



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**ESTUDO DE ÍNDICES PARA ANALISE DE
ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Elizete de Andrade Amorim

Ilha Solteira - SP

ELIZETE DE ANDRADE AMORIM

**ESTUDOS DE ÍNDICES PARA ANÁLISE DE
ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida à Universidade
Estadual Paulista - UNESP, Campus de
Ilha Solteira, para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Proc. 071/2002 - NRD 044

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
06.05.02	30.05.02
REGISTRADO POR	TOMBO
ailza	Tc. 1284
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
ilustração autor R\$ 10,00	A524e

Dissertação submetida à Universidade
Estadual Paulista - UNESP, Campus de Ilha
Solteira, para a obtenção do título de Mestre
em Engenharia Elétrica.

169451
54187

Ilha Solteira, Agosto de 2001

30400007 ENGA. ELÉTRICA

A524e

1210001284



"Estudo de Índices para a Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica"

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Câmpus de Ilha Solteira - Faculdade de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Elizete de Andrade Amorim

ESTUDO DE ÍNDICES PARA ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TENSÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP, CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA, PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

Dissertação submetida à Universidade Estadual Paulista - UNESP, Câmpus de Ilha Solteira, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Autora : Elizete de Andrade Amorim

Orientador : José Roberto Sanches Mantovani

Colaborador : Edison Righeto

Ilha Solteira, Agosto de 2001

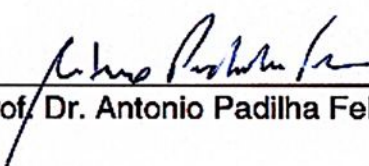
Ilha Solteira - SP, agosto de 2001



“Estudo de Índices para a Análise de Estabilidade de Tensão em Sistemas de Energia Elétrica”

Elizete de Andrade Amorim

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA – UNESP – COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA (ME).

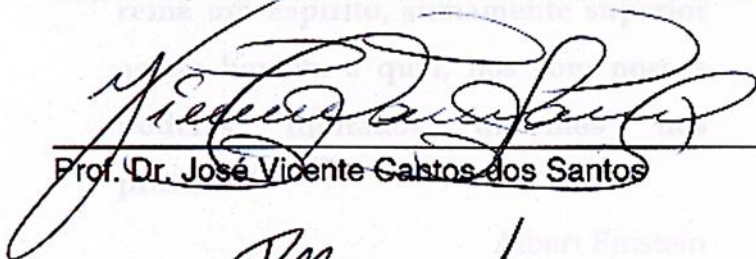


Prof. Dr. Antonio Padilha Feltrin – Coordenador

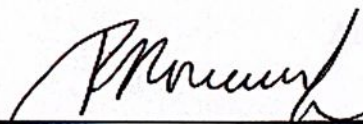
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani - orientador



Prof. Dr. José Vicente Castos dos Santos



Prof. Dr. Rubén Augusto Romero Lázaro

Ilha Solteira – SP, agosto de 2001

"Todo aquele que se dedica ao estudo da ciência descobre que no Universo reina um Espírito, sumamente superior ao do homem a qual, nós com nossos poderes limitados devemos nos prostrar."

Albert Einstein



Esta "Aos meus pais, Pedro e Eutímia,
desenvolvido pelo dom da minha vida!!!!!"

estudo) da Fundação Coordenação
de Aperfeiçoamento de Pessoa de
Nível Superior - CAPES



Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, que com dedicação, paciência e compreensão me auxiliou na execução deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Pedro e Eufímia, pelo incentivo e pelo apoio em todos os momentos da minha vida, pela confiança, pelo carinho e amor que sempre depositaram em mim e por serem, em sua simplicidade, os melhores pais que poderia desejar.

Ao meu irmão Elcio, que sempre esteve ao meu lado apoiando-me e incentivando-me em todos os momentos.

A minha grande amiga Mara Lúcia Martins Lopes, pelo carinho e atenção e principalmente por sempre estar ao meu lado, mesmo quando isto se tornava difícil.

Aos meus amigos que compartilharam comigo as derrotas e vitórias, em especial Marcelo Silva e Manoel Siqueira, pelo apoio e incentivo.

Aos técnicos do laboratório de Computação, Luciano, Adriano, Kosaka e Carlos Alex pelas muitas horas de dedicação de seu tempo e me auxiliou de certa forma no desenvolvimento do meu trabalho.

Esta dissertação de mestrado foi desenvolvida com o apoio (bolsa de estudo) da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior - CAPES.

Aos professores Dilson Amâncio Alves, Percival Bueno de Araújo e Edison Righeto, pelo seu apoio e suporte, que permitiu a compreensão de alguns tópicos deste trabalho e a professora Anna Diva Plascencia Lotufo pela sua colaboração.

Aqueles que não foram citados, mas de alguma forma contribuíram

Agradecimentos

Agradeço acima de tudo a Deus, que me concedeu força, saúde e perseverança para superar todos os obstáculos encontrados no caminho e continuar caminhando sempre em busca de meus sonhos, muito obrigada!

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. José Roberto Sanches Mantovani, que com dedicação, paciência e compreensão me auxiliou na execução deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, Pedro e Eutímia, pelo incentivo e pelo apoio em todos os momentos da minha vida, pela confiança, pelo carinho e amor que sempre depositaram em mim e por serem, em sua simplicidade, os melhores pais que poderia desejar.

Ao meu irmão Elzio, que sempre esteve ao meu lado apoiando-me e incentivando-me em todos os momentos.

A minha grande amiga Mara Lúcia Martins Lopes, pelo carinho e atenção e principalmente por sempre estar ao meu lado, mesmo quando isto se tornava difícil.

