\theta \\ dV \\ d\lambda \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

onde o sobrescrito “e” indica estimativa, isto é, o vetor tangente é usado para obter uma estimativa para θ , V , e λ a partir da solução atual (j). σ é um escalar que define o tamanho do passo preditor. O tamanho do passo deve ser tal que a solução prevista esteja dentro do raio de convergência do passo corretor (CHIANG *et al.*, 1995).

4.2.2 CONTROLE DO PASSO PREDITOR (σ)

O método da continuação para o traçado da curva P-V será mais eficiente quanto melhor for a estratégia usada no controle do passo preditor. A escolha do passo depende do sistema que está em estudo. Para sistema com baixo carregamento, uma variação de carga resultará numa pequena mudança no ponto de operação, e, portanto, o tamanho do passo pode ser maior. Já em sistemas altamente carregados, uma pequena variação na carga resulta em grandes variações do ponto de operação e, neste caso, o tamanho do passo deve ser menor.

Um dos métodos mais simples para o controle de passo é baseado no número de iterações do passo corretor (SEYDEL, 1994). Se esse número for pequeno, considera-se que a carga ainda é leve ou normal e o passo pode ser maior. Se o número de iterações aumentar, considera-se que o sistema estará numa região de carga alta, e o tamanho do passo deverá ser reduzido. Porém esse procedimento não é considerado adequado, próximo ao ponto de operação o número de iterações pode ser maior devido a atuação de diversos limites operacionais de equipamentos, como por exemplo os *taps* de transformadores.

Uma opção interessante é o uso da tensão (V_k) como parâmetro durante todo o traçado da curva P-V, pois isso acarretará em um controle automático do passo de λ . Isso ocorre porque um passo fixo na tensão corresponderá a passos grandes na variação do λ para carga leve ou normal, onde a tensão varia pouco, e em passos reduzidos para altos carregamentos.

Outro método de controle do tamanho do passo é baseado no vetor tangente normalizado (ZAMBRONI *et al*, 1997). O tamanho do passo é definido como:

$$\sigma = \sigma^0 / \|t\|_2 \quad (4.7)$$

onde $\|t\|_2$ é a norma Euclidiana do vetor tangente $[d\theta \ dV \ d\lambda]^T$, e σ^0 é um escalar predefinido. Conforme o sistema torna-se carregado, a magnitude do vetor tangente aumenta e σ diminui. A eficiência do processo depende da boa escolha de σ^0 . Seu valor dependerá do sistema. Entretanto, em (CAÑIZARES e ALVARADO, 1993) alcançou-se bons resultados para sistemas de vários tamanhos assumindo $\sigma^0=1$, juntamente com a redução de passo quando limites são atingidos ou ocorrem problemas de convergência.

4.2.3 PASSO CORRETOR E PARAMETRIZAÇÃO

Conforme se observa na Figura 4.1 a solução prevista não é a solução correta, assim, depois da previsão feita, torna-se necessário realizar a correção da solução aproximada para obter a solução correta, evitando assim que o erro se acumule. Quanto mais próxima a solução prevista estiver da correta, menor será o número de iterações necessárias para alcançar a próxima solução dentro da precisão desejada. Neste passo uma equação do tipo $y - y^e = 0$, onde y e y^e correspondem à variável escolhida como parâmetro de continuação e seu respectivo valor estimado, obtido pelo passo preditor, é acrescentada à equação (4.1). Assim, o sistema de equações da etapa de correção passa a ser:

$$\begin{aligned} G(V, \theta, \lambda) &= 0 \\ y - y^e &= 0, \end{aligned} \tag{4.8}$$

O método de *Newton-Raphson* é o mais utilizado para o passo corretor, mas outros métodos numéricos também podem ser utilizados. O número de iterações necessárias nesta etapa é, em geral muito pequeno. Geralmente, são necessárias apenas duas iterações para uma tolerância de 10^{-5} . No caso do uso de λ como parâmetro, a matriz J_a será singular no PMC, assim, para que o método não divirja, o passo terá que ser reduzido a medida que os pontos se aproximam do PMC (ALVES *et al*, 2002). Uma forma de contornar esse problema é usar em

ambos os passos, preditor e corretor, uma técnica muito simples conhecida por parametrização local, que consiste na troca de parâmetro próximo do PMC. Na técnica do vetor tangente, a variável escolhida é aquela que apresentar a maior variação, sendo que λ passa a ser tratada como variável dependente, enquanto a variável escolhida passa a ser o novo parâmetro p , do conjunto de $n+1$ variáveis (AJJARAPU e CHRISTY, 1992). O novo parâmetro será dado por:

$$p \leftarrow \max\{|t_1|, |t_2|, \dots, |t_{n+1}|\} \quad (4.9)$$

4.2.4 INTERFACE GRÁFICA PARA O FLUXO DE POTÊNCIA CONTINUADO

Os dois métodos de FPC disponibilizados são baseados no equacionamento apresentado na seção 4.2: parametrizado por λ e por magnitude de tensão de uma barra k qualquer (V_k). Ambos utilizam o preditor tangente. Na Figura 4.2 pode-se ver a janela inicial do programa de fluxo de potência continuado com as suas respectivas opções de comando:

- *Caso Base*: apresenta a curva P-V da barra crítica do sistema escolhido.
- *Executar*: possibilita a execução do FPC e a plotagem da curva P-V por completo;
- *Executar por Ponto*: permite a execução do FPC e a plotagem da curva P-V ponto a ponto. Essa opção é utilizada, p. ex., quando se deseja acompanhar o desempenho do FPC durante o traçado da curva P-V;
- *Plotar Curvas PVs*: permite plotar a curva P-V de qualquer uma das barras do sistema escolhido. Observa-se que esta opção só é habilitada após a execução do FPC;
- *Limpar*: esta opção possibilita limpar a tela antes que uma nova curva P-V seja plotada;
- *Relatório*: permite a visualização e impressão dos relatórios e do diagrama unifilar com todas as tensões e ângulos, conforme apresentados no capítulo 3, para o PMC;

- *Alterações na Rede*: permite alteração de parâmetros ou a retirada de uma linha do sistema escolhido através do diagrama unifilar do sistema, antes da execução de um novo FPC;
- *Contingência Total*: simula a retirada individual de cada uma das linhas de transmissão e realiza automaticamente o ranqueamento das dez piores contingências de acordo com a margem de estabilidade;
- *Curva QV*: chama a caixa de diálogo para se efetuar o traçado das curvas Q-V;
- *Análise QV*: chama a caixa de diálogo para efetuar análise Q-V.

Como exemplo é mostrado na Figura 4.2 a curva P-V para a barra crítica do sistema IEEE-30. O gráfico foi obtido através do FPC considerando a magnitude da tensão da barra 30 como parâmetro da continuação, partindo do caso base ($\lambda = 1$) e adotando $\sigma = 0,2$. Observa-se que para todos os testes realizados, a tolerância adotada para os desbalanços de potência é igual a 10^{-4} p.u.. Após o traçado da curva P-V, fornece-se os valores da magnitude (0,60 p.u.) e fase da tensão ($-43,8^\circ$) correspondente ao PMC ($\lambda=1,5410$), bem como a margem de carregamento (MC=0,5410) com relação ao ponto de operação inicialmente escolhido (no caso, $\lambda=1,0$). Após o traçado da curva, pode-se visualizar ou imprimir, para o PMC em particular, os relatórios e o diagrama unifilar com todas as tensões e ângulos, conforme apresentados no capítulo 3. Além desses, serão mostrados alguns outros relatórios que podem ser gerados pelo programa.

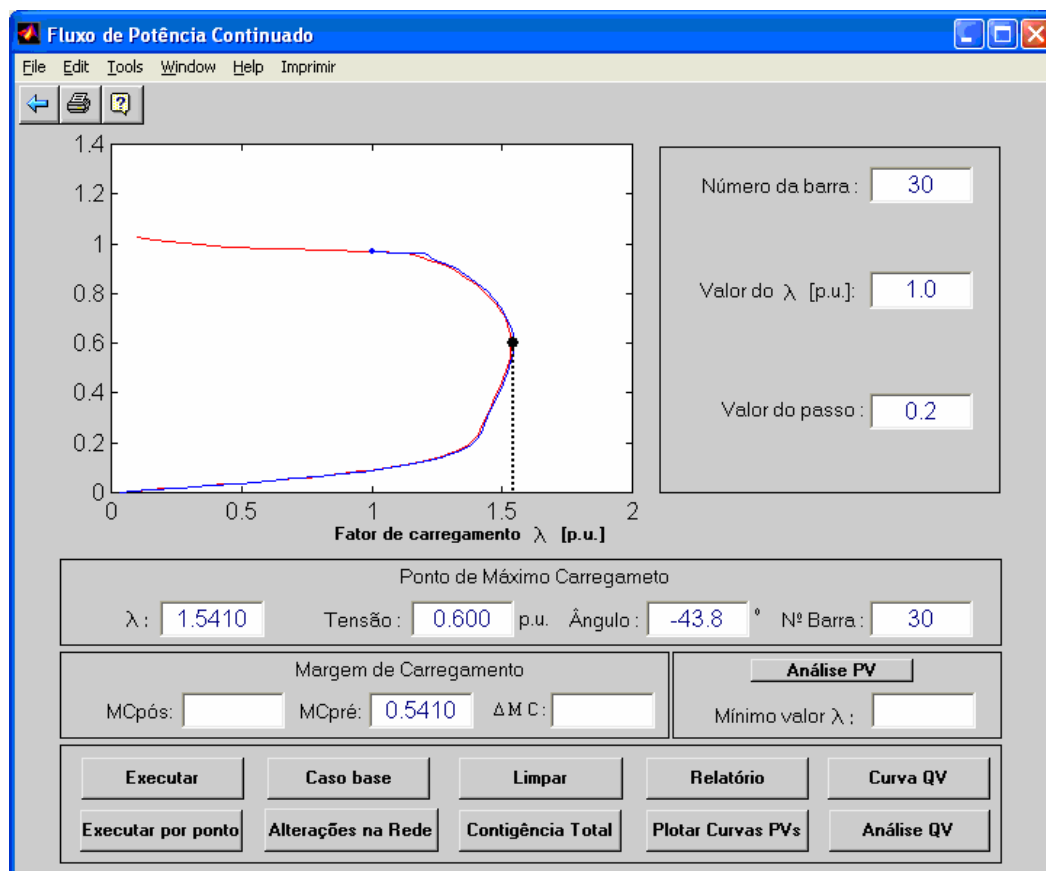


Figura 4.2 – Caixa de diálogo do FPC apresentando a curva P-V para a barra crítica (barra 30) do sistema IEEE-30 barras.

Na Figura 4.3 apresenta-se o **Relatório do FPC** para a rede IEEE 30 barras onde se pode ver todos os valores do fator de carregamento (λ), magnitude e ângulos das tensões calculados durante o traçado da referida curva P-V, e em particular, para o PMC. A Figura 4.4 apresenta o **Relatório de Fluxo de Potência**, que apresenta todos os dados de barras tais como magnitude e ângulo da tensão, potência ativa e reativa injetada e consumida e de fluxo nas linhas de transmissão e nos transformadores, para o ponto máximo de carregamento (PMC).

[RELATÓRIO DO FFC]

=====

[FLUXO DE POTÊNCIA DA ÁREA 1 DO SISTEMA DO IEEE 30 BARRAS]

=====

Barra 30

[PARÂMETRO DA CONTINUAÇÃO: MAGNITUDE DE TENSÃO]

=====

Ponto Máximo de Carregameto

Fator de Carregamento 1.541033 Tensão 0.600108 p.u. Ângulo -43.8340183 graus

=====

Fator de Carregamento	Tensão [p.u.]	Ângulo [graus]
1.053544	0.966057	-19.685041
1.106871	0.964231	-20.747609
1.144381	0.962567	-21.507718
1.188529	0.949210	-22.480643
1.231116	0.935550	-23.463584
1.272046	0.921584	-24.456641
1.303770	0.907312	-25.360726
1.329560	0.891326	-26.268029
1.353858	0.875219	-27.185347
1.376660	0.858992	-28.113119
1.397961	0.842648	-29.051834
1.417760	0.826186	-30.002036
1.436055	0.809607	-30.964333
1.452851	0.792911	-31.939405
1.468150	0.776095	-32.928020
1.481959	0.759159	-33.931048
1.494286	0.742098	-34.949475
1.505141	0.724909	-35.984434
1.514535	0.707584	-37.037223
1.522482	0.690116	-38.109349
1.528996	0.672493	-39.202565
1.534091	0.654701	-40.318936
1.537785	0.636723	-41.460907
1.540094	0.618535	-42.631414
1.541033	0.600108	-43.834018
1.540619	0.581404	-45.073105
1.538864	0.562374	-46.354164
1.535780	0.542953	-47.684198
1.531373	0.523054	-49.072355
1.525641	0.502559	-50.530920
1.518573	0.481301	-52.076948

Figura 4.3 - Relatório do Fluxo de Potência Continuado, correspondente ao traçado da curva P-V do sistema IEEE-30 barras.

Relatorio de Fluxo de Potencia PMC.m - Bloco de notas						
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda						
[FLUXO DE POTÊNCIA DA ÁREA 1 DO SISTEMA DO IEEE 30 BARRAS]						
[Método da Continuação]						
[PMC do Caso Base]						
[FLUXO DE POTÊNCIA DA ÁREA 1]						
---DADOS DA BARRA---			---FLUXOS NAS LINHA---			
NO.			NO.	MW	MVAR	
1	Tensão	1.060	0.000	2	159.092	96.542
	GERAÇÃO	460.086	308.685	2	159.092	96.542
	CARGA	0.000	0.000	3	141.902	115.602
2	Tensão	1.045	-5.520	1	-146.853	-70.112
	GERAÇÃO	28.162	50.000	1	-146.853	-70.112
	CARGA	0.000	12.700	4	77.379	45.824
				5	139.324	65.240
3	Tensão	1.027	-8.043	1	-128.211	-63.159
	GERAÇÃO	0.000	0.000	4	124.517	61.312
	CARGA	3.693	1.200			
4	Tensão	1.020	-9.704	2	-71.608	-30.826
	GERAÇÃO	0.000	0.000	3	-120.708	-50.905
	CARGA	11.696	1.600	6	112.019	40.847
				12	68.602	38.422
5	Tensão	1.010	-14.362	2	-125.446	-9.757
	GERAÇÃO	0.000	40.000	7	-19.519	20.518
	CARGA	144.965	19.000			
6	Tensão	1.013	-11.407	2	-94.585	-30.036
	GERAÇÃO	0.000	0.000	4	-109.165	-31.430
	CARGA	0.000	0.000	7	56.922	1.024
				8	46.298	9.679
				9	45.081	17.895
				10	25.022	14.773
7	Tensão	1.004	-13.146	5	20.225	-19.806
	GERAÇÃO	0.000	0.000	6	-55.312	3.032
	CARGA	35.087	10.900			
8	Tensão	1.010	-12.116	6	-45.797	-8.403
	GERAÇÃO	0.000	0.000	28	-0.370	2.236
	CARGA	46.167	30.000			
9	Tensão	1.003	-14.856	6	-45.081	-9.680
	GERAÇÃO	0.000	0.000	11	0.000	-22.111
	CARGA	0.000	0.000	10	45.081	31.791
10	Tensão	1.000	-16.616	6	-25.022	-6.892
	GERAÇÃO	0.000	0.000	20	14.710	6.274
	CARGA	8.926	2.000	17	8.951	6.250
	CAP/REAT		19.000	21	12.622	8.792
				21	12.622	8.792
				22	12.271	8.306
11	TENSÃO	1.051	-14.856	9	0.000	24.000
	GERAÇÃO	0.000	24.000			
	CARGA	0.000	0.000			
12	Tensão	1.000	-15.844	14	12.511	4.879
	GERAÇÃO	0.000	0.000	15	28.148	14.188
	CARGA	17.236	7.500	16	10.707	6.387
				4	-68.602	-14.367
13	TENSÃO	1.033	-15.844	13	-0.000	-22.629
	GERAÇÃO	0.000	24.000			
	CARGA	0.000	0.000	12	0.000	24.000
14	Tensão	0.986	-16.808	12	-12.087	-3.997
	GERAÇÃO	0.000	0.000	15	2.545	1.534
	CARGA	9.541	1.600			

15				12	-26.890	-11.710
	Tensão	0.983	-16.924	14	-2.504	-1.497
	GERAÇÃO	0.000	0.000	18	9.077	3.262
	CARGA	12.619	2.500	23	7.697	6.097

16				12	-10.426	-5.796
	Tensão	0.992	-16.484	17	5.040	3.026
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	5.386	1.800			

17				16	-4.981	-2.887
	Tensão	0.992	-16.807	10	-8.870	-6.039
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	13.850	5.800			

18				15	-8.858	-2.813
	Tensão	0.977	-17.585	19	3.933	1.428
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	4.925	0.900			

19				18	-3.906	-1.374
	Tensão	0.976	-17.764	20	-10.713	-3.858
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	14.620	3.400			

20				19	10.820	4.072
	Tensão	0.981	-17.541	10	-14.206	-5.149
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	3.386	0.700			

21				10	-12.276	-8.046
	Tensão	0.987	-17.094	10	-12.276	-8.046
	GERAÇÃO	0.000	0.000	22	-2.379	-1.143
	CARGA	26.931	11.200			

22				10	-11.935	-7.613
	Tensão	0.988	-17.077	21	2.381	1.147
	GERAÇÃO	0.000	0.000	24	9.554	6.466
	CARGA	0.000	0.000			

23				15	-7.484	-5.667
	Tensão	0.977	-17.323	24	2.560	3.204
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	4.925	1.600			

24				22	-9.201	-5.917
	Tensão	0.978	-17.468	23	-2.506	-3.095
	GERAÇÃO	0.000	0.000	25	-1.682	0.377
	CARGA	13.389	6.700			
	CAP/REAT		4.113			

25				24	1.696	-0.352
	Tensão	0.986	-16.991	27	-7.396	-3.655
	GERAÇÃO	0.000	0.000	26	5.700	4.008
	CARGA	0.000	0.000			

26				25	-5.386	-3.539
	TENSÃO	0.968	-17.438			
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	5.386	2.300			

27				25	7.584	4.016
	Tensão	1.000	-16.411	28	-29.646	-12.201
	GERAÇÃO	0.000	0.000	29	10.240	3.937
	CARGA	0.000	0.000	30	11.821	4.248

28				27	29.646	21.747
	Tensão	1.007	-12.041	8	0.384	-4.386
	GERAÇÃO	0.000	0.000	6	-30.030	-17.362
	CARGA	0.000	0.000			

29				27	-9.620	-2.764
	Tensão	0.980	-17.700	30	5.927	1.379
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	3.693	0.900			

30				27	-10.636	-2.018
	Tensão	0.968	-18.627	29	-5.676	-0.906
	GERAÇÃO	0.000	0.000			
	CARGA	16.312	1.900			

Figura 4.4 – Relatório de Fluxo de Potência para o PMC do caso base do sistema IEEE-30 barras.

As Figuras 4.5(a) e (b) apresentam, respectivamente, o gráfico de barra e o perfil das tensões correspondentes ao PMC do sistema IEEE-30 barras, obtidas pelo FPC usando a magnitude de tensão da barra 30 (V_{30}) como parâmetro da continuação.

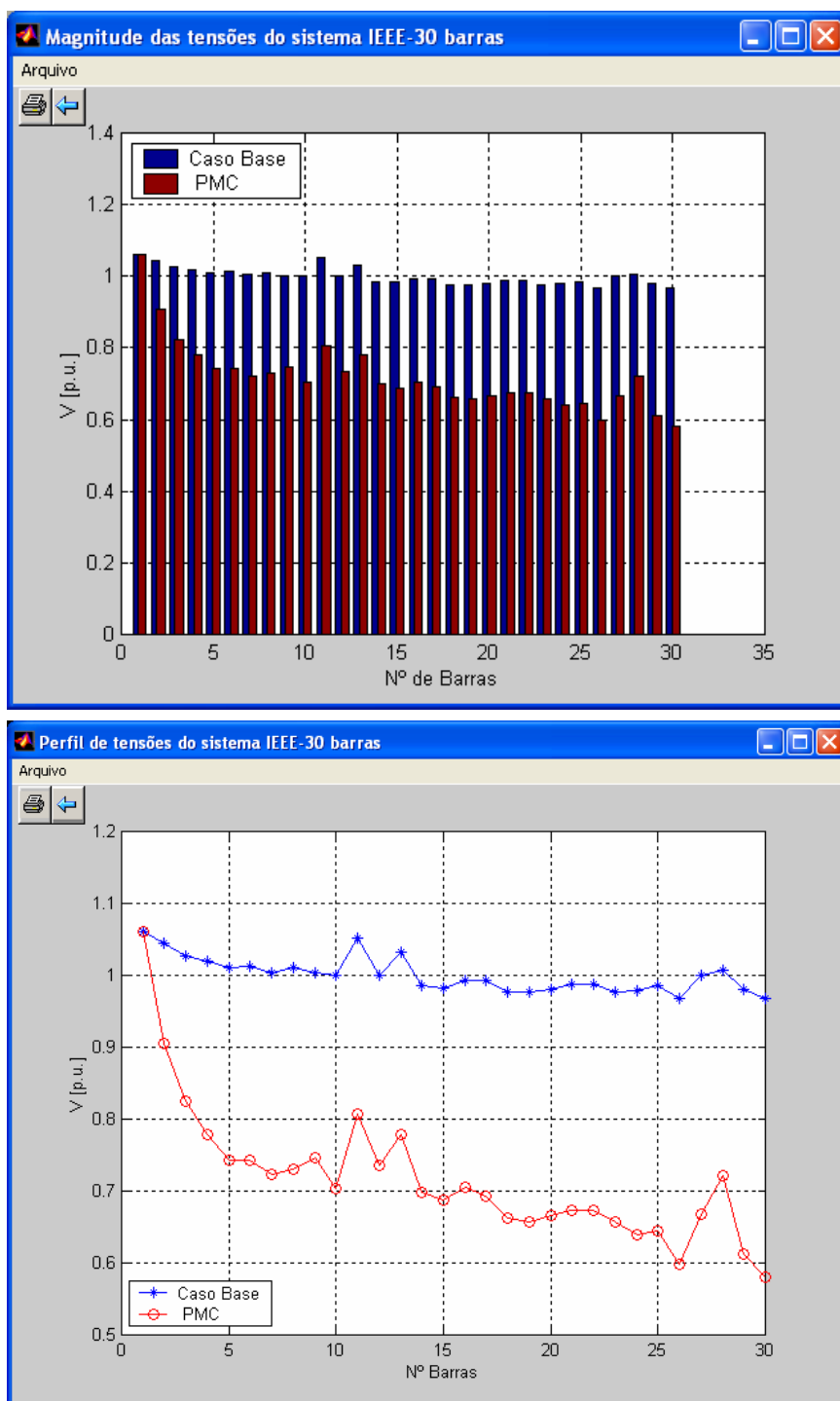


Figura 4.5 – (a) Gráfico de barra e (b) perfil de tensão correspondentes ao PMC do sistema IEEE-30 barras.

Na Figura 4.6 apresenta-se o diagrama unifilar do sistema IEEE de 30 barras com todos os ângulos e tensões correspondentes ao PMC, também obtidas pelo FPC usando a

4.3 ANÁLISE DE CONTINGÊNCIA DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

As ações de controle efetuadas durante a operação em tempo-real de um sistema elétrico de potência (SEP) não devem somente objetivar um melhor aproveitamento dos recursos de geração e de capacidade de transmissão, mas também devem evitar que o sistema seja levado a operar próximo a uma condição crítica onde, por exemplo, um pequeno aumento de carga ou uma contingência possa causar o colapso de tensão. Assim, nas etapas de planejamento e operação de um SEP, devem ser definidas as margens de estabilidade de tensão e as ações de controle necessárias, não só para as condições normais de operação (caso base), mas também para as diferentes condições de contingência.

Em termos de aumento de carga (ver Figura 4.7), a margem de carregamento (MC) definida como a diferença entre o ponto de operação de pré-contingência (ponto P) e o ponto de máximo carregamento de pós-contingência (PMCPós), é utilizada como índice para a análise de estabilidade de tensão (IEEE-PSSC, 1999). O *Western Systems Coordinating Council* (e que abrange 86 sistemas membros da região oeste da América do Norte – Canadá, México e Estados Unidos) requer que seus membros garantam pelo menos 5% de margem de potência ativa em qualquer situação de contingência simples (WSCC, 1998). Essa política também tem sido recomendada pelas empresas do setor elétrico nacional (FTCT, 1999). O manual de procedimentos de redes do Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS) sugere como critério para o planejamento da expansão, que a margem de estabilidade de tensão seja maior ou igual a 6%, para as situações de contingências simples, e não determina critérios para casos de contingências múltiplas (ONS, 2002).

A avaliação da estabilidade de tensão através do traçado de curvas P-V e Q-V para cada contingência e várias condições operativas é baseada em métodos de análise estática (TAYLOR, 1994). O levantamento de ambas as curvas, P-V e Q-V, é a metodologia recomendada pelo WSCC (WSCC, 1998) para assegurar que a margem mínima requerida seja atendida. Já o ONS, considera o traçado da curva P-V como a metodologia mais apropriada para a determinação da margem de estabilidade, e o levantamento da curva Q-V como uma metodologia complementar para avaliar as margens de potência reativa e os locais para o reforço do sistema (ONS, 2002).

A Figura 4.7 é utilizada para exemplificar os possíveis problemas que podem surgir durante a análise de contingência de linhas de transmissão (LT). A convergência do FPC dependerá da contingência e do parâmetro adotado na etapa de parametrização. A figura apresenta quatro curvas P-V do sistema IEEE 14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das LT entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da LT entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência das duas LT entre as barras 1 e 2. Nesta figura pode-se observar melhor algumas das prováveis dificuldades que podem surgir quando do uso dos fluxos de potência e FPC para análise de contingências. Considere por exemplo o ponto P na curva de pré-contingência, como sendo o ponto de operação do caso base. De acordo com a definição da MC, o sistema apresenta neste caso uma MC positiva ($MC > 0$).

Três contingências são apresentadas, uma em que o sistema permanecerá operando com uma MC positiva (curva 2), e outras duas em que a MC será negativa (curva 3 e 4). Se o carregamento (λ) do sistema for mantido fixo, e λ for adotado como parâmetro, no primeiro caso (curva 2) o sistema permanecerá estável e passará a operar no ponto A, enquanto que nos demais (curva 3 e 4), entrará em colapso porque não existirá solução factível para este carregamento; o FPC divergirá. O mesmo ocorrerá quando do uso do fluxo de potência convencional. Portanto,

nos casos em que a MC for negativa, será necessário estabelecer uma política para ações de controle, que podem incluir corte de carga a fim de que o sistema possa continuar em operação.

Utilizando o FPC parametrizado por λ , a determinação da MC só será possível para a curva 2. A determinação das demais MC não será possível. Por outro lado, no caso da utilização da tensão como parâmetro da continuação no FPC, os novos pontos de operação de pós-contingência seriam os pontos B, C, e D, respectivamente. Assim, a partir desses pontos a obtenção dos respectivos $PMC_{pós}$ e as correspondentes MC poderiam ser determinadas usando o FPC parametrizado por λ ou pela tensão.

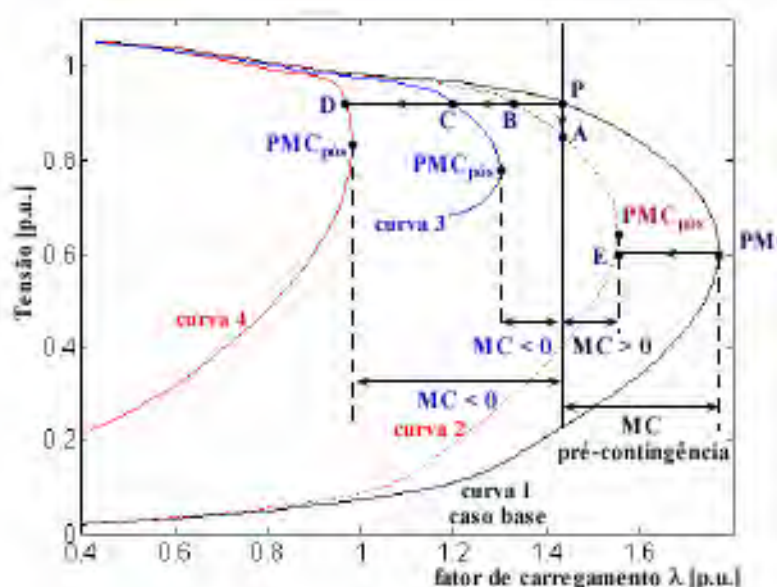


Figura 4.7. Curvas P-V para contingências de LT do sistema IEEE14 barras: curva 1, caso base; curva 2, contingência de uma das duas LT entre as barras 1 e 2; curva 3, contingência da LT entre as barras 2 e 3; curva 4, contingência de duas LT entre as barras 1 e 2.

Ao clicar na opção *Alterações na Rede* apresentada Figura 4.2, o diagrama unifilar do sistema é apresentado e a partir deste, o usuário poderá realizar as alterações desejadas na rede. Os possíveis procedimentos de alteração encontram-se descritos na seção 3.3.1.3 do capítulo 3. Em seguida à determinação da alteração, o usuário poderá traçar a curva P-V correspondente.

Como exemplo foi escolhido efetuar a retirada da LT situada entre as barras 2 e 5 do sistema IEEE-30 barras.

As curvas P-V de pré e de pós-contingência correspondentes podem ser vistas na Figura 4.8. Após a contingência verifica-se uma diminuição da margem de carregamento de 0,4065, o que corresponde a uma redução de 75,15% em relação à MC do caso base.

Na Figura 4.9 é mostrado o diagrama unifilar com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras correspondentes ao $PMC_{pós}$, para a contingência em questão. Comparando-o com o diagrama apresentado na Figura 4.6, pode-se constatar que a barra crítica passou a ser a barra 5 e não mais a 30, e que as magnitudes de tensão apresentam valores superiores aos da Figura 4.6 em consequência do menor carregamento do sistema.

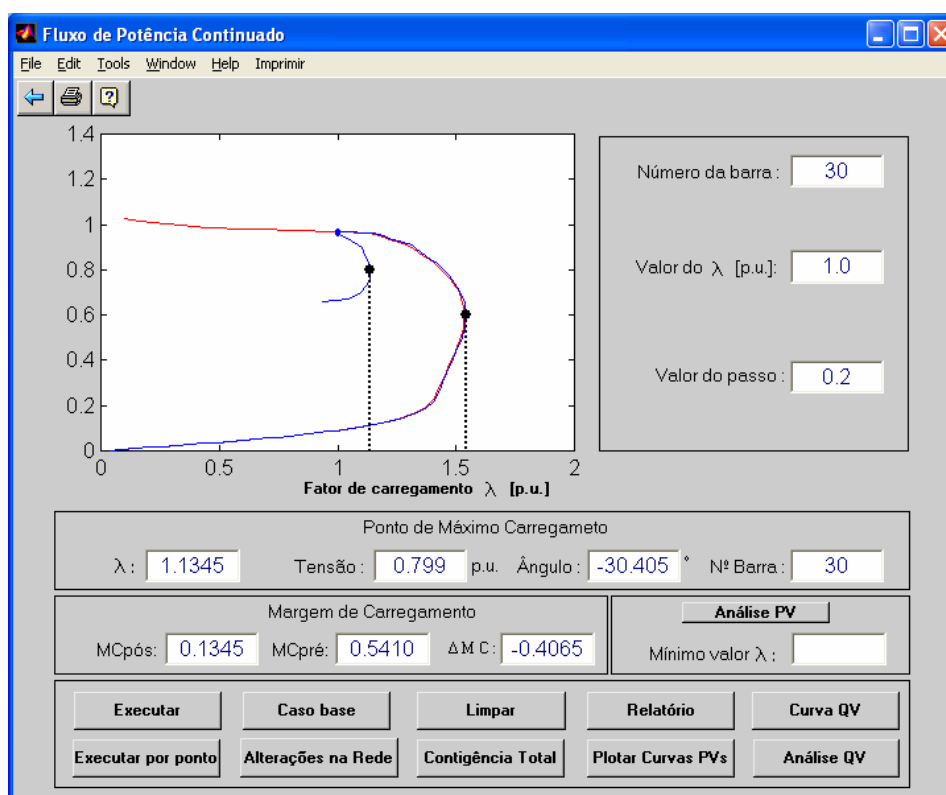


Figura 4.8 – Curvas P-V para o caso base e para a contingência de uma das duas LT entre as barras 2 e 5 do sistema IEEE-30 barras.