Aos meus amigos que compartilharam comigo as derrotas e vitórias, em especial Marcelo Siqueira Almeida (Cilim) e Marilene Mantovani pela força e apoio na realização do meu trabalho.

Aos técnicos do laboratório de computação Deoclécio Mitsuiti Kosaka e Carlos Alex pelas muitas vezes em que dispôs de seu tempo e me auxiliou de certa forma no desenvolvimento do meu trabalho.



Aos professores Dilson Amâncio Alves, Percival Bueno de Araújo e Edison Righeto, pelo seu apoio e suporte, que permitiu a compreensão de alguns tópicos deste trabalho e a professora Anna Diva Plasencia Lotufo pela sua colaboração.

Àqueles que não foram citados, mas de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço acima de tudo a Deus, que me concedeu força, saúde e perseverança para superar todos os obstáculos encontrados no caminho e continuar caminhando sempre em busca de meus sonhos, muito **obrigada!!!!**

Lista de Figuras	viii
Lista de Símbolos	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xiii
Resumo	xv
Abstract	xvi
1 Introdução	01
2 Os Conceitos de Estabilidade de Tensão	08
2.1 Formulação Básica do Fluxo de Potência	09
2.2 Controle de Tensão nas Barras-PV's	13
2.3 Colapso de Tensão	16
2.4 Interpretação Física	23
2.5 Curva PV	24
2.5.1 A curva PV e a Tangente de q	26
2.5.2 A curva PV e a Magnitude de tensão do Gerador (V_T)	27
2.5.3 A curva PV e a Tangente de q	28

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	x
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xiii
Resumo	xv
Abstract.....	xvi
1 Introdução.....	01
2 Os Conceitos de Estabilidade de Tensão.....	08
2.1 Formulação Básica do Fluxo de Potência	09
2.2 Controle de Tensão nas Barras PV's	13
2.3 Colapso de Tensão	16
2.4 Interpretação Física	23
2.5 Curva PV.....	24
2.5.1 A curva PV e a Tangente de φ	26
2.5.2 A curva PV e a Magnitude de tensão do Gerador (V1).....	27
2.5.3 A curva PV e a Tangente de φ	28

3	Técnicas para a Análise de Estabilidade de Tensão	31
3.1	Teoria das Bifurcações	32
3.1.1	A Bifurcação no Sistema de Potência	33
3.1.2	Bifurcação Sela-nó	34
3.2	Modelagem do Sistema de Potências	38
3.2.1	Análise Dinâmica	38
3.2.2	Análise Estática	39
3.3	Índices de Estabilidade	44
3.3.1	Decomposição em Valor Singular	45
3.3.1.1	Implementação da DVS	55
4	O Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa e a Estabilidade de Tensão	63
4.1	Formulação do Problema de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa	64
4.2	Implementação Computacional do Algoritmo	74
4.3	Carregamento do Sistema	76
5	Testes e Resultados	78
5.1	Sistema Hipotético de Três Barras	80
5.1.1	Fluxo de Carga Convencional (FCC)	81
5.1.2	Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)	83
5.1.3	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)	84
5.1.4	Decomposição em Valor Singular	86
5.2	Sistema AEP 30	87
5.2.1	Fluxo de Carga Convencional (FCC)	88
5.2.2	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)	90



5.2.3	Decomposição em Valor Singular.....	92
5.3	Sistema IEEE 118	93
5.3.1	Fluxo de Carga Convencional (FCC).....	95
5.3.2	Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)	97
5.3.3	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)	98
5.3.4	Decomposição em Valor Singular.....	100
5.4	Sistema Real Brasileiro de 309 Barras	102
5.4.1	Fluxo de Carga Convencional (FCC).....	103
5.4.2	Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)	104
5.4.3	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)	105
5.4.4	Decomposição em Valor Singular.....	107
5.5	Variação das Tensões nos Testes Realizados	108
5.6	As Potências Ativa e Reativa Geradas.....	113
5.7	Comentários Gerais.....	117
6	Conclusão.....	119
7	Referências Bibliográficas	122
Apêndice A		126



Figura 5.2 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional82

Figura 5.3 - Tensões na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência83

Figura 5.4 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de

Lista de Figuras

Figura 5.5 - Tensões na barra 3 em função do carregamento, utilizando a

Figura 2.1 - Controle de tensão em barras PV's.....15

Figura 2.2 - Sistema de duas barras (exemplo clássico).....18

Figura 2.3 - Variação da magnitude de tensão V_2 em função de P_{c_2} 22

Figura 2.4 - Curvas PV para diferentes $\tan \phi$ 27

Figura 2.5 - Curvas PV para diferentes magnitudes de tensão (V_1)28

Figura 2.6 - Curvas PV para diferentes reatâncias.....29

técnica de fluxo de carga convencional89

Figura 3.1 - Bifurcação sela-nó.....37

Figura 3.2 - Decomposição em Valores Singulares Aplicado a Matriz J57

Figura 3.3 - Decomposição em Valores Singulares Aplicado a Matriz J_r ...58

Figura 3.4 - Sistema de três barras.....59

Figura 3.5 - Valor Singular Mínimo das Matrizes J e J_r61

Figura 3.11 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de

Figura 4.1 - Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa75

Figura 5.12 - VSM em função do carregamento para as diferentes técnica

Figura 5.1 - Tensões na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica FCC82

Figura 5.2 – VSM em função do carregamento, utilizando a técnica fluxo de carga convencional	82
Figura 5.3 – Tensões na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	83
Figura 5.4 – VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	84
Figura 5.5 – Tensões na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	85
Figura 5.6 – VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	85
Figura 5.7 – VSM em função do carregamento para as diferentes técnica (FCC, CPR, CPAR)	86
Figura 5.8 – Tensões na barra 26 em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional	89
Figura 5.9 – VSM em função do carregamento, utilizando a técnica fluxo de carga convencional	90
Figura 5.10 – Tensões na barra 26 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	91
Figura 5.11 – VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	91
Figura 5.12 – VSM em função do carregamento para as diferentes técnica (FCC e CPAR)	93