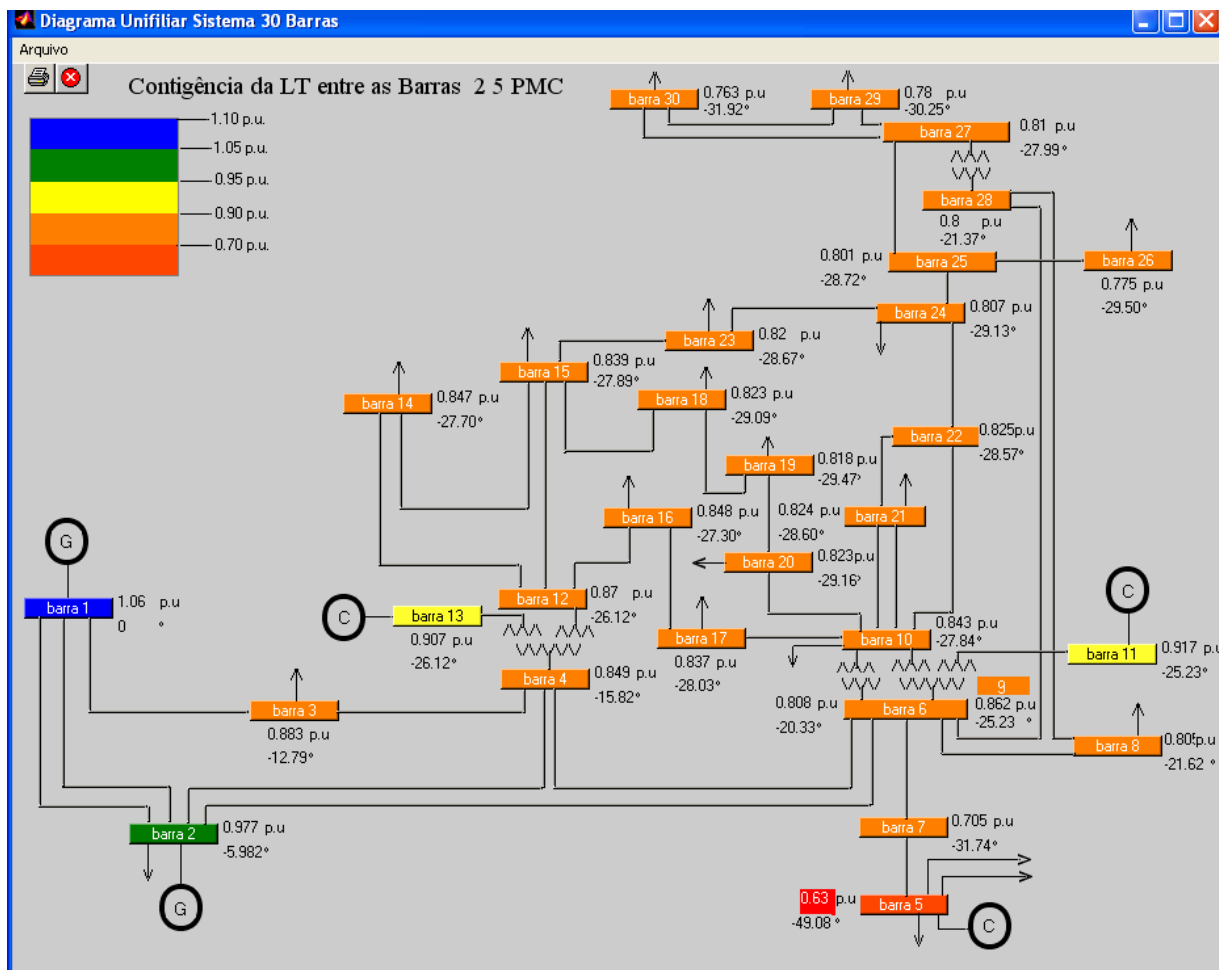


Figura 4.9 - Diagrama unifilar do sistema IEEE-30 barras com as magnitudes e os ângulos das tensões de barras correspondentes ao $PMC_{pós}$, obtidas pelo FPC utilizando V_{30} como parâmetro da continuação, para a contingência da LT situada entre as barras 2 e 5.

Uma outra opção disponível é a que permite efetuar automaticamente a contingência individual de todas as linhas de transmissão, bastando para isso clicar no botão *Contingência Total* apresentado na Figura 4.10. Após todas as contingências do sistema serem realizadas se faz um ranqueamento automático das dez piores; o resultado obtido para o sistema IEEE-30 barras é apresentado na Figura 4.11. Pode-se observar que a contingência simples que produz a maior redução na margem é a retirada da LT entre as barra 2 e 5. Na figura também se pode ver o resultado da retirada do segundo circuito situado entre as barras 1 e 2, ou seja no caso de uma contingência dupla, e que produziu a maior redução da margem.

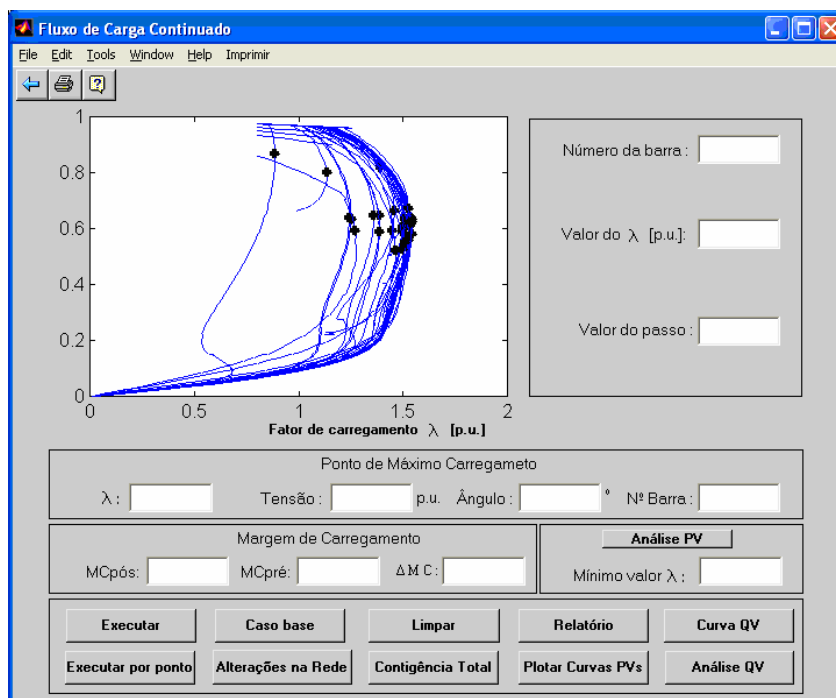


Figura 4.10 – Contingência de todas as linhas de transmissão do sistema IEEE-30 barras.

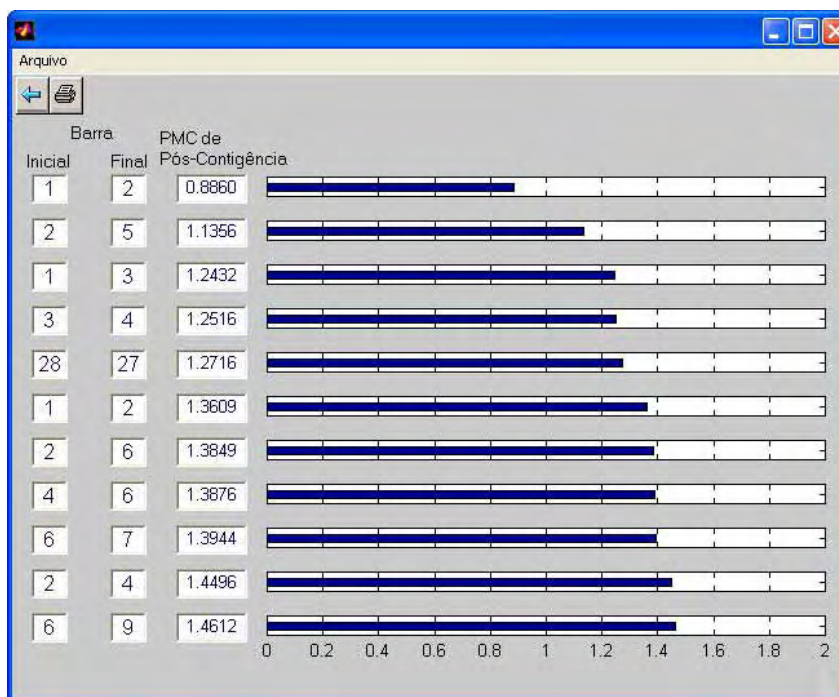


Figura 4.11 – As dez piores contingência do sistema IEEE-30 barras

4.4 CURVA Q-V

A curva Q-V expressa a relação entre o suporte de reativos disponível (ou necessário) em uma dada barra e a tensão dessa barra (TAYLOR, 1994); esta curva é utilizada para a identificação da margem de potência reativa de cada barra (em MVar), bem como para alocar e quantificar as necessidades de suporte de potência reativa do sistema. É considerado um dos métodos mais simples para se investigar a margem de estabilidade na análise estática de estabilidade de tensão.

Através de um fluxo de potência convencional, transforma-se o tipo da barra em estudo de PQ para PV, simulando a inclusão de um condensador síncrono na barra. Então, variando-se a tensão especificada para o compensador, calculam-se as injeções de reativos necessárias para suportar cada nível de tensão, obtendo-se os pares de pontos para o traçado da curva Q-V, conforme se pode ver na Figura 4.12. Na figura é mostrada também a margem de reativos disponível na barra em questão. A margem de reativos é a diferença entre a potência reativa de saída nula do condensador síncrono e a potência de saída do mesmo na base da curva Q-V, que representa o limite de estabilidade de tensão ($dQ/dV=0$). Estas curvas podem ser obtidas para um determinado ponto de operação nas condições de pré ou pós-contingência. Normalmente, as barras críticas são identificadas pelas menores margens de reativos. A principal vantagem deste método é que ele é simples e rápido para se determinar a margem reativa em barras críticas. No entanto, ele envolve várias limitações, dentre as quais o fato de estressar a capacidade de atendimento do sistema em apenas uma barra. Isto pode deturpar as condições de estabilidade do sistema, levando a resultados enganosos (KUNDUR, 1993).

Na Figura 4.13 é apresentada a janela inicial para a análise através do emprego da curva Q-V com os seus respectivos opções de comando:

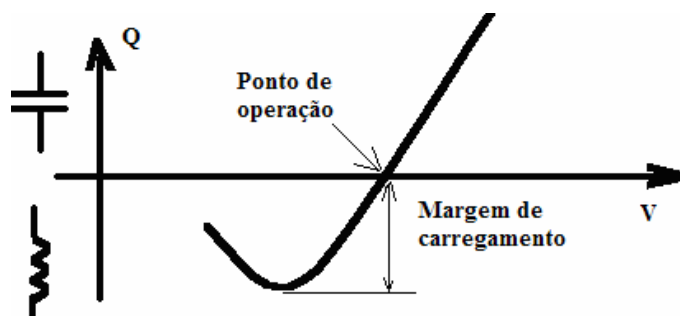


Figura 4.12 – Curva Q-V.

- *Executar* - possibilita a execução do FPC e a plotagem da curva Q-V por completo;
- *Limpar* - esta opção possibilita limpar a tela antes que uma nova curva Q-V seja plotada;
- *Alteração na Rede* - permite alteração ou a retirada de uma linha do sistema escolhido através do diagrama unifilar do sistema, antes da execução de uma nova curva Q-V;
- *Inserir Banco* - permite alocar um banco de capacitor na barra escolhida objetivando o aumento da margem do sistema;
- *Sair* - permite sair da tela da Curva Q-V e retornando para a análise P-V.

Na mesma figura pode-se visualizar as curvas Q-V para três condições de carregamento do sistema IEEE-14 barras:

- a curva 1, $\lambda = 1$, descreve um caso estável. A interseção da curva Q-V com o eixo das abscissas corresponde ao ponto de operação do sistema sem compensação de reativos. A distância do ponto A ao eixo das abscissas, indica a margem de potência reativa associada à barra (no caso a 14) cuja curva foi traçada. Os pontos de operação à direita do ponto crítico, ponto A, para os quais um aumento de potência reativo leva a um aumento da magnitude da tensão, representam condições de operação estáveis, enquanto que os à esquerda são instáveis do ponto de vista de tensão, visto que um aumento de potência

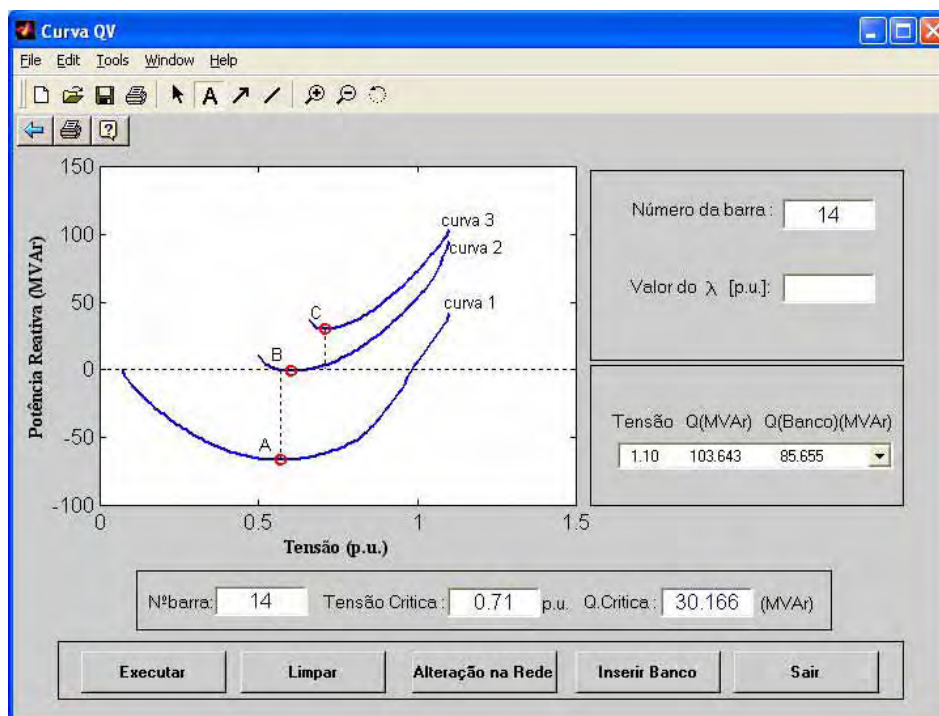


Figura 4.13 – Curvas Q-V do sistema IEEE-14 barras correspondentes à três condições de operação: curva 1 (caso base, $\lambda=1$), curva 2 (caso base PMC, $\lambda=1,77$), e curva 3 (caso base, $\lambda=1,9$) obtidas pelo FCC utilizando V_{14} como parâmetro da continuação.

reativa está associado a uma diminuição da magnitude da tensão;

- a curva 2, $\lambda = 1,77$ (correspondente ao PMC sem compensação de reativos). Observa-se que a barra não tem margem de potência reativa posto que a interseção com o eixo das abscissas (eixo da tensão) ocorre num único ponto, ponto B;
- a curva 3, $\lambda = 1,90$, ou seja, para um carregamento superior ao do PMC, mostra claramente que há uma deficiência de potência reativa na barra analisada.

Observa-se que à medida que o carregamento do sistema aumenta, a correspondente curva Q-V se desloca para cima. Na figura também pode ser visto o lugar geométrico dos pontos críticos. A base da curva Q-V (pontos A, B, e C) onde a dQ/dV é nula representa o limite de estabilidade de tensão, e também define o mínimo de potência reativa necessário para a operação estável. Destas curvas se verifica que a margem de reativos do sistema é positiva para a curva 1,

nula para a curva 2, e negativa para a curva 3. Assim, para o caso da curva 1, o sistema ainda pode aumentar sua potência ativa sem a necessidade de compensação local de potência reativa. Já para a condição operativa da curva 2, o sistema encontra-se no limite de máxima transferência de potência, com apenas um ponto de operação factível. Finalmente para a condição operativa da curva 3, todos os pontos se encontram acima do eixo das abscissas, ou seja, o sistema não possui nenhum ponto de operação factível para este nível de carregamento. Neste caso, a operação só poderá ser restabelecida se alguma forma de compensação de reativos for providenciada. Para fornecer a necessária compensação *shunt*, pode-se utilizar banco de capacitores ou compensadores estáticos. O uso de capacitores é atraente do ponto de vista econômico, especialmente quando o suporte de reativos necessário é muito grande. A utilização de compensadores estáticos tem-se tornado menos atraente com o advento da tecnologia de chaveamento de alta velocidade (0,15 a 0,75 segundos) de bancos de capacitores controlados por tiristores, os quais podem ser operados por meio de relés de subtensão (TAYLOR, 1994; CUTSEM, 1998).

Na Figura 4.14(a) pode-se ver a curva Q-V correspondente ao ponto de máximo carregamento, $\lambda = 1,77$, curva 5. Deseja-se especificar a potência reativa ($Q_{Co'}$) de um banco *shunt*, necessária para restabelecer o ponto de operação, ponto O', na tensão de 1,0 p.u.. Da figura verifica-se que o valor de $Q_{Co'}$ seria de 53,306 MVar. Com base neste valor pode-se calcular o valor da susceptância do banco pela fórmula $Q_{rc} = B_{rc}V^2$, muito embora isto seja desnecessário uma vez que o banco é especificado em função de sua potência e respectiva tensão de trabalho. Observa-se que o banco de capacitores não produz uma quantidade fixa de potência reativa, mas diminui com o quadrado da tensão. Esta é uma das desvantagens do uso de capacitores *shunt*. Esta característica deve ser levada em conta quando da especificação da margem de reativo

desejada. Na mesma figura foi traçada a respectiva curva característica deste banco, curva 4 (em pontilhado), e a correspondente curva Q-V após a inclusão do banco de capacitores de 53,306 MVar, curva 6. Para inserir o banco de capacitores basta acionar a opção *Inserir Banco* que abrirá a caixa de diálogo **Dados de Barras**, apresentada na Figura 4.14(b), por meio da qual o usuário poderá fornecer o valor desejado em MVar para o banco.

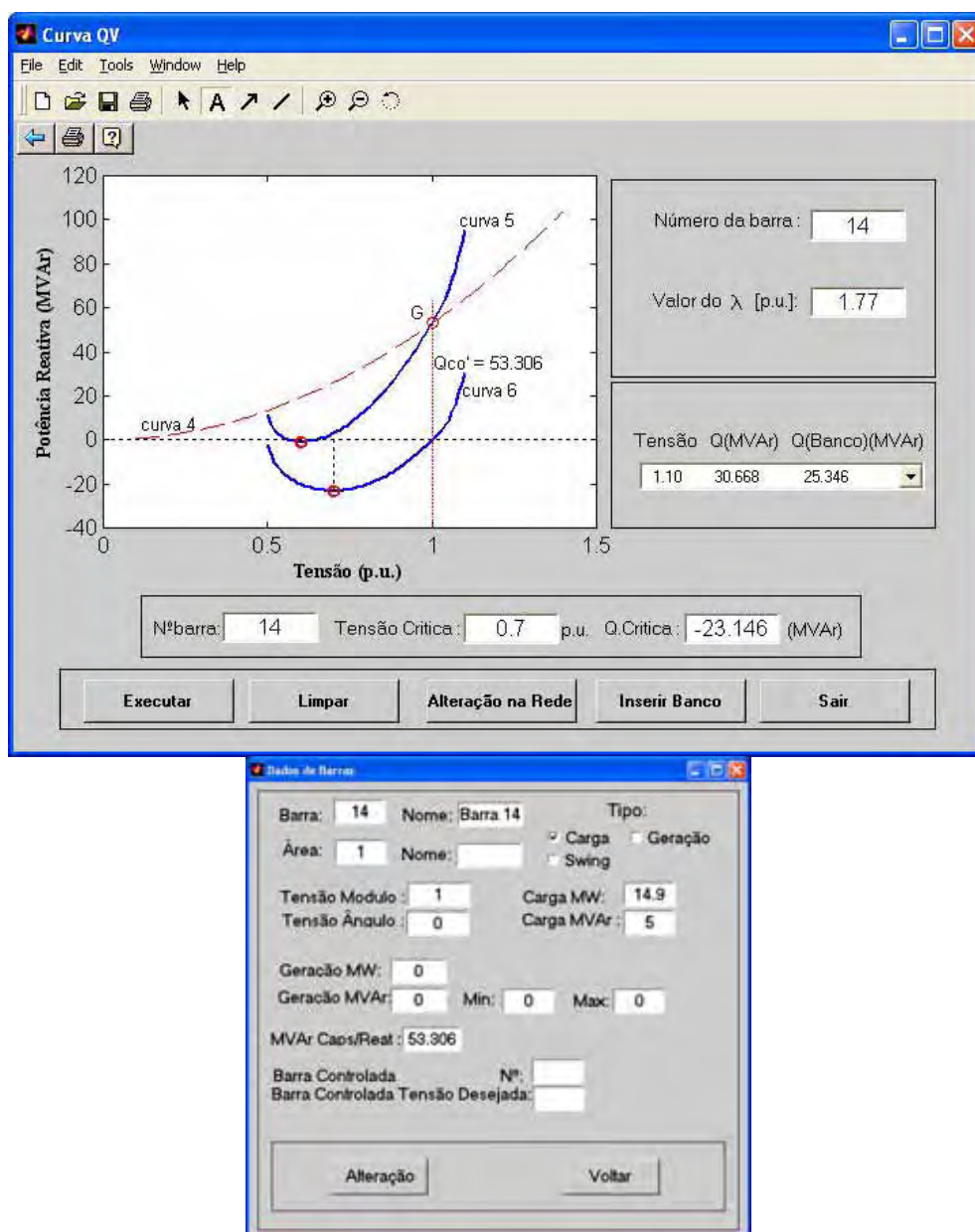


Figura 4.14 – (a) Curvas Q-V do sistema IEEE-14 barras correspondentes à duas condições de operação: curva 5 (caso base PMC, $\lambda=1,77$), curva 4 (curva característica do banco *shunt*) e curva 6 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) considerando um banco *shunt* de valor igual a 53,306 MVar; (b) caixa de diálogo **Dados de Barras**.

A Figura 4.15 mostra as respectivas curvas P-V da barra 14, curvas 7 e 8, ou seja sem e com a inclusão do banco de capacitores de 53,306 MVar. Observe que a inclusão do banco implicou num aumento de 0,12 p.u. na margem de carregamento do sistema.

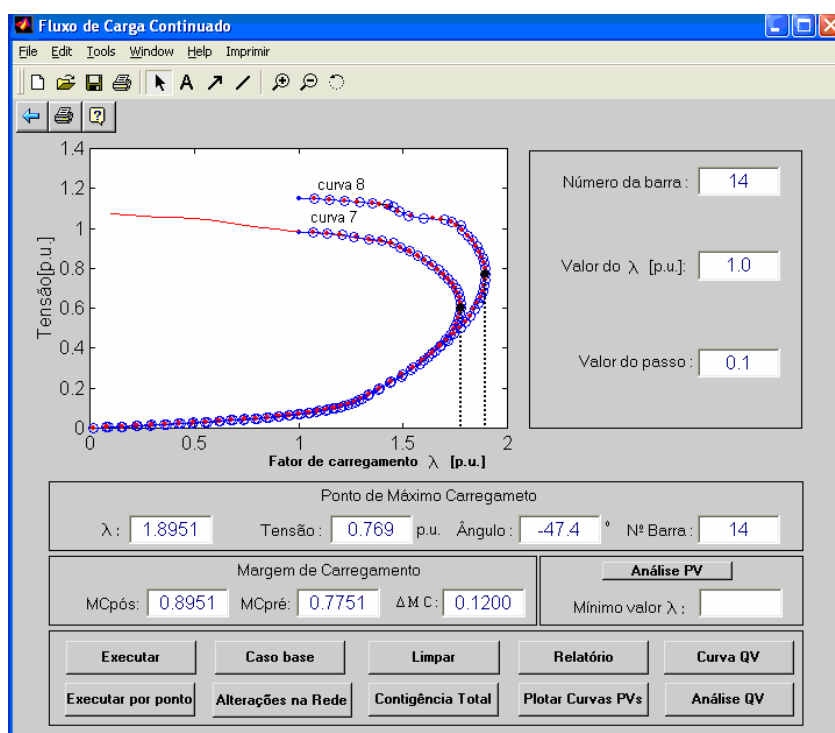


Figura 4.15 – Curvas P-V do sistema IEEE-14 barras correspondentes à duas condições de operação: curva 7 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) e curva 8 (caso base PMC, $\lambda=1,77$) considerando um banco *shunt* de valor igual a 53,306 MVar.

4.5 ANÁLISES Q-V E P-V

Os critérios de avaliação da estabilidade de tensão definidos pelo WSCC (WSCC, 1998), também recomendados pela FTCT (Força Tarefa “Colapso de Tensão”) (FTCT, 1999), são especificados em termos de margens mínimas de potência ativa (MC) e reativa (MR), e variam de acordo com quatro categorias de desempenho (A, B, C e D), vide Tabela 4.1. Para o nível A, $MC > 5\%$ e para o nível C (contingências duplas N-2), $MC > 2,5\%$. Recomenda-se a aplicação de ambas as metodologias P-V e Q-V para avaliar a margem e não apenas uma.

Tabela 4.1 – Critérios para estabelecimento de margem em estudos de estabilidade de tensão.

Nível de Desempenho	Distúrbio ^{(1),(2),(3)} iniciado por: Com ou sem falta; Distúrbio em CCAT	Margem ^{(4),(5),(6)} em MW (Método P-V)	Margem ^{(5),(6)} em MVar (Método Q-V)
A	Qualquer elemento: Gerador, circuito, transformador, fonte de reativos	$\geq 5 \%$	Cenário do pior caso ⁽⁷⁾
B	Seção do barramento	$\geq 2,5 \%$	50% da margem requerida no nível A
C	Qualquer combinação de dois ou mais elementos: LT + Gerador, LT + fonte de reativos, dois geradores, duas LT, bipólo CC, etc.	$\geq 2,5 \%$	50% da margem requerida no nível A
D	Qualquer combinação de três ou mais elementos: Subestação, usina, etc.	$\geq 0 \%$	$\geq 0 \%$

- (1) A tabela se aplica igualmente a sistemas com todos os elementos em serviço (normal) e a sistemas com um elemento removido (sob contingência simples: N - 1) e o sistema reajustado. Os ajustes do sistema, após a remoção de um elemento no caso base (para os níveis A - D), incluem todos os ajustes que podem ser realizados dentro de um período de 60 minutos para levar o sistema para a próxima condição de operação estável de regime posteriormente à remoção do elemento, por exemplo: redespacho da geração, ajustes de *taps* e de intercâmbios, etc.
- (2) Para aplicação destes critérios por membros pertencentes ao sistema, são permitidos esquemas de alívio de carga para se atender o nível A.
- (3) A margem para a condição do caso base deverá ser maior que a do desempenho de nível A.
- (4) O ponto de máxima operação no eixo P precisa ter uma margem igual ou maior que os valores da tabela, sendo medida da ponta do “nariz” da curva P-V para cada nível de desempenho.
- (5) As técnicas de análise pós-transitória devem ser utilizadas na aplicação dos critérios. Estudos deveriam ser conduzidos para se verificar se o sistema é transitoriamente e dinamicamente estável; este procedimento é importante para confirmar se nenhuma instabilidade de ângulo é a responsável pelo colapso de tensão.
- (6) Para determinar a margem requerida por seu sistema, cada membro do sistema deveria considerar, conforme apropriado, as incertezas tais como: cargas ativas e reativas maiores que a prevista, bem como variações nas características da carga especialmente nos fatores de potência da carga; reservas de potência reativa em tempo real que não estão disponíveis; limites de potência reativa nos geradores internos mais restritivos que o planejado; com relação aos sistemas vizinhos: restrições de potência reativa maiores que o planejado, saídas de elementos não rotineiramente estudadas, variações nos despachos; etc.
- (7) A barra com maior deficiência de reativo precisa ter uma margem adequada de potência reativa para a pior contingência simples de modo a satisfazer uma das seguintes condições (a que for pior): i – 5% de aumento além da máxima carga prevista; ii – 5% de aumento além do máximo intercâmbio permitido. A pior contingência é aquela que causa a maior diminuição na margem de potência reativa..

4.5.1 DETERMINAÇÃO DA MÍNIMA MARGEM DE POTÊNCIA REATIVA

Conforme especificado na Tabela 4.1, para a categoria de desempenho A, a mínima MR deve ser determinada para cada cenário do sistema em estudo encontrando a variação na MR para a barra crítica. Os passos para a sua determinação são:

1. Determine a pior contingência para o nível A (Isto é feito através de uma análise de contingência na pior condição operativa, p. ex., no pico de carga, Figuras 4.10 e 4.11).

2. Trace a curva Q-V para a pior contingência N-1 identificada.
3. Aumente o carregamento em 5% e trace a correspondente curva Q-V para a referida contingência.

A variação entre as margens das curvas Q-V (itens 2 e 3 acima) é o valor de margem de potência reativa que deveria ser providenciada de acordo com o critério acima. Esta é chamada de requisito de potência reativa e é determinado pela diferença entre o ponto mínimo da curva Q-V para o carregamento do caso base e o ponto mínimo da curva Q-V para o carregamento do caso base mais 5%, ambos os casos considerando a contingência N-1. A razão da aplicação desta margem é a de assegurar a reserva de reativo adequada que leva em conta as incertezas operacionais tais como uma carga maior do que a prevista.

A Figura 4.16 exemplifica o procedimento acima. As curvas Q-V apresentadas nesta figura correspondem a pior contingência N-1 do sistema IEEE-30, ver Figura 4.11, e que corresponde a contingência da LT localizada entre as barras 2 e 5. A curva 1 é a curva Q-V para o caso base sem contingência (N-0) e mostra uma MR de 31,26 MVar. A curva 2 é a curva Q-V para a contingência N-1 e, como se pode ver na figura, apresenta uma MR de 24,63 MVar, o que implica que na pior condição operativa o sistema deverá dispor de 6,63 MVar de reserva de potência reativa para suportar esta contingência. Considerando agora a contingência N-1 e um aumento de 5% no carregamento para levar em conta as incertezas de previsão de carga, curva 3, se verifica uma margem de 20,75 MVar, ou seja, uma redução extra de 3,88 MVar. Assim o sistema deverá dispor de um total de 10,51 MVar (6,63+3,88) para suportar esta contingência e atender o critério definido pelo WSCC. Observe que o ponto de mínimo das três curvas Q-V estão abaixo do eixo horizontal e, portanto, todas as margens de reativos são positivas, ou seja, para essa contingência, o sistema atende o critério de estabilidade definido pelo WSCC.