Figura 5.13 - Tensões nas barras 43, 48 e 82 em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional	96
Figura 5.14 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica fluxo de carga convencional	96
Figura 5.15 - Tensões nas barras 48 e 82 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	97
Figura 5.16 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	98
Figura 5.17 - Tensões na barra 43 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	99
Figura 5.18 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	100
Figura 5.19 - VSM em função do carregamento para as diferentes técnica (FCC, CPR, CPAR)	101
Figura 5.20 - Tensões na barra 219 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	104
Figura 5.21 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa	105
Figura 5.22 - Tensões na barra 145 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	106
Figura 5.23 - VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência ativa e reativa	107



Figura 5.24 – VSM em função do carregamento para as diferentes técnica (CPR e CPAR)	108
Figura 5.25 – Tensões em função do carregamento para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas, obtidos através das técnicas FCC,CPR e CPAR	109
Figura 5.26 – Tensões em função do carregamento para o sistema AEP 30, obtidos através das técnicas FCC e CPAR	110
Figura 5.27 – Tensões em função do carregamento para o sistema IEEE 118, obtidos através das técnicas FCC, CPR e CPAR	111
Figura 5.28 – Tensões em função do carregamento para o sistema real, obtidos através das técnicas CPR e CPAR	112
Tabela 5.1 – Limites das barras de geração utilizados nas simulações do sistema AEP 30	108
Tabela 5.2 – Limites das barras de geração – Sistema IEEE 118	109
Tabela 5.3 – Limites das barras de geração – Sistema Real Brasileiro de 309 Barras	103
Tabela 5.4 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas de transmissão	113
Tabela 5.5 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema real AEP 30	114
Tabela 5.6 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema real IEEE 118	115

Tabela 5.7 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas de transmissão 116

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Dados das barras usados nas simulações do sistema hipotético de três barras	60
Tabela 3.2 – Dados das linhas usados nas simulações do sistema hipotético de três barras	60
Tabela 5.1 – Dados das barras de geração utilizados nas simulações do sistema AEP 30	88
Tabela 5.2 – Limites das barras de geração – Sistema IEEE 118	94
Tabela 5.3 – Limites das barras de geração – Sistema Real Brasileiro de 309 Barras	103
Tabela 5.4 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas de transmissão.....	113
Tabela 5.5 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema teste AEP 30	114
Tabela 5.6 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema teste IEEE 118	115

Tabela 5.7 – Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema

real brasileiro de 309 barras 116

Lista de Símbolos

J	=	Matriz Jacobiana do Fluxo de Carga;
V_k	=	Magnitude de Tensão na Barra k ;
θ_k	=	Ângulo de Fase da Tensão na Barra k ;
P_k	=	Injeção de Potência Ativa na Barra k ;
Q_k	=	Injeção de Potência Reativa na Barra k ;
V_R	=	Barra de Referência;
V_V	=	Barra de Tensão Controlada;
V_Q	=	Barra de Carga;
i, j, m	=	Números Índices;
G_k	=	Elemento de condutância na Barra k ;
z_{ik}	=	Impedância da Linha de Transmissão;
r_{ik}	=	Resistência da Linha de Transmissão;
x_{ik}	=	Reatância da Linha de Transmissão;
g_{ik}	=	Condutância série da Linha de Transmissão;
B_k	=	Elemento da susceptância na Barra k ;
b_{ik}	=	Susceptância série;
P_{Gk}	=	Potência Ativa Gerada na Barra k ;

Lista de Símbolos

J	=	Matriz Jacobiana do Fluxo de Carga;
V_k	=	Magnitude de Tensão na Barra k ;
θ_k	=	Ângulo de Fase da Tensão na Barra k ;
P_k	=	Injeção de Potência Ativa na Barra k ;
Q_k	=	Injeção de Potência Reativa na Barra k ;
$V\theta$	=	Barra de Referência;
PV	=	Barra de Tensão Controlada;
PQ	=	Barra de Carga;
i, k, m	=	Números Inteiros;
G_k	=	Elemento de condutância na Barra k ;
z_{lk}	=	Impedância da Linha de Transmissão;
r_{lk}	=	Resistência da Linha de Transmissão;
x_{lk}	=	Reatância da Linha de Transmissão;
g_{lk}	=	Condutância série da Linha de Transmissão;
B_k	=	Elemento da susceptância na Barra k ;
b_{lk}	=	Susceptância série;
P_{Gk}	=	Potência Ativa Gerada na Barra k ;



Q_{Gk}	=	Potência Reativa Gerada na Barra k;
P_{Ck}	=	Potência Ativa Consumida na Barra k;
Q_{Ck}	=	Potência Reativa Consumida na Barra k;
$V_k^{\min}$	=	Limite Inferior da Tensão na Barra k;
$V_k^{\max}$	=	Limite Superior da Tensão na Barra k;
$Q_{Gk}^{\min}$	=	Limite Inferior da Potência Reativa Gerada na Barra k;
$Q_{Gk}^{\max}$	=	Limite Superior da Potência Reativa Gerada na Barra k;
$P_{Gk}^{\min}$	=	Limite Inferior da Potência Ativa Gerada na Barra k;
$P_{Gk}^{\max}$	=	Limite Superior da Potência Ativa Gerada na Barra k;
$\theta_k^{\min}$	=	Limite Inferior do Ângulo de Fase da Tensão na Barra k;
$\theta_k^{\max}$	=	Limite Superior do Ângulo de Fase da Tensão na Barra k;
ΔQ_k	=	Variação da Potência Reativa na Barra k;
ΔP_k	=	Variação da Potência Ativa na Barra k;
$\in$	=	Pertence a;
$\Re$	=	Conjunto dos Números Reais;
I	=	Matriz Identidade;
U e V	=	Matrizes Unitárias;
Σ	=	Matriz Diagonal;
u_i e v_i	=	Vetor Coluna;
σ_i	=	Valores Singulares;
J_r	=	Matriz Jacobiana Reduzida do Fluxo de Carga;
T	=	Transposta;
$\Delta \sigma_i$	=	Escalar;



B_{sh}	=	Impedância Shunt das Barras
Y_{sh}	=	Impedância Shunt das Linhas
$C_{pgi} (P_{gi})$	=	Componente da função custo associada à potência ativa gerada na barra i ;
$C_{qgi} (Q_{gi})$	=	Componente da função custo associada à potência reativa gerada na barra i ;
$L(\underline{x}^*)$	=	Função Lagrangeana;
π	=	Multiplicador de Lagrange;
$\bar{\mu}P_i^*, \underline{\mu}P_i^*$	=	Multiplicador de Lagrange relacionado aos Limites de Superior e Inferior de Potência Ativa na barra i ;
$\bar{\mu}Q_i^*, \underline{\mu}Q_i^*$	=	Multiplicador de Lagrange relacionado aos Limites Superior e Inferior de Potência Ativa na barra i ;
$\bar{\mu}V_i^*, \underline{\mu}V_i^*$	=	Multiplicador de Lagrange relacionado aos Limites Superior e Inferior de Tensão na barra i ;
∇	=	Vetor Gradiente;
ΔP_{gi}	=	Variação da Potência Ativa gerada na Barra i ;
ΔQ_{gi}	=	Variação da Potência Reativa gerada na Barra i ;
$f(\underline{x})$	=	função escalar;
$g(\underline{x})$	=	vetor das restrições de igualdade;
$h(\underline{x})$	=	vetor restrições funcionais de desigualdade.

NBC	=	Número de Barras de Carga;
AEP	=	American Electrical Power;
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineers;
PLS	=	Programação Linear Sucessiva;
PL	=	Programação Linear;
CRIC	=	Constrained Reactive Impact Coupling;
pf	=	Fator de Potência;

Lista de Abreviaturas e Siglas

NOI	=	Nó Inicial da Linha;
NOF	=	Nó Final da Linha;
SEE	=	Sistemas de Energia Elétrica;
LT	=	Linha de Transmissão;
SEP	=	Sistema Elétrico de Potência;
DVS	=	Decomposição em valor Singular;
P	=	Potência Ativa;
Q	=	Potência Reativa;
P_{cr}	=	Ponto de Máxima Transferência de Potência ou Ponto Crítico;
V_{cr}	=	Tensão Crítica;
VSM	=	Valor Singular Mínimo;
tol	=	Tolerância;
p.u	=	por unidade;
FCC	=	Fluxo de Carga Convencional;
CPR	=	Controle Ótimo de Potência Reativa;
CPAR	=	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa;
FPO	=	Fluxo de Potência Ótimo;
KKT	=	Karush-Khun-Tucker;
NB	=	Número de Barras;
NBG	=	Número de Barras de Geração;



NBC	=	Número de Barras de Carga;
AEP	=	American Electrical Power;
IEEE	=	Institute of Electrical and Eletronics Engineers;
PLS	=	Programação Linear Sucessiva;
PL	=	Programação Linear;
CRIC	=	Constrained Reactive Implicit Coupling;
fp	=	Fator de Potência;
λ	=	Fator de Carregamento;
DAR	=	Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa;
NOI	=	Nó Inicial da Linha;
NOF	=	Nó Final da Linha;

Resumo

Abstract

A motivação para este trabalho foi a necessidade de ferramentas que auxiliem na análise de estabilidade de tensão. A metodologia proposta tem como objetivo determinar um ponto de operação seguro para os sistemas de energia elétrica, considerando os custos de geração ou de oferta de mercado, através do controle ótimo de potências ativa e reativa. A análise das condições de otimalidade de Karush-Khun-Tucker aplicadas ao controle ótimo de potências ativa e reativa fornece informações sobre os pontos de operação seguros e factíveis para o sistema de energia.

Os resultados apresentados, mostraram que as magnitudes de tensão dos sistemas testados permaneceram dentro dos seus limites operacionais e que ao aplicar a técnica de decomposição em valor singular verificou-se que a metodologia proposta é mais conservativa e não leva o sistema a operar em condições próximas de instabilidade de tensão.

Abstract

Needing tools to aid in voltage stability analysis leads to develop this work. The proposed methodology objects to find a secure operation point to electric power systems, considering the generation costs or market offert, by active and reactive power optimal control. The Karush-Kunh-Tucker optimality condition analysis applied to active and reactive power optimal control shows the factible and secure points to electrical energy systems. The present results to four test systems, show that the voltage magnitudes remain in the operational limits, and applying the decomposition technique by singular value, it is verified that the proposed methodology is more conservative, and there is no operation conditions near voltage instability.

Dentre os diversos incidentes ocorridos destacam-se [Kun93]:

- - Perturbação do sistema de New York Power Pool de 22 de setembro de 1970;

- - Perturbação do sistema da Flórida de 28 de dezembro de 1981;

- - Perturbações do sistema da França de 19 de dezembro de 1978 e 12 de agosto de 1987;

- - Perturbação do sistema do Norte da Bélgica de 04 de agosto de 1982;

- - Perturbação do sistema da Suécia de 27 de dezembro de 1983;

Os problemas de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica (SEE) normalmente ocorrem em sistemas altamente carregados e nestas condições há um declínio progressivo e descontrolado das tensões, conduzindo assim os sistemas ao colapso de tensão.