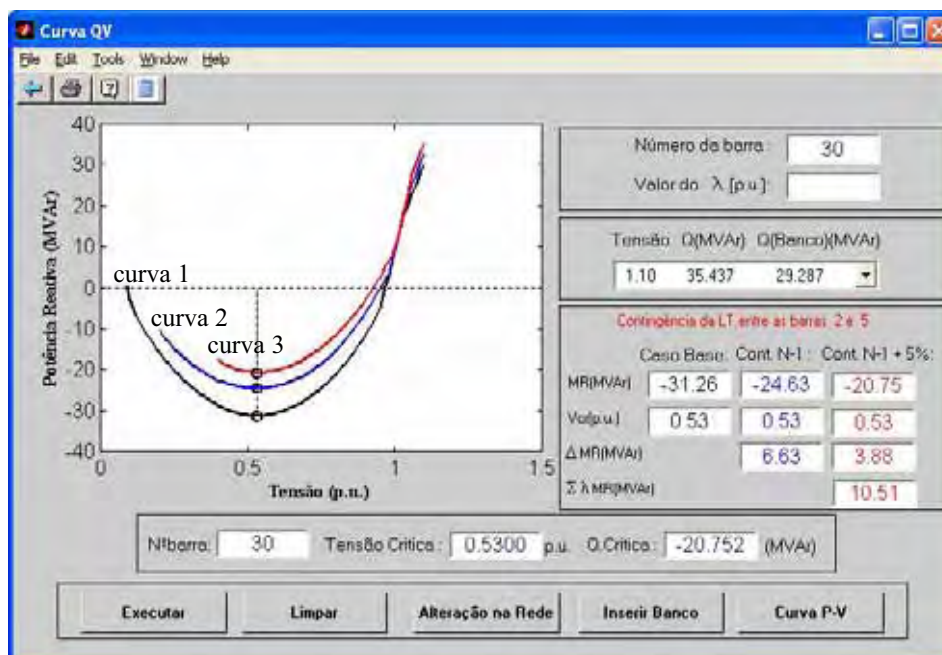


Figura 4.16 – Curvas Q-V correspondentes à pior contingência N-1 do sistema IEEE-30 barras: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-1 (caso base, $\lambda=1,0$); e curva 3, contingência N-1 considerando o carregamento do caso base + 5% ($\lambda=1,05$).

A Figura 4.17 apresenta as curvas Q-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras, e que corresponde a contingência das duas LT's localizadas entre as barras 1 e 2. De acordo com a Tabela 4.1 esse evento se enquadraria na categoria C e não há a necessidade de determinar a MR, apenas verificar se a margem é igual ou superior a 50% da margem requerida na categoria A. Entretanto, como para o IEEE-14 barras nenhuma contingência N-1 de LT resultou em uma MR negativa, considerou-se essa contingência apenas com o objetivo de ilustrar os efeitos da inserção de um banco de capacitores visando o atendimento do critério definido pelo WSCC. Além disso, é prática comum nas empresas considerar a perda de ambos os circuitos de um circuito duplo, ou de um corredor comum, como sendo uma contingência simples, quando do planejamento de potência reativa (CIGRE STUDY COMMITTEE 38, 1989); (TAYLOR, 1994). Na Figura 4.17, a curva 1 é a curva Q-V para o caso base sem contingência (N-0) e mostra uma MR de 66,59 MVar. A curva 2 é a curva Q-V para a contingência N-2 e apresenta um déficit de 7,84 MVar, ou seja, nesta condição operativa o

sistema não dispõe de potência reativa suficiente para suportar a contingência. Considerando agora a contingência N-2 e um aumento de 5% no carregamento, curva 3, se verifica um déficit de 32,52 MVar, ou seja, um déficit extra de 24,67 MVar. Assim o sistema teve uma variação de total de 99,10 MVar. Observe agora que os pontos de mínimo das curvas 2 e 3 estão acima do eixo horizontal e, portanto, as margens de reativos são negativas, ou seja, para essa contingência, o sistema só atenderá o critério de estabilidade definido pelo WSCC com a introdução de um suporte de potência reativa de pelo menos 32,514 MVar na tensão de 0,96 p.u.. A curva 4 mostra o resultado da contingência N-2 considerando o carregamento do caso base ($\lambda=1$) e a inserção de um banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14. Observe que com a inserção do banco de capacitores o sistema ainda dispõe de uma MR de 1,32 MVar e assim, atende o critério definido pelo WSCC.

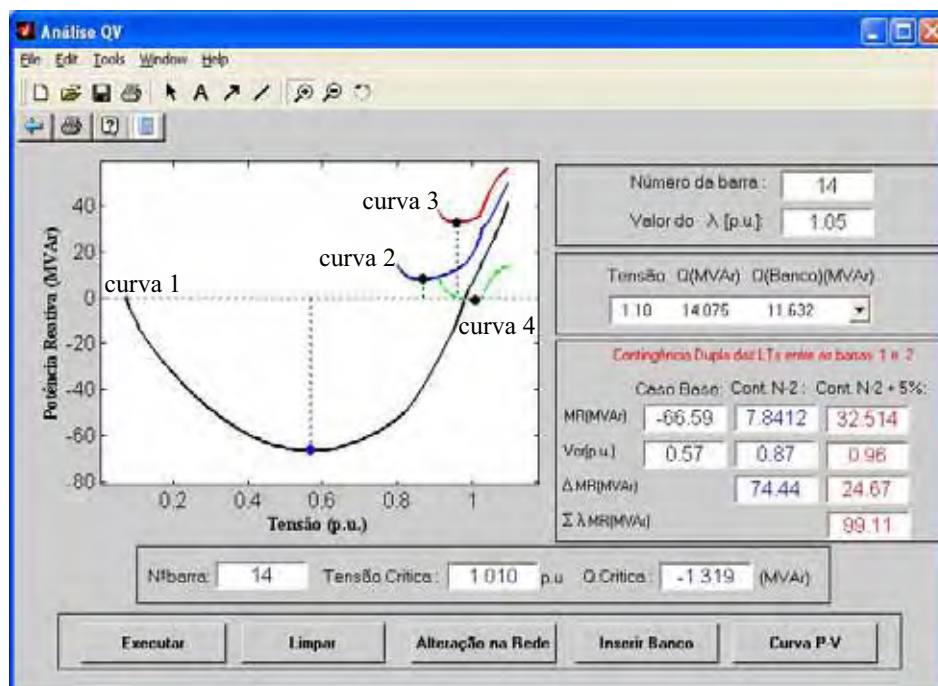


Figura 4.17 – Curvas Q-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base + 5% ($\lambda=1,05$); e curva 4, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14.

Na Figura 4.18 são apresentadas as correspondentes curvas P-V da contingência analisada na Figura 4.17, a curva 1 corresponde ao caso base sem contingência (N-0) e mostra uma MC de 0,7751 p.u.. A curva 2 é a curva P-V para a contingência N-2 e mostra que ocorreu uma redução de 0,7942 p.u. na MC, ou seja, nesta condição será necessário estabelecer uma política de controle para o corte de carga a fim de que o sistema possa continuar em operação porque o λ do $PMC_{pós}$ (0,9809 p.u.) encontra-se abaixo do valor do caso base. Com a inserção do banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14, o sistema dispõe de potência reativa suficiente para suportar a contingência e ainda apresentar uma MC positiva de 0,0534p.u., conforme se pode verificar na curva 3.

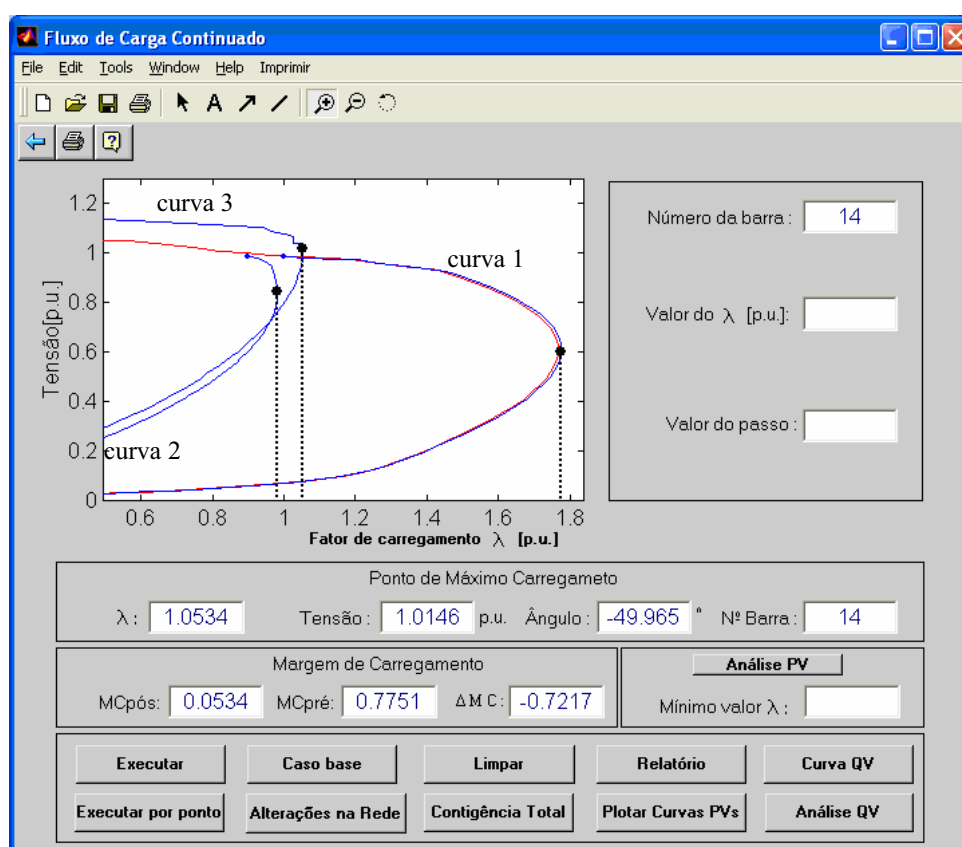


Figura 4.18 – Curvas P-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 35,281 MVar na barra 14.

4.5.2 DETERMINAÇÃO DA MARGEM DE POTÊNCIA ATIVA

Conforme especificado na Tabela 4.1, para a categoria de desempenho A, a mínima MC deve ser determinada para cada cenário do sistema em estudo encontrando a variação na MC para a barra crítica. Os passos para a sua determinação são:

1. Determine a pior contingência para o nível A (Isto é feito através de uma análise de contingência na pior condição operativa, p. ex., no pico de carga, Figuras 4.10 e 4.11).
2. Trace a curva P-V da barra crítica para a pior contingência N-1 identificada.

Similar a análise Q-V, para o sistema em análise devem ser realizados testes por meio das curvas P-V objetivando determinar a MC requerida para as condições em estudo. Conforme especificado na Tabela 4.1, a MC mínima é determinada na barra crítica.

Na Figura 4.19 pode-se ver as curvas P-V correspondentes ao caso base e à pior contingência N-1 do sistema IEEE-30, e que corresponde a contingência da LT localizada entre as barras 2 e 5. A curva 1 é a curva P-V para o caso base sem contingência (N-0) e mostra uma MC de 0,541 p.u. A curva 2 é a curva P-V para a contingência N-1. Como se pode ver na figura, a MC é de 0,1344 p.u., o que implica numa diminuição (valor medido do $PMC_{pré}$ para o $PMC_{pós}$) da margem de carregamento de 0,4065, a qual corresponde a uma redução de 75,15% em relação à MC do caso base. Para se atender o critério definido pelo WSCC deve-se considerar ainda uma redução de 5% (igual a 0,05672) do valor do $PMC_{pós}$. Esse valor visa levar em conta as incertezas de previsão de carga. Assim, obtém-se o carregamento limite do ponto de operação (ponto 'P' na curva P-V de pós-contingência), e que nesse caso corresponde à 1,077 p.u., e dessa forma o sistema atende o critério estabelecido pelo WSCC. As outras contingências de LT também podem causar o colapso de tensão, entretanto, para níveis mais altos de carregamento e portanto não são limitantes.

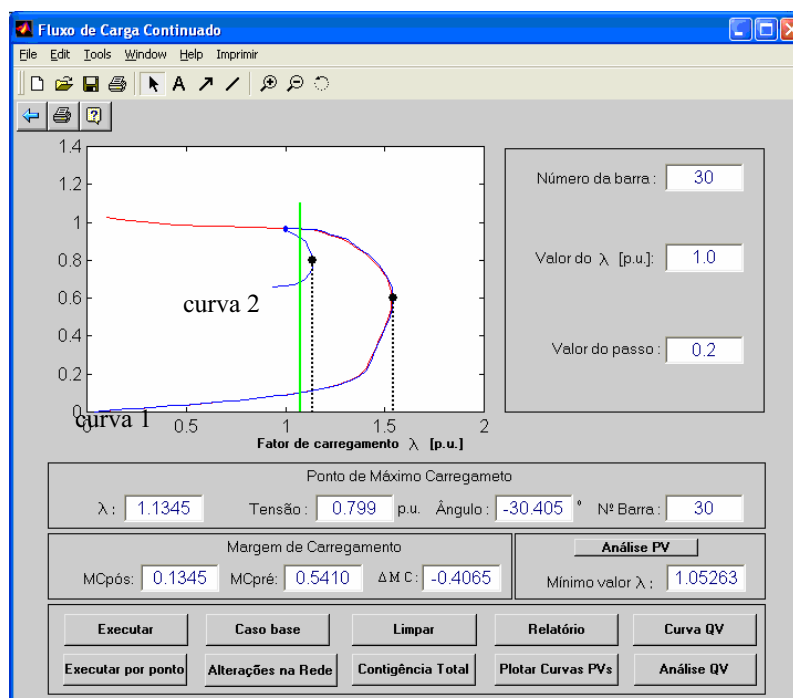


Figura 4.19 – Curvas P-V para o caso base e para a contingência de uma das duas LT entre as barras 2 e 5 do sistema IEEE-30 barras.

Considere agora a análise aplicada ao mesmo caso da Figura 4.18, ou seja, à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras, e que corresponde à contingência das duas LT's localizadas entre as barras 1 e 2. De acordo com a Tabela 4.1 esse evento se enquadraria na categoria C e deveria apresentar uma margem igual ou superior a 2,5%. Novamente, como para o IEEE-14 nenhuma contingência N-1 de LT resultou em uma MR negativa, apenas com o objetivo de ilustrar os efeitos da inserção de um banco de capacitores visando o atendimento do critério definido pelo WSCC, analisemos essa contingência com os critérios de uma contingência N-1.

A curva 1 na Figura 4.20 é a curva P-V para o caso base sem contingência (N-0) e mostra uma MC de 0,7751 p.u.. A curva 2 é a curva P-V para a contingência N-1. Como se pode ver na figura, a MC é de -0,0191 p.u., o que implica numa diminuição (valor medido do $PMC_{pré}$ (1,7751 p.u.) para o $PMC_{pós}$ (0,9809 p.u.)) da margem de carregamento de 0,7942, a qual corresponde a uma redução de 102,47% em relação à MC do caso base. Para atender o critério

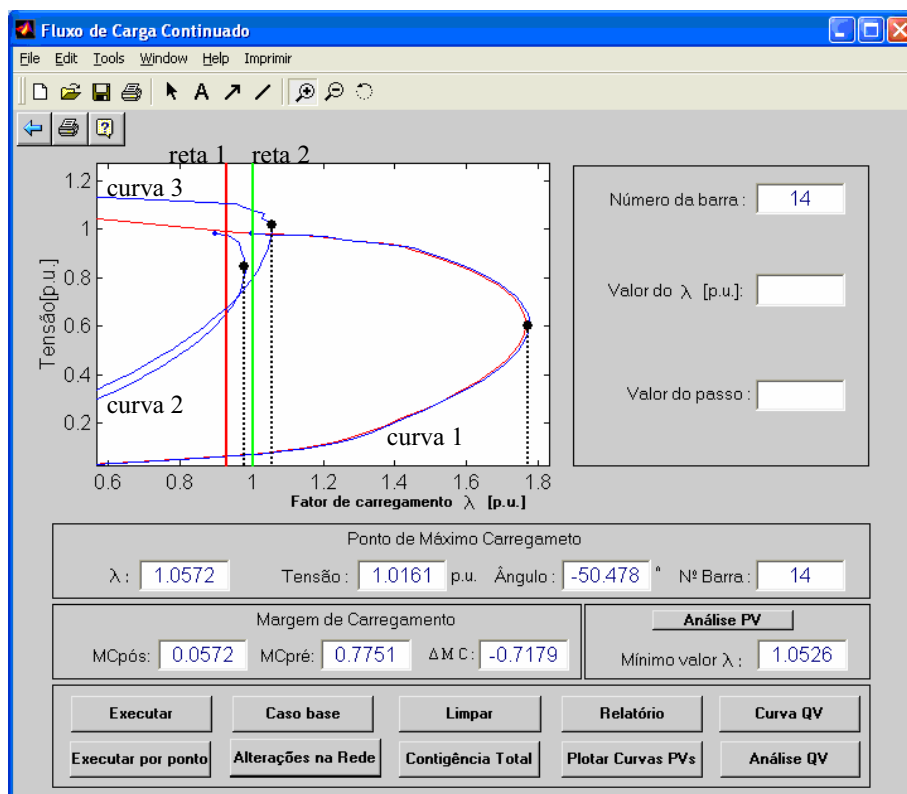


Figura 4.20 – Curvas P-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 36,924 MVar na barra 14.

definido pelo WSCC, deve-se considerar ainda uma redução de 5% do valor do $PMC_{pós}$. Esse valor foi indicado pela reta 1 (em vermelho) na Figura 4.20, a qual mostra que com essa contingência o critério estabelecido pelo WSCC não seria atendido.

Considere agora a inserção de um banco de capacitores visando o atendimento do critério definido pelo WSCC. O nosso objetivo é que o ponto de operação do caso base atenda o critério estabelecido pelo WSCC, ou seja, que o fator de carregamento do ponto de operação do caso base seja inferior ao obtido após a contingência e a consideração da redução de 5% do valor do $PMC_{pós}$, ou seja, que o valor do λ no $PMC_{pós}$ seja maior ou igual a 1,05263 p.u.. Para isso utiliza-se a função Análise Q-V, ver Figura 4.20. Considere que se deseja um valor de 1,05263 p.u. para o λ no $PMC_{pós}$. Na Figura 4.21, a curva 1 é a curva Q-V para o caso base sem

contingência (N-0) e mostra uma MR de 66,59 MVar. A curva 2 é a curva Q-V para a contingência N-2 e apresenta um déficit de 7,84 MVar, ou seja, nesta condição operativa o sistema não dispõe de potência reativa suficiente para suportar a contingência. Considerando agora a contingência N-2 e um fator de carregamento de 1,05263 p.u., curva 3, verifica-se um déficit de 34,03 MVar na tensão de 0,96 p.u. (valor no ponto de mínimo da curva 3). Assim, pode-se ver que seria necessário considerar um banco com no mínimo 36,924 MVar. A curva 3 na Figura 4.20 corresponde à contingência N-2 considerando o carregamento do caso base e a inserção de um banco de capacitores de 36,924 MVar na barra 14. Como se pode verificar, após a inserção do referido banco o fator carregamento no $PMC_{pós}$ é igual a 1,0572 p.u., e com isso, o fator de carregamento do ponto de operação do caso base é inferior a 95% (1,004 p.u.) do fator carregamento no $PMC_{pós}$, indicado pela reta 2 na Figura 4.20. Com isso, o sistema passa a atender ao critério estabelecido pelo WSCC.

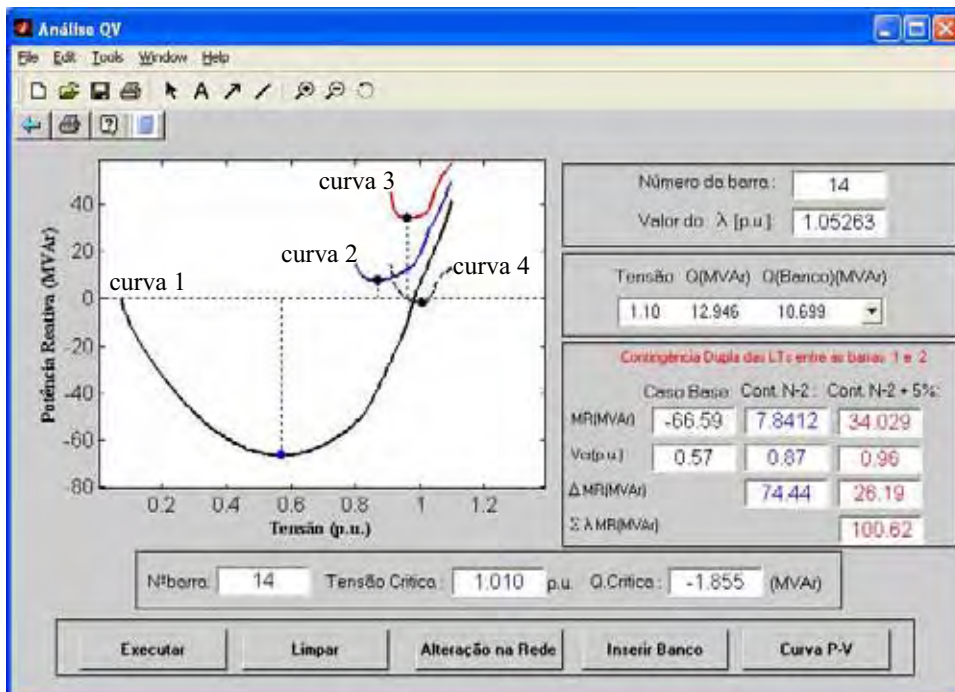


Figura 4.21 – Curvas Q-V correspondentes à contingência N-2 do sistema IEEE-14 barras: curva 1, caso base ($\lambda=1,0$); curva 2, contingência N-2 (caso base, $\lambda=1,0$); curva 3, contingência N-2 considerando o carregamento desejado ($\lambda=1,05263$); e curva 4, contingência N-2 considerando o carregamento desejado e a inserção de um banco de capacitores de 36,924 MVar na barra 14.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho apresentou-se um programa interativo para a simulação do fluxo de potência e do fluxo de potência continuado. As simulações são realizadas por meio de uma interface gráfica interativa. A interface gráfica proporciona não só um ambiente mais amigável para o usuário, mas também auxilia e facilita o aprendizado dos estudantes de graduação e de pós-graduação em engenharia elétrica, na aquisição de conceitos e no desenvolvimento de programas relacionados com o problema do fluxo de potência. O *software MATLAB*, versão 5.3, foi utilizado para programar a interface gráfica e os programas de fluxo de potência e o fluxo de potência continuado. A interface gráfica proposta permite que o usuário:

- analise a influência da alteração dos parâmetros do sistema;
- analise o ponto de operação não só para nas condições normais, mas também nas diferentes condições de contingência. Nestas análises a interface gráfica permite que o usuário efetue a retirada da linha de transmissão via diagrama unifilar do sistema, clicando diretamente sobre a mesma;
- visualize o perfil de tensão das barras, bem como os fluxos de potências ativa e reativa diretamente no diagrama unifilar do sistema;

- compare entre si os desempenhos dos métodos de *Newton-Raphson* convencional e *Newton-Raphson* desacoplado, algoritmos simultâneo (NRDS) e alternado, tanto quando as matrizes são atualizadas a cada iteração, como quando são mantidas constantes;
- realize o traçado de curvas P-V e Q-V nas condições operativas normal e sob contingência;
- realize a avaliação da estabilidade de tensão de acordo com os critérios definidos pelo WSCC;
- efetue a alocação de um banco de capacitor numa barra escolhida objetivando o aumento da margem do sistema.

Todas estas características tornam o programa desenvolvido adequado para fins educativos. Observa-se que os capítulos 3 e 4 deste trabalho foram elaborados para servir como um tutorial para o uso da referida interface gráfica.

5.2 MOTIVAÇÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Algumas sugestões para dar continuidade aos trabalhos iniciados por esta pesquisa:

- Implementar as demais versões de fluxo de potência desacoplados convencionais e parametrizadas existentes na literatura tais como: as versões XB e BX;
- Possibilitar que o diagrama unifilar seja construído a partir de coordenadas fornecidas pelo próprio banco de dados;

- Implementar o diagrama unifilar de sistemas de maior porte: IEEE-57, IEEE-118, IEEE-300 barras;
- Implementar a possibilidade da representação analógica das grandezas tais como: as magnitudes e os ângulos das tensões serem representadas, respectivamente, por círculos de diferentes raios e por setores circulares. As linhas de transmissão serem representadas por linhas cujas espessuras são função do respectivo fluxo passante.
- Estruturar o programa de forma que o mesmo possa ser convertido para outras linguagens via *MATLAB*, tais como linguagem C ou Fortran.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, D. A.; DA SILVA, L. C. P.; CASTRO C. A.; COSTA, V. F. Esquema alternativos para o passo de parametrização do método da continuação baseados em parâmetros físicos. **Controle & Automação**, Campinas, SBA, v.13, p. 275-289, 2002.

AJJARAPU, V.; CHRISTY C. The continuation power flow a tool for steady state voltage stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 7, n. 1, p. 416-423, 1992.

AJJARAPU, V.; LAU, P. L.; BATTULA, S. An optimal reactive power planning strategy against voltage collapse. **IEEE Transactions on Power System**, v. 9, n. 2, p. 906-917, Maio 1994.

AYASUN, S.; DAFIS, C.; NWANKPA, C.; KWATNY, H. Symbolic analysis and simulation for power system dynamic performance assessment, In: **IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING**, 2005, San Francisco. **Proceedings...**, v.1, p. 823-831, 2005.

CASTRO, C. A. Cálculo de fluxo de carga. Disponível em: <<http://www.dsee.fee.unicamp.br/~ccastro>>. Acesso em: 10 mar. 2005.

CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO F. L. Point of collapse methods for large AC/DC power systems. **IEEE Transactions on Power Systems**. v. 8, n. 1, p.1-8, Fev. 1993.

CIGRE STUDY COMMITTEE 38 WORKING GROUP 01 TASK FORCE 03. Reactive power compensation analyses and planning procedure. **CIGRE Publication**, 90 p., 1989.

CHIANG, H. D.; FLUECK, A. J.; SHAH, K. S.; BALU, N. CPFLOW: a practical tool for tracing power system steady state stationary behavior due to load and generation variations. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 2, p. 623-634, Maio 1995.

CHIANG, H. D.; LI, H. Y.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. The generation of ZIP-V curves for tracing power system state stationary behavior due to load and generation variations. In: **IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING**, Julho 1999, Edmonton. **Proceedings...**, p. 647-652, 1999.

CHAI, J. S.; BOSE, A. Bottlenecks in parallel algorithms for power system stability analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 1, p. 9-15, 1993.

FILHO, A. A. MATLAB básico. Disponível em: <<http://www.mec.ita.cta.br/~adade/Matlab/Web/intro.htm>>. Acesso em: 15 mar. 2005.

FCE- Furnas Centrais Elétricas, 1986, Manual do Usuário do Programa para Estudo de Fluxo de Potencia-Programa Bigpowermod versão 1.2 [Instruções Gerais]

FTCT- Força Tarefa Colapso de Tensão. Critérios e metodologias estabelecidos no âmbito da força-tarefa “colapso de tensão” do GTAD/SCEL/GCOI para estudos de estabilidades de tensão nos sistemas interligados Norte/Nordeste, Sul/Sudeste e Norte/Sul Brasileiros, In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – SNPTEE**, 15., 1999, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Cigré Brasil/Itaipu Binacional, 1999.

FRERIS, L. L; SASSON, A. M. Investigation of the load-flow problem, In: **Proceedings of IEE**, v. 115, n. 10, p. 1459-1470, Out. 1968.

HUANG, G. M.; ZHANG, H. A new education MATLAB software for teaching power analysis that involves the slack bus concept and allocation issues. In: **IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING**, 2000, Cingapura. **Proceedings...**, v. 2, p. 1150- 1158, 2000.

IEEE Power System Stability Committee (IEEE-PSSC), Special Publication. Final draft: voltage stability assessment, procedures and guides, Disponível em: <http://www.power.uwaterloo.ca>, 1999.

YANG, J.; ANDERSON, M. D. PowerGraf: an educational software package for power systems analysis and design, **IEEE Transaction Power Systems**, v. 13, n. 4, p. 1205-1210, Nov. 1998.

KEZUNOVIC, M.; ABUR, A.; HUANG, G.; BOSE, A.; TOMSOVIC, K. The role of digital modeling and simulation in power engineering education, **IEEE Transaction Power Systems**, v. 19, n. 1, p. 64-72, Fev. 2004.

KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**, New York: McGraw – Hill, 1176 p., 1993.

MATHWORKS. Disponível em: < <http://www.mathworks.com>>. Acesso em: 01 mar. 2005.

MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Editora Blücher Ltda., 1983.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. V.; SAAVEDRA, O. R. Fast decoupled load flow: hypothesis, derivations and testing. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 4, p. 1425-1431, Nov. 1990.

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Procedimentos de rede, submódulo 23.3, diretrizes e critérios para estudos elétricos, 2002.

PETERSON, N. M.; MEYER W. S. Automatic Adjustment of transformer and phase-shifter taps in the Newton power flow, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-90, p. 103-108, Fev. 1971.

SCHAFFNER, C. An internet-based load flow visualization software for education in power engineering. In: **POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING**, 2002, New York. **Proceedings...**, v. 2, p. 1415-1420, 2002.

SHIN, J. R.; LEE, W. H.; IM, D. H. A windows-based interactive and graphic package for the education and training of power systems analysis and operation, **IEEE Transaction Power Systems**, v. 14, n. 4, p. 1193-1199, Nov. 1999.

SILVIA. Disponível em: <<http://www.info.ufrgs.br/%7Esilvia/ipg/matlabufms.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2005.

SEYDEL, R. **From Equilibrium to Chaos: Practical Bifurcation and Stability Analysis**, 2^a ed. New York: Springer-Verlag, 407 p., 1994.

STAGG, G.W. **Computação Aplicada a Sistema de Geração e Transmissão de Potência**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1979.

STOTT, B; ALSAÇ, O. Fast decoupled load flow, **IEEE Transactions on Power Systems**, v. PAS-93, n. 3, p. 859-869, 1974.

TAYLOR, C. W. **Power System Voltage Stability**. New York: McGraw-Hill, 1994.

TINNEY, W. F.; WALKER, J. W. Direct solutions of sparse network equations by optimally ordered triangular factorizations, **PROCEEDINGS OF IEEE**, v. 55 , New York, p. 1801-1809, 1967.

VAN CUTSEM, T.; VOURNAS C. **Voltage Stability of Electric Power System**, Kluwer Academic Publishers, Boston, p 376, 1998.

VAN NESS, J. E. Iteration methods for digital load flow studies. **Transactions AIEEE(Power Apparatus and Systems)** , v. 78A, pt. III, p. 919-924, 1959.

ZAMBRONI, S.; CAÑIZARES, C. A.; QUINTANA, V. H. New techniques to speed up voltage collapse computations using tangent vectors. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 12, n. 3, p. 1380-1387, August 1997.

WIEGMANN, D. A. Human factors aspects of power system voltage visualizations, In: **HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES - HICSS-35**, 2002, Havaí. **Proceedings...**, p. 1-6, 2002.

WSCC-Reactive Power Reserve Work Group (RRWG). Final report: voltage stability criteria, undervoltage load shedding strategy, and reactive power reserve monitoring methodology, 145 p., Maio 1998.

Apêndice A

O SOFTWARE MATLAB

A.1 INTRODUÇÃO

O *MATLAB* é uma linguagem de programação apropriada ao desenvolvimento de aplicativos de natureza técnica. Para isso, possui facilidades de computação, programação e baixo custo, dentro de um ambiente amigável e de fácil aprendizado (HUANG, ZHANG, 2000).