O colapso de tensão é o processo no qual as condições de operação (contingências ou aumento de cargas) conduzem os sistemas de potências a um perfil de tensão muito baixo em uma parte significativa dos sistemas [Kun93]. Os problemas de colapso de tensão, embora não sejam recentes, despertaram a atenção e o interesse dos pesquisadores da área de planejamento e operação em SEE após a década de setenta, sendo o principal motivo desta preocupação os vários incidentes ocorridos em diversas partes do mundo.

Dentre os diversos incidentes ocorridos destacam-se [Kun93]:

- Perturbação do sistema de New York Power Pool de 22 de setembro de 1970;
- Perturbação do sistema da Flórida de 28 de dezembro de 1982;
- Perturbações do sistema da França de 19 de dezembro de 1978 e 12 de janeiro de 1987;
- Perturbação do sistema do Norte da Bélgica de 04 de agosto de 1982;
- Perturbação do sistema Sueco de 27 de dezembro de 1983;
- Perturbação do sistema Japonês de 23 de julho de 1987.

Os incidentes citados acima evidenciaram que a tensão afeta a estabilidade do sistema e que diversos fatores podem contribuir para estes eventos, tais como:

- Perda de uma linha de transmissão;
- Aumento na carga;
- Mudanças de alguns parâmetros da rede (magnitude de tensão no gerador, reatância da linha e contingências).

As análises realizadas após alguns incidentes que levaram a problemas de estabilidade de tensão auxiliaram na compreensão e

identificação do fenômeno de colapso de tensão. Estas análises constataram que o colapso de tensão é uma consequência do problema de estabilidade, no qual o sistema progride em direção a um ponto de operação inaceitável, devido a problemas de tensão, resultando freqüentemente em *blecaute* ou separação do sistema em vários subsistemas ("ilhamento").

O estudo da estabilidade de tensão pode ser realizado através das análises dinâmica ou estática [Man93]. Na literatura existem diversas formas de abordagens usadas para a análise do fenômeno do colapso de tensão, uma das mais ricas é relacioná-la à bifurcação do tipo sela-nó, também conhecida como bifurcação estática, ponto singular, ponto crítico, ponto de colapso, ponto de máximo carregamento ou ponto de máxima transferência de potência. O ponto de bifurcação sela-nó é o ponto de equilíbrio do sistema, ou seja, é o ponto em que a matriz jacobiana do fluxo de potência (J) torna-se singular.

Uma outra forma de abordagem utilizada para a análise de estabilidade de tensão estática são os índices de estabilidade. Estes índices apresentam um valor definido no ponto de colapso. Existem diversas técnicas para a obtenção de índices de estabilidade, tais como: valor singular mínimo [Cañ96, Lof92, Lof93, Man93, Tir88, Zan94, Zan96], autovalor [Cañ96, Zan94, Zan96] e determinante do jacobiano reduzido

[Cañ96, Zan94, Zan96]. Dentre essas técnicas apenas a decomposição em valor singular será detalhada neste trabalho.

A técnica de decomposição em valor singular é empregada em sistemas de potências para analisar a singularidade da matriz jacobiana do fluxo de potência. Trata-se de uma medida matemática, que indica a distância entre um determinado ponto de operação e o ponto de colapso.

Neste trabalho aborda-se o problema de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica, através de uma metodologia baseada na solução do problema de fluxo de carga ótimo com ênfase no despacho de potências ativa e reativa.

O controle ótimo de potências ativa e reativa é um problema de programação não linear de grande porte, utilizado como ferramenta para determinar o melhor ponto de operação de um sistema elétrico de potência (SEP), considerando os custos de geração ou de oferta de energia no mercado. Para o consumidor é interessante comprar energia a preços mais acessíveis, mas uma análise técnica é necessária para não colocar o sistema sob o risco de instabilidade.

A técnica de decomposição em valor singular foi utilizada como suporte para validar esta metodologia, que a partir das condições de otimalidade de Karush-Khun-Tucker [Baz93] aplicadas ao problema de

controle ótimo de potências ativa e reativa, analisa as condições de factibilidade de operação da rede para cada cenário pré estabelecido (contingências ou cargas), concluindo-se assim sobre a análise da estabilidade de tensão.

Para a solução do problema de controle ótimo de potências ativa e reativa, o problema de programação não linear foi linearizado em torno de um ponto de operação e a técnica de solução adotada foi a Programação Linear Sucessiva [Stott83], utilizando-se o método simplex [Baz93].

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, que serão expostos resumidamente a seguir:

No capítulo 1 apresentam-se as motivações do trabalho, proposta para a análise do problema de estabilidade de tensão e a sua organização.

No capítulo 2 abordam-se os conceitos de estabilidade de tensão, criando os subsídios necessários para o entendimento do problema de estabilidade de tensão. Formula-se o problema de fluxo de carga e a sua solução através do método de Newton com controle de geração de potências ativa e reativa em barras de tensão controlada e explica o colapso de tensão através das curvas PV plotadas para diferentes mudanças de parâmetros da rede.

O capítulo 3 tem por finalidade apresentar algumas ferramentas e técnicas utilizadas para a análise da estabilidade de tensão. Neste trabalho a análise da estabilidade de tensão é realizada através das técnicas estáticas e como ferramenta para este estudo fez-se uso dos índices de estabilidade. Das diversas técnicas para a obtenção de índices de estabilidade existentes na literatura a única estudada foi a decomposição em valor singular (DVS), as outras foram apenas comentadas por não se tratar de técnicas utilizadas nesta pesquisa.