O *MATLAB* foi desenvolvido no início da década de 80 por Cleve Moler, no Departamento de Ciência da Computação da Universidade do Novo México, EUA. As versões posteriores ao *MATLAB 4.0*, foram desenvolvidas na firma comercial *MathWorks Inc.*, que detêm os direitos de autores destas implementações.

O *MATLAB* foi originalmente desenvolvido para prover um acesso amigável ao tratamento de vetores e matrizes. Atualmente o *MATLAB* dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas, geração de gráficos e manipulação de dados que auxiliam muito o trabalho do programador. E ainda possui uma vasta coleção de bibliotecas denominadas *toolboxes* para áreas específicas como: equações diferenciais ordinárias, estatística, processamento de imagens, processamento de sinais, finanças, entre outras.

Os recursos instalados também podem ser estendidos pelo usuário através da implementação de funções *MATLAB* (M-files) ou de rotinas escritas em linguagem C ou *FORTRAN* (FILHO, 2005).

A.2 CARACTERÍSTICAS DOS RECURSOS GRÁFICOS DO *MATLAB*

Podemos criar uma janela através da função *Figure* e formatar essa janela através de seus parâmetros (estes parâmetros serão mostrados abaixo). A Figura A.1 mostra uma janela feita com a função *Figure* e seus parâmetros devidamente configurados.

```
dx=0.2850;  
dy=0.2200;  
pos = [(1-dx)*0.5, (1-dy)*0.5, dx, dy];  
h0 = figure('Color',[ 0.800 0.800 0.800], ...  
           'Units','normalized', ...  
           'MenuBar','none', ...  
           'NumberTitle','off', ...  
           'Position',pos, ...  
           'Resize','off', ...  
           'name','');
```



Figura A.1 - Exemplo da função *Figure*.

A.2.1 PROPRIEDADES DA FUNÇÃO *FIGURE*:

Color: Representa a cor de fundo da janela. É um vetor com os componentes RGB.

Exemplo: a seqüência Color [0 0 0] equivale a cor preta e a seqüência Color[1 1 1] equivale a cor branca.

Units: É uma unidade usada para posicionar o controle. A posição e tamanho de um controle dentro da janela, que são feitos através de coordenadas como: *Normalized* (máximo e mínimo da janela correspondendo a 0 e 1) e *Pixels*(pontos gráficos).

MenuBar: Se o valor dessa propriedade for '*none*' nenhum menu é mostrado na janela. Se for '*Figure*' a janela terá o menu padrão de figuras.

NumberTitle: Se o valor dessa propriedade for '*on*' aparecerá o nome e o número da janela. Se for '*off*' a barra de título aparece em branco.

Position: Especifica a posição e tamanho da janela através das propriedades: [*left, bottom, width, height*].

Resize: Se estiver em '*on*' a janela pode ter seu tamanho alterado. Se tiver em '*off*' o tamanho da janela não pode ser alterado.

Name: Dá um nome para a janela. O valor desta propriedade deve ser uma *string*.

A.3 CONTROLES

No *MATLAB* existe uma maneira muito prática de se programar a resposta de um controle ao usuário. Por exemplo, ao apertar-se um botão queremos que seja plotado um gráfico,

ou fechar a janela que se está operando. Os controles também servem para retornar algum valor para o usuário de maneira mais amigável.

A.3.1 O COMANDO *UICONTROL*

Todos os controles no *MATLAB* são criados com a função *uicontrol*. O *uicontrol* é um comando de controle para a janela que está ativa. Para criar os controles, deve-se configurar apropriadamente seus parâmetros.

A.3.1.1 PROPRIEDADES DO *UICONTROL*

Os parâmetros do *uicontrol* indicam que controle deverá ser criado e como e onde o mesmo irá aparecer na janela.

Abaixo serão mostrados alguns dos parâmetros do *uicontrol*:

Units: Unidade usada para posicionar o controle. A posição e tamanho de um controle dentro da janela podem ser feitos através de números que representam sua localização. São feitos através de coordenadas como: *Normalized* (máximo e mínimo da janela correspondendo a 0 e 1) e *Pixels* (pontos gráficos).

BackgroundColor: Função que controla a cor de fundo. Por *default* recebe o valor de cinza claro, mas pode ser uma cor definida por um vetor linha com os componentes RGB.

A Figura A.2 mostra um exemplo de *BackgroundColor* valendo [1 1 1] que equivale a cor branca.

```
h0 = figure('Color',[ 0.800 0.800 0.800], ...  
    'Units','normalized', ...  
    'MenuBar','none', ...  
    'NumberTitle','off', ...  
    'Position',pos, ...  
    'Resize','off', ...  
    'name','');  
h1 = uicontrol('Parent',h0, ...  
    'Units','normalized', ...  
    'BackgroundColor',[ 1 1 1], ...  
    'ForegroundColor',[0.000 0.000 0.502],...  
    'HorizontalAlignment','center', ...  
    'Position',[0.0787 0.7678 0.8287 0.1547], ...  
    'String','Sistemas:', ...  
    'FontSize',17,...  
    'Fontname','Arial',...  
    'Style','text', ...  
    'Tag','StaticText1');
```

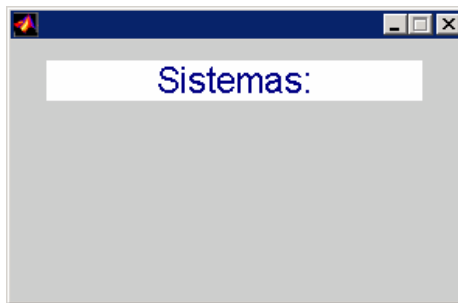


Figura A.2 - Exemplo do *BackgroundColor*.

ForegroundColor: Função que controla a cor de fora. Por *default* recebe o valor de cinza claro, mas pode ser uma cor definida por um vetor linha com os componentes RGB. A Figura A.3 mostra um exemplo de *ForegroundColor* valendo [1 1 1] que equivale a cor preta.

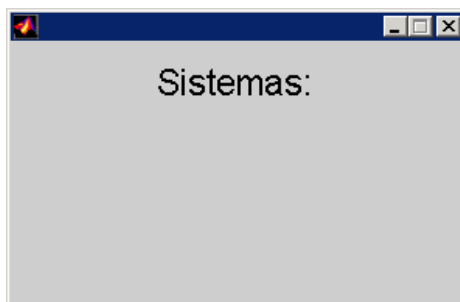


Figura A.3 - Exemplo do *ForegroundColor*.

HorizontalAlignment: Função de Alinhamento do controle. Os valores são: *left*, *center* e *right*, representando respectivamente alinhamento à direita, central e à esquerda. A Figura A.4 mostra um exemplo de *HorizontalAlignment* com o valor de *left*.

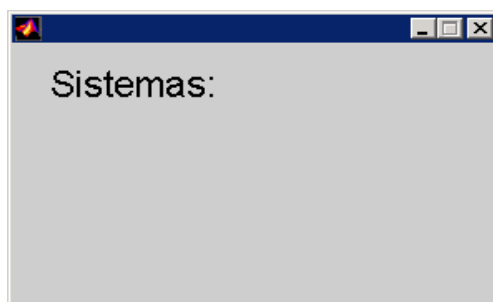


Figura A.4 - Exemplo do *HorizontalAlignment* com o valor de *left*.

Position: Posição do controle na janela seguindo a unidade usada. O valor é um vetor linha com as coordenadas X e Y do canto superior esquerdo do controle, sua altura. Ex: [X Y tamanho altura].

Callback: *String* de ações para o controle. Armazena uma *string* com comandos que serão executados ao acionamento do controle.

Enable: Habilitação do controle. Se seu valor for ‘*on*’ o controle pode ser utilizado, se for ‘*off*’ o mesmo aparece desabilitado, não podendo assim ser modificado pelo usuário.

String: Texto mostrado no controle. Alguns controles não possuem nenhum texto, como barras de rolagem e caixas de texto.

FontSize: Define o tamanho do texto que vai aparecer na *string*.

Style: Define o estilo de controle que será criado, se é botão, caixa de texto, etc. Os valores para esta propriedade são: *Pushbutton*, *Radiobutton*, *Checkbox*, *Edit*, *Text*, *Slider*, *Frame*.

A.3.1.2 TIPOS DE UICONTROL

Botão simples (*Pushbuttons*): Os *pushbuttons*, as vezes chamados de botões de comando ou simplesmente botões, são objetos de tela pequenos, retangulares que normalmente contêm um rótulo de texto. Selecionado um botão simples com o *mouse* movendo-se o ponteiro para cima do objeto e pressionando-se o botão do mouse, faz-se com que o *MATLAB* execute a ação definida pela *callback* string do objeto. Imediatamente depois que um botão simples é acionado, ele retorna a seu estado inicial. Os botões simples costumam ser usados para executar uma ação e não para mudar um estado ou fixar um atributo. A Figura A.5 mostra um *Pushbuttons*:

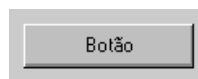


Figura A.5 - Botão (*pushbutton*).

Botão de opções (*Radiobuttons*): Os botões de opções consistem em botões contendo um rótulo e um pequeno círculo ou diamante à esquerda do texto de rótulo. Quando

selecionado, o círculo ou diamante é preenchido e a propriedade “*Value*” é fixada como o valor especificado pela propriedade “*Max*”, que por padrão, é 1; quando não-selecionado, o indicador é removido e a propriedade “*Value*” é fixada como o valor especificado pela propriedade “*Min*”, que é 0 por padrão. *Radiobuttons* costumam ser usados para selecionar uma de um grupo de opções mutuamente exclusivas. Para reforçar essa exclusividade, todavia, a *callback string* para cada botão de rádio deve desativar todos os outros botões de grupo fixando o “*Value*” de cada um deles em 0 ou com o valor atribuído à propriedade “*Min*”. Isso, no entanto, é apenas uma convenção. A Figura A.6 mostra um *radiobuttons*.



Figura A.6 - Botão *Radiobuttons*.

Caixa de Texto (*Edit*): Caixas de texto editáveis exibem texto em uma caixa, de maneira que você possa modificar ou substituir a *string* de texto dinamicamente, do mesmo como você faria em um editor de texto ou em um processador de palavras. A Figura A.7 mostra um *edit*.

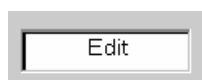


Figura A.7 - Caixa de Texto (*Edit*).

Frames: Não é um controle propriamente dito, a função engloba uma série de opção como (botão, caixa de texto, texto, etc.). Tem por finalidade manter uma estrutura de controle uma das outras em função das características do programa ou do gosto do programador. A Figura A.8 mostra um *frame*.



Figura A.8 – *Frame*.

Text: A função *text* é usada tipicamente para etiquetas, mas pode ser usado para indicar algum valor de saída. A Figura A.9 mostra um *text*.



Figura A.9 – Text.

Apêndice B

ARQUIVOS DE DADOS

B.1 ELABORAÇÃO DOS ARQUIVOS DE DADOS

Neste apêndice são apresentados os arquivos de dados que são utilizados pelo simulador de fluxo de potência, e também o detalhamento para a sua correta formação. A Figura B.1 mostra o sistema 5 barras, a Tabela B.1 mostra os dados de barras do sistema. Abaixo será comentado cada campo da matriz barra:

```
barras= [
  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
  2  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
  3  2  0.0  0.0  90  0.0  0.0  0.0  1  1.000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
  4  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
  5  3  90  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;];
```

Tabela B.1 - Dados da matriz barras (5 barras).

- A coluna 1 da matriz barras corresponde ao número das barras; pode variar de (1 até N);
- A coluna 2 da matriz barras corresponde ao tipo de barra; os tipos usados neste programa são 1-V θ , 2- PV e 3-PQ.
- A coluna 3 da matriz barras corresponde à potência ativa da carga; está na base 100 MVA.
- A coluna 4 da matriz barras corresponde à potência reativa da carga; está na base 100 MVA.
- A coluna 5 da matriz barras corresponde à potência ativa gerada; está na base 100 MVA.

- A coluna 6 da matriz barras corresponde à potência reativa gerada; está na base 100 MVA.
- A coluna 7 da matriz barras corresponde à condutância *shunt*; está na base 100 MVA.
- A coluna 8 da matriz barras corresponde à susceptância *shunt* de barra; está na base 100 MVA.
- A coluna 9 da matriz barras corresponde à área .
- A coluna 10 da matriz barras corresponde à magnitude da tensão; está em p.u.
- A coluna 11 da matriz barras corresponde ao ângulo da tensão; está em graus.
- A coluna 12 da matriz barras corresponde à V_{nom} ; está em kV.
- A coluna 13 da matriz barras corresponde à zona.
- A coluna 14 da matriz barras corresponde à tensão máxima na barra; está em p.u.
- A coluna 15 da matriz barras corresponde à tensão mínima na barra; está em p.u.
- A coluna 16 da matriz barras corresponde à potência reativa de saída máxima; está na base 100 MVA.
- A coluna 17 da matriz barras corresponde à potência reativa de saída mínima; está na base 100 MVA.

A Tabela B.2 apresenta os dados de linhas do sistema de 5 barras. ver a Figura B.1

Abaixo é comentado cada campo da matriz linhas.

Tabela B.2 - Dados da matriz linhas (5 barras).

```
linhas = [
  1  2  .0000  .0576  0.000  0.000      1.000  1.000  0.0  12  1;
  2  5  .0170  .0920  0.000  0.000      1.000  1.000  0.0  25  1;
  4  5  .0390  .1700  0.000  0.000      1.000  1.000  0.0  45  1;
  3  4  .0000  .0586  0.000  0.000      1.000  1.000  0.0  34  1;];
```

- A coluna 1 da matriz linhas corresponde ao número da barra de origem.
- A coluna 2 da matriz linhas corresponde ao número da barra destino.
- A coluna 3 da matriz linhas corresponde à resistência série; está em p.u.
- A coluna 4 da matriz linhas corresponde à reatância série; está em p.u.
- A coluna 5 da matriz linhas corresponde à susceptância shunt de linha; está em p.u.
- A coluna 6 da matriz linhas corresponde à relação de transformação.
- A coluna 7 da matriz linhas corresponde ao valor mínimo que pode assumir o *tap* do transformador.
- A coluna 8 da matriz linhas corresponde ao valor máximo que pode assumir o *tap* do transformador.

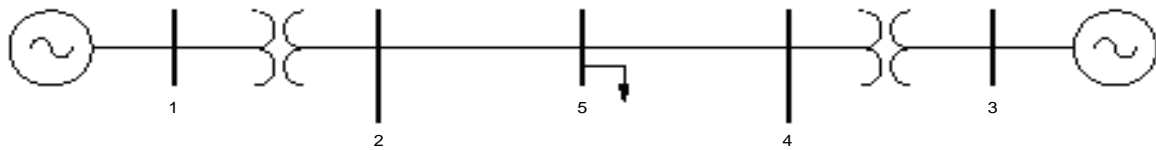


Figura B.1 – Sistema de 5 barras.

SISTEMA IEEE – 9 BARRAS

A Figura B.2 apresenta a o sistema 9 barras, a Tabela B.3 contem todos os dados de barras e a Tabela B.4 contem todos os dados de linha do sistema.

Tabela B.3 - Dados da matriz barras (IEEE 9 barras).

```

barras= [
1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0400  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
2  2  0.0  0.0  1.63  0.0  0.0  0.0  1  1.0250  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
3  2  0.0  0.0  0.85  0.0  0.0  0.0  1  1.0250  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
4  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
5  3  1.25  0.50  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
6  3  0.90  0.30  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
7  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
8  3  1.0  0.35  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;
9  3  0.0  0.00  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999  -9999;] ;

```

Tabela B.4 - Dados da matriz linhas (IEEE 9 barras).

```

linhas = [
  1  4  .0000  .0576  0.0000  1.000  1.000  1.000;
  2  7  .0000  .0625  0.0000  1.000  1.000  1.000;
  3  9  .0000  .0586  0.0000  1.000  1.000  1.000;
  4  5  .0100  .085  0.0176  1.000  1.000  1.000;
  4  6  .0170  .0920  0.158  1.000  1.000  1.000;
  5  7  .0320  .1610  0.3060  1.000  1.000  1.000;
  6  9  .0390  .1700  0.3580  1.000  1.000  1.000;
  7  8  .0085  .0720  0.1490  1.000  1.000  1.000;
  8  9  .0119  .101  0.2090  1.000  1.000  1.000];

```

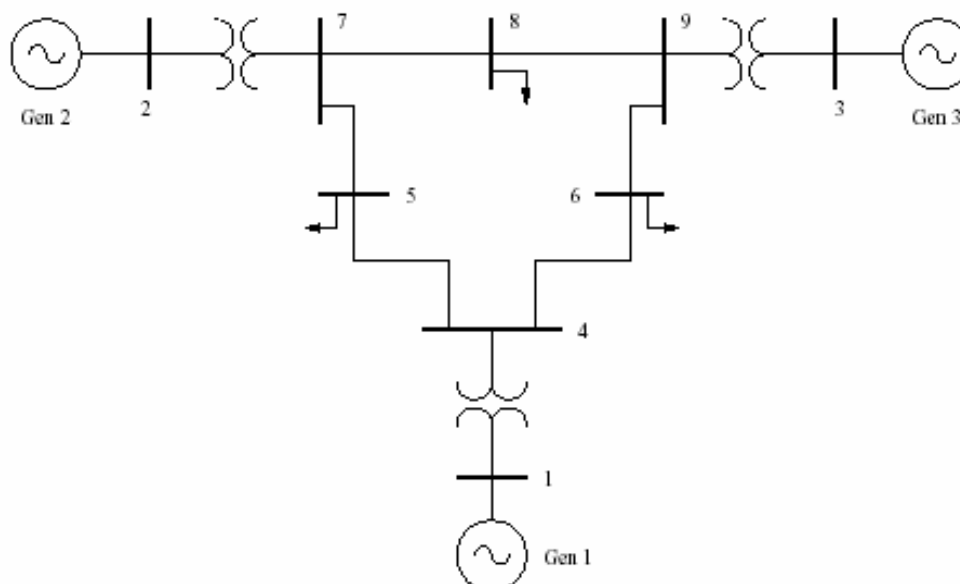


Figura B.2 – Sistema IEEE 9 barras.

SISTEMA IEEE – 14 BARRAS

A Figura B.3 apresenta a o sistema IEEE 14 barras; a Tabela B.5 contém todos os dados de barras e a Tabela B.6 contém todos os dados de linha do sistema.

Tabela B.5 - Dados da matriz barras (IEEE 14 barras).

```

barras= [
  1  1  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0600  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  9999 -9999;
  2  2  0.0  12.7  18.3  0.0  0.0  0.0  1  1.0450  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  50.0 -40.0;
  3  2  94.2  19.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0100  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  40.0  0.0;
  4  3  47.8 -3.9  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  5  3  7.6  1.6  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  6  2  11.2  7.5  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0700  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  24.0 -6.0;
  7  3  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  8  2  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0900  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  24.0 -6.0;
  9  3  29.5  16.6  0.0  0.0  0.0  19.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  10 3  9.0  5.8  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  11 3  3.5  1.8  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  12 3  6.1  1.6  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  13 3  13.5  5.8  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0;
  14 3  14.9  5.0  0.0  0.0  0.0  0.0  1  1.0000  0.0000  345.0  1  1.1000  0.9000  00.0  0.0];

```

Tabela B.6 - Dados da matriz linhas (IEEE 14 barras).

```

linhas = [
  1  2  .03876  .11834  .1056  1.000  1.000  1.000;
  1  2  .03876  .11834  .1056  1.000  1.000  1.000;
  1  5  .05403  .22304  .04920  1.000  1.000  1.000;
  2  3  .04699  .19797  .04380  1.000  1.000  1.000;
  2  4  .05811  .17632  .03740  1.000  1.000  1.000;
  2  5  .05695  .17388  .03400  1.000  1.000  1.000;
  3  4  .06701  .17103  .03460  1.000  1.000  1.000;
  4  5  .01335  .04211  .01280  1.000  1.000  1.000;
  4  7  .00000  .20912  .00000  1.0225  0.950  1.050;
  4  9  .00000  .55618  .00000  1.0320  0.950  1.050;
  5  6  .00000  .25202  .00000  1.0730  1.000  1.000;
  6  11 .09498  .19890  .00000  1.000  1.000  1.000;
  6  12 .12291  .25581  .00000  1.000  1.000  1.000;
  6  13 .06615  .13027  .00000  1.000  1.000  1.000;
  7  8  .00000  .17615  .00000  1.000  1.000  1.000;
  7  9  .00000  .11001  .00000  1.000  1.000  1.000;
  9  10 .03181  .08450  .00000  1.000  1.000  1.000;
  9  14 .12711  .27038  .00000  1.000  1.000  1.000;
  10 11 .08205  .19207  .00000  1.000  1.000  1.000;
  12 13 .22092  .19988  .00000  1.000  1.000  1.000;
  13 14 .17093  .34802  .00000  1.000  1.000  1.000; ];

```


SISTEMA IEEE – 30 BARRAS

O sistema de potência de teste IEEE 30 barras, representa o sistema de subtransmissão da área *Roanoke* (EUA) da Companhia de Energia Elétrica e Gás Americana (*American Gas and Electric Company*). Este foi desenvolvido em *Schenectady* com a configuração de dezembro de 1956.

O sistema consistia de 30 barras, 38 linhas de transmissão e 4 transformadores em fase. Estas, em sua maioria, de 33 kV. Todavia, havia uma rede de transmissão de 132 kV.

A versão do sistema IEEE 30 barras que se conhece hoje, Figura B.4, considerada por muitos a versão original, foi a apresentada em 1968 (FRERIS e SASSON, 1968). A Tabela B.7 contém todos os dados de barras e a Tabela B.8 contém todos os dados de linha do sistema.

Tabela B.7 - Dados de Barras (IEEE 30 barras).

```

barras = [
  1 1 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0600 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  2 2 21.7000 12.7000 40.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0450 0.00 135.0000 1 1.1000 0.9500 50.000 -40.0000;
  3 3 2.4000 1.2000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  4 3 7.6000 1.6000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  5 2 94.2000 19.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0100 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 40.0000 -40.0000;
  6 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  7 3 22.800 10.9000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  8 2 30.0000 30.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0100 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 40.0000 -10.0000;
  9 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  10 3 5.8000 2.0000 0.00 0.00 0.00 19.00 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  11 2 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0820 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 24.0000 -6.0000;
  12 3 11.200 7.5000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  13 2 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0710 0.00 135.0000 1 1.1000 0.9500 24.0000 -6.0000;
  14 3 6.2000 1.6000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  15 3 8.2000 2.5000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  16 3 3.5000 1.8000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  17 3 9.0000 5.8000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  18 3 3.2000 0.9000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  19 3 9.5000 3.4000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  20 3 2.2000 0.7000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  21 3 17.500 11.200 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  22 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.1000 0.9500 9999.99 -9999.99;
  23 3 3.2000 1.6000 0.00 0.00 0.00 0.000 2 1.0000 0.00 135.0000 1 1.1000 0.9500 9999.99 -9999.99;
  24 3 8.7000 6.7000 0.00 0.00 0.00 4.300 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  25 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  26 3 3.5000 2.3000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  27 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.1000 0.9500 9999.99 -9999.99;
  28 3 0.0000 0.0000 0.00 0.00 0.00 0.000 1 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  29 3 2.4000 0.9000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;
  30 3 10.600 1.9000 0.00 0.00 0.00 0.000 3 1.0000 0.00 135.0000 1 1.0500 0.9500 9999.99 -9999.99;

```

Tabela B.8 - Dados de Linha (IEEE 30 barras).

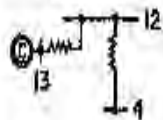
```

linhas = [
  1 2 0.0384 0.1150 0.1056 1.0000 1.0000 1.0000;
  2 1 0.0384 0.1150 0.1056 1.0000 1.0000 1.0000;
  1 3 0.0452 0.1852 0.0408 1.0000 1.0000 1.0000;
  2 4 0.0570 0.1737 0.0368 1.0000 1.0000 1.0000;
  3 4 0.0132 0.0379 0.0084 1.0000 1.0000 1.0000;
  2 5 0.0472 0.1983 0.0418 1.0000 1.0000 1.0000;
  2 6 0.0581 0.1763 0.0374 1.0000 1.0000 1.0000;
  4 6 0.0119 0.0414 0.0090 1.0000 1.0000 1.0000;
  5 7 0.0460 0.1160 0.0204 1.0000 1.0000 1.0000;
  6 7 0.0267 0.0820 0.0170 1.0000 1.0000 1.0000;
  6 8 0.0120 0.0420 0.0090 1.0000 1.0000 1.0000;
  6 9 0.0000 0.2080 0.0000 1.9780 0.9500 1.0500;
  6 10 0.0000 0.5560 0.0000 1.9690 0.9500 1.0500;
  12 14 0.1231 0.2559 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  12 15 0.0662 0.1304 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  12 16 0.0945 0.1987 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  14 15 0.2210 0.1997 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  16 17 0.0824 0.1923 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  15 18 0.1070 0.2185 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  18 19 0.0639 0.1292 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  19 20 0.0340 0.0680 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  10 20 0.0936 0.2090 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  10 17 0.0324 0.0845 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  10 21 0.0696 0.1498 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  21 10 0.0696 0.1498 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  10 22 0.0727 0.1499 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  21 22 0.0116 0.0236 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  15 23 0.1000 0.2020 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  22 24 0.1150 0.1790 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  23 24 0.1320 0.2700 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  24 25 0.1885 0.3292 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  25 27 0.1093 0.2087 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  28 27 0.0000 0.3960 0.0000 1.9680 0.9500 1.0500;
  27 29 0.2198 0.4153 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  27 30 0.3202 0.6027 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  29 30 0.2399 0.4533 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  8 28 0.0636 0.2000 0.0428 1.0000 1.0000 1.0000;
  6 28 0.0169 0.0599 0.0130 1.0000 1.0000 1.0000;
  9 11 0.0000 0.2080 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  9 10 0.0000 0.1100 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  25 26 0.2544 0.3800 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000;
  4 12 0.0000 0.2560 0.0000 1.9320 0.9500 1.0500;
  12 13 0.0000 0.1400 0.0000 1.0000 1.0000 1.0000; ];

```

THREE WINDING TRANSFORMER EQUIVALENTS

HANCOCK



ROANOKE

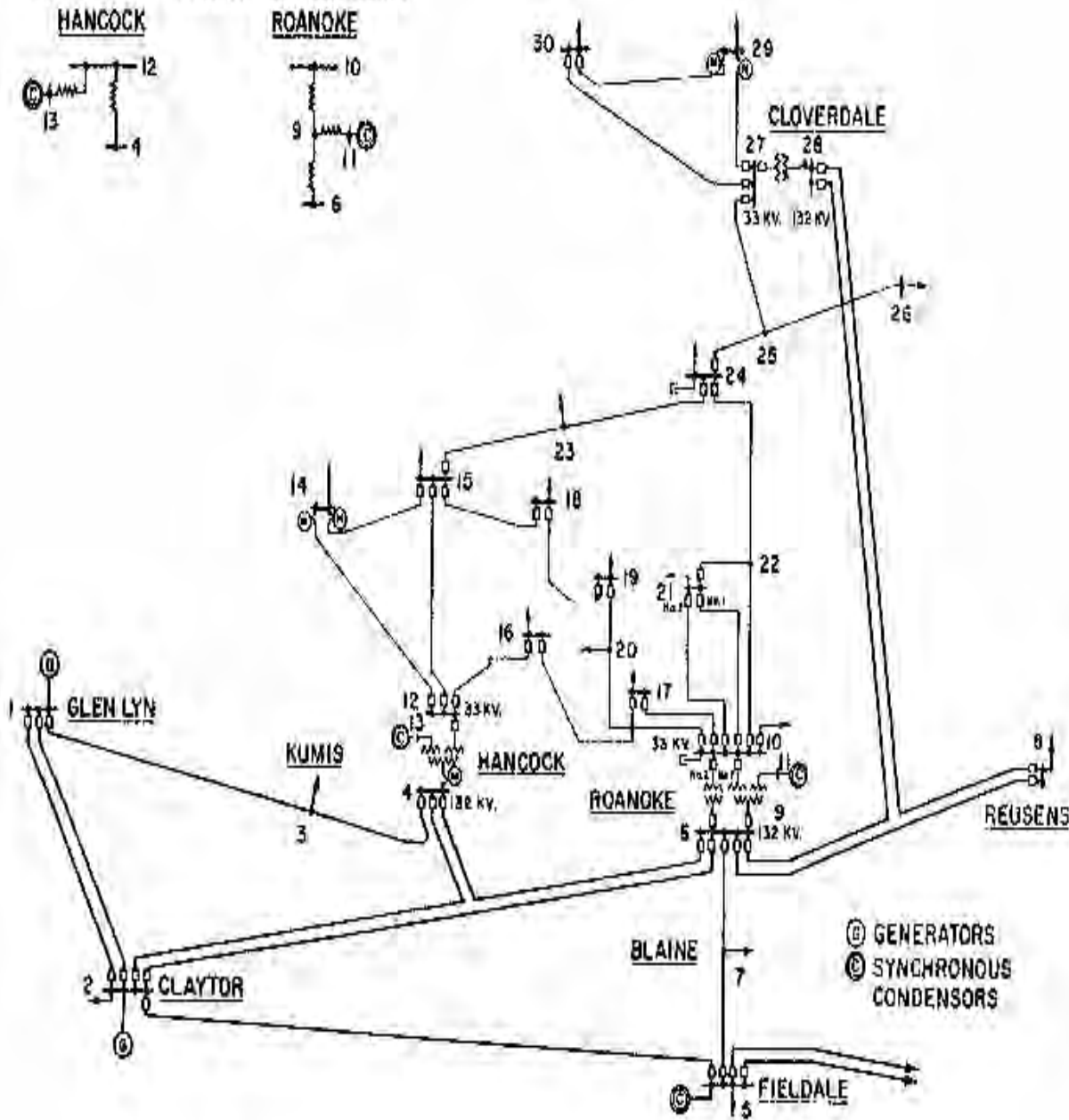
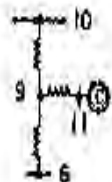


Figura B.4 - Sistema IEEE 30 barras.

Apêndice C

Este apêndice apresenta a publicação de artigos resultantes de trabalhos desenvolvidos em vínculos científicos até o momento.

C1 Publicações

CANOSSA, Jaine Henrique ; ALVES, D. A. ; MATARUCCO, Rogério Rocha . Desenvolvimento de uma interface gráfica interativa para o programa de fluxo de potência utilizando *MATLAB*. In: WCCSETE- World Congress on Computer Science, Engineering and Technology Education, 2006, Santos. **WORLD CONGRESS ON COMPUTER SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION**, v. 1, p. 1112-1116, 2006.

CANOSSA, Jaine Henrique ; ALVES, D. A. . Desenvolvimento de uma interface gráfica interativa para o programa de fluxo de potência utilizando *MATLAB*. In: **5 DINCOM - CONGRESSO TEMÁTICO DE APLICAÇÕES DE DINÂMICA E CONTROLE DA SBMC**, 2006, Guaratinguetá. Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da SBMC, v. 1., p. 1-10, 2006.

CANOSSA J.H. MALANGE F.C.V; ALVES D.A., O Papel da barra de folga ou oscilante (*Slack* ou *Swing*) no fluxo de carga Parte II: referência angular, **ICECE'2007** –

INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION, Monguaguá, Mar. 2007.

CANOSSA J.H; MALANGE F.C.V; ALVES D.A., "O Papel da barra de folga ou oscilante (*Slack* ou *Swing*) no fluxo de carga Parte I: influência no balanço de potência do sistema e nas perdas na transmissão, **ICECE'2007 – INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND COMPUTER EDUCATION**, Monguaguá, Mar. 2007.