No capítulo 4, será introduzida a metodologia proposta neste trabalho para a análise do problema de estabilidade de tensão com base no problema de controle ótimo de potências ativa e reativa e as condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker aplicadas ao mesmo. Neste capítulo, também serão apresentadas a formulação e a implementação computacional do problema de controle ótimo de potências ativas e reativas.

Os resultados, comentários e discussões dos testes realizados utilizando a técnica proposta e a decomposição em valor singular para um sistema hipotético de três barras e três linhas, os sistemas elétricos testes AEP 30 [Fre68] e IEEE 118 [Lebl84] e um sistema real brasileiro de 309 barras, serão enfatizados no capítulo 5.

E para finalizar, no capítulo 6 serão apresentadas as principais conclusões deste trabalho e as perspectivas para futuras pesquisas através das técnicas utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

2 Os Conceitos de Estabilidade de Tensão

Até a década de setenta os sistemas de potência eram operados em uma condição de baixo carregamento, sendo a capacidade de transmissão limitada pela capacidade térmica das linhas de transmissão ou pela estabilidade dos ângulos. Após esta década, ocorreram uma série de incidentes, que ao serem analisados evidenciaram que a tensão também poderia afetar a estabilidade dos sistemas e então a análise de estabilidade de tensão começou a ganhar destaque por parte dos pesquisadores da área de planejamento e operação em sistemas de energia elétrica.

Nos últimos anos muitos pesquisadores têm-se dedicado a procura de métodos para otimizar a utilização dos recursos e equipamentos dos sistemas de potência, que fizeram com que estes começassem a operar muito acima dos seus limites de carregamento. Uma vez que os sistemas têm sido operado sob crescente condição de carregamento, suas perdas

2

Os Conceitos de Estabilidade de Tensão

Até a década de setenta os sistemas de potências eram operados em uma condição de baixo carregamento, sendo a capacidade de transmissão limitada pela capacidade térmica das linhas de transmissão ou pela estabilidade dos ângulos. Após esta década, ocorreram uma série de incidentes, que ao serem analisados evidenciaram que a tensão também poderia afetar a estabilidade dos sistemas e então a análise de estabilidade de tensão começou a ganhar destaque por parte dos pesquisadores da área de planejamento e operação em sistemas de energia elétrica.

Nos últimos anos muitos pesquisadores têm-se dedicado a procura de métodos para otimizar a utilização dos recursos e equipamentos dos sistemas de potências, que fizeram com que estes começassem a operar muito acima dos seus limites de carregamento. Uma vez que os sistemas têm sido operado sob crescente condição de carregamento, suas perdas

também aumentaram, levando os mesmos a operarem em uma região na qual não há mais controle de tensão. Quando os sistemas de potências são operados nestas condições, as ações de controle e os operadores nada podem fazer para reduzir o decaimento da tensão em algumas barras e nestas condições o colapso de tensão é inevitável.

O objetivo deste capítulo é introduzir os conceitos de estabilidade de tensão, criando subsídios necessários para o entendimento do problema de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica.

2.1 Formulação Básica do Fluxo de Potência

O cálculo do fluxo de potência padrão ou fluxo de carga convencional (FCC) consiste em determinar as grandezas que representam o comportamento da rede em regime permanente. Um sistema de equações não-lineares é obtido impondo-se o princípio da conservação de potências ativa e reativa em cada barra da rede. A resolução deste sistema de equações fornece o estado da rede, isto é, a tensão fasorial em cada barra e os *taps* dos transformadores. Com o estado da rede conhecido, calculam-se as outras grandezas de interesse, tais como:

- os fluxos ativos e reativos nas LT e nos transformadores;



- as gerações de potências reativas nas barras de controle de reativos e a geração da potência ativa da barra de referência (*slack*);
- as perdas de potência ativa no sistema.

Como apresentado em [Mont83], o FCC pode ser formulado por equações não-lineares e inequações que representam as restrições de operação dos sistemas elétricos de potências. Para a formulação mais básica do problema (exemplo clássico), a cada barra da rede são associadas quatro grandezas físicas. Sendo elas:

V_k - magnitude da tensão na barra k ;

θ_k - ângulo de fase da barra k ;

P_k - potência ativa líquida injetada na barra k ;

Q_k - potência reativa líquida injetada na barra k .

Somente duas grandezas físicas em cada barra são conhecidas inicialmente, sendo que através da solução do FCC obtém-se as duas restantes. Assim, as barras do sistema são classificadas, basicamente, em três tipos:

a) *Barra de referência ou barra $V\theta$:*

- são dados V_k e θ_k , (θ_k é considerado como referência angular para a rede elétrica; geralmente é fixado em 0 rad);
- são calculados P_k e Q_k .

b) *Barra de tensão controlada ou barra PV:*

- são dados P_k e V_k ;
- são calculados Q_k e θ_k .

c) *Barra de carga ou barra PQ:*

- são dados P_k e Q_k ;
- são calculados V_k e θ_k .

No equacionamento do problema de FCC a cada barra do sistema impõe-se a primeira lei de Kirchhoff, na qual as injeções de potências ativa e reativa em uma barra são iguais a soma dos fluxos que deixam a barra através das LT e transformadores. Desta forma, obtêm-se as seguintes equações:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k(\theta, V) = 0 \quad (2.1)$$

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k(\theta, V) = 0 \quad (2.2)$$

em que:



$P_k^{esp} = P_{g_k} - P_{c_k}$ - potência ativa especificada na barra k;

$Q_k^{esp} = Q_{g_k} - Q_{c_k}$ - potência reativa especificada na barra k;

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

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

P_{g_k} - potência ativa gerada na barra k;

P_{c_k} - potência ativa consumida na barra k;

Q_{g_k} - potência reativa gerada na barra k;

Q_{c_k} - potência reativa consumida na barra k;

V_k - tensão na barra k;

V_m - tensão na barra m;

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ - ângulo da tensão nas barras k e m, respectivamente;

$Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$ - admitância da linha entre as barras k e m;

Ω_k - conjunto de todas as barras vizinhas à barra k, mais a própria barra k.

As restrições de operação do problema de FCC são dadas por:

- limites das tensões nas barras de carga:

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad (2.3)$$

- limites de injeções de reativos nas barras PV:

$$Q_k^{\min} \leq Q_k \leq Q_k^{\max} \quad (2.4)$$

Para a solução das equações (2.1) e (2.2) é necessário a utilização de métodos iterativos, dentre os quais destacam-se os métodos de Gauss-Seidel e o de Newton-Raphson e suas variações tais como desacoplado [Stt72] e desacoplado rápido [stt74].

A solução do problema de FCC é alcançada quando ΔP_k e ΔQ_k possuem um erro menor que uma tolerância previamente determinada e todas as restrições de operação são satisfeitas.

2.2 Controle de Tensão nas Barras PV's

Na seção anterior foram apresentadas as equações básicas do fluxo de carga. Contudo além destas equações, um sistema de energia elétrica possui uma série de dispositivos de controle que influenciam diretamente nas condições de operação e, portanto, devem ser incluídos na modelagem do sistema para que se possa simular corretamente o seu desempenho [Mont83]. Desta forma, na formulação básica do problema de fluxo de carga deve-se incorporar as equações que representam os dispositivos de controle e as inequações associadas aos limites de operação do sistema.

Entre os controles que geralmente são representados em programas de fluxo de carga estão: o controle de magnitude de tensão nodal por injeções de reativos, o controle de magnitude de tensão nodal por ajuste de



tap e o controle de intercâmbio entre áreas. Os limites de operação mais comuns são: limites de injeção de potência em barras PV's, limites de tensão em barras PQ's e limites dos *taps*. O objetivo desta seção é discutir o controle de tensão nas barras PV's na solução do fluxo de potência.

O controle de tensão em uma barra PV é realizado quando a potência reativa gerada de uma determinada barra ultrapassa um de seus limites ($Q_{g_k}^{\min} \leq Q_g \leq Q_{g_k}^{\max}$), nesta condição, o tipo desta barra é redefinido, passando de PV para PQ (neste caso, esta barra também é chamada de PV modificada) e as tensões passam a ser liberadas. Após uma barra PV ter sido transformada em PQ, deve-se testar a cada iteração a possibilidade desta barra ser reconvertida a seu tipo original, ou seja PV.

O diagrama de bloco apresentado na Figura 2.1, ilustra esse mecanismo de controle que é inserido no programa convencional para o cálculo do fluxo de carga.

Figura 2.1: Controle de tensão em barras PV's

Na Figura 2.1, deve-se fazer as seguintes considerações:

- Barras PV's = tipo 2
- Barras PV's modificadas = tipo -1

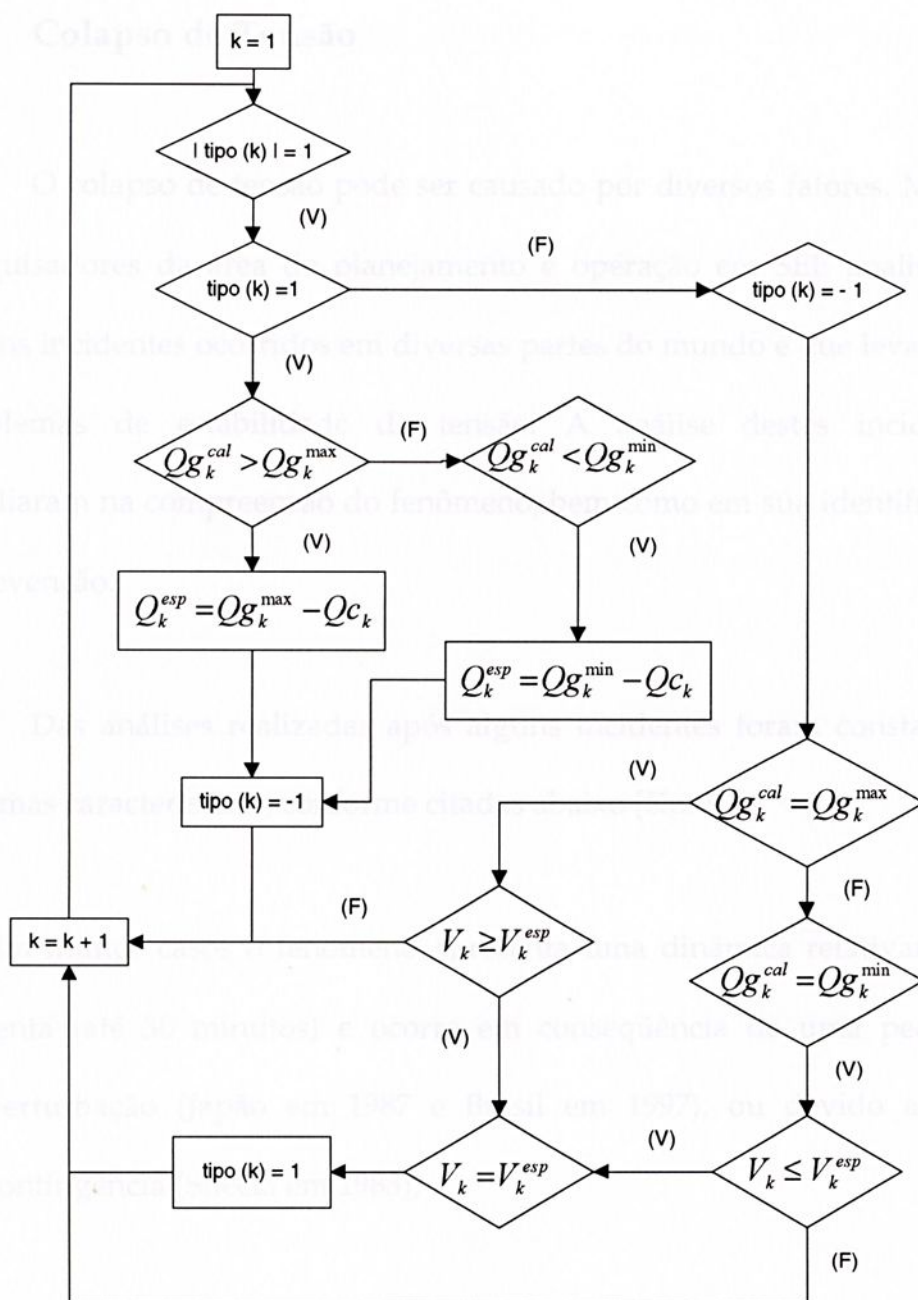


Figura 2.1: Controle de tensão em barras PV's.

Na Figura 2.1, deve-se fazer as seguintes considerações:

- Barras PV's = tipo 1;
- Barras PV's modificadas = tipo -1.

2.3 Colapso de Tensão

O colapso de tensão pode ser causado por diversos fatores. Muitos pesquisadores da área de planejamento e operação em SEE analisaram alguns incidentes ocorridos em diversas partes do mundo e que levaram a problemas de estabilidade de tensão. A análise destes incidentes auxiliaram na compreensão do fenômeno, bem como em sua identificação e prevenção.

Das análises realizadas após alguns incidentes foram constatadas algumas características, conforme citadas abaixo [Kun93]:

- Em muitos casos o fenômeno apresenta uma dinâmica relativamente lenta (até 30 minutos) e ocorre em consequência de uma pequena perturbação (Japão em 1987 e Brasil em 1997), ou devido a uma contingência (Suécia em 1983);
- Em alguns casos o fenômeno pode não estar associado ao aumento de carga do sistema mas ao aumento do carregamento das interligações após a ocorrência de alguma contingência interna, como é o caso do sistema finlandês (parte do sistema Nordel – Nordic Power System que inclui a Finlândia, Suécia, Noruega e parte da Dinamarca), ou a transferência de potência pelo sistema pertencente a uma determinada concessionária devido à contingência em uma outra concessionária,

como no caso do sistema PJM (Pennsylvania – New Jersey – Maryland);

- No período que precede o fenômeno, a frequência mantém-se normal ou ligeiramente maior e os ângulos das barras também mantêm-se praticamente constante (França, dezembro de 1978);
- Um caso considerado muito interessante devido à suas características atípicas foi o ocorrido na França (janeiro, 1978). A estabilização deu-se em níveis muito baixos (0,5 a 0,8 p.u.) ao invés do sistema entrar em colapso e após 6 minutos a rejeição de carga restabeleceu novamente as tensões.

Maiores descrições destes eventos podem ser encontrados de forma resumida em [IEEE90].

O fenômeno da instabilidade de tensão está associado a um rápido decaimento da tensão, que pode ter sido provocado por um crescente aumento no carregamento do sistema. Quando o sistema é operado próximo ao limite de estabilidade, a tensão em algumas barras reduz-se rapidamente e nestas condições há pouco ou nada a ser feito para prevenir o decaimento.



Geralmente as tensões de algumas barras são controladas através do aumento de geração da potência reativa, mudanças de tap ou capacitores variáveis. Como alguns destes dispositivos atingiram seus limites, o controle das tensões torna-se impossível, e para um determinado carregamento do sistema, pode ocorrer o colapso de tensão total (*blecaute*) ou parcial.

Os conceitos básicos relacionados ao colapso de tensão através da análise que utiliza a curva PV [Tir88] podem ser introduzidos através das expressões analíticas, obtidas para um sistema simples de duas barras, interligados por uma LT, como o mostrado na Figura 2.2.

Sejam as equações de fluxo de potência relacionadas ao circuito da Figura 2.2.

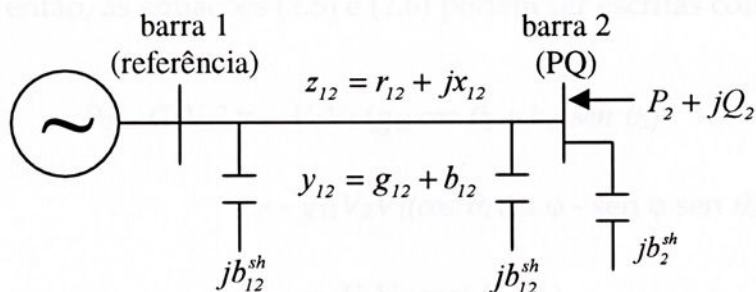


Figura 2.2: Sistema de duas barras (exemplo clássico).

- Admitância da Linha de Transmissão 1-2:

$$y_{12} = g_{12} + jb_{12} = \frac{r_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} + j \frac{(-x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = y_{12}(\cos \varphi - j \sin \varphi)$$

em que

$$\varphi = \tan^{-1}(x_{12}/r_{12})$$

- Injeções de potências ativa e reativa na barra 2:

$$P_2 = P_{g2} - P_{c2} = G_2 V_2^2 - V_2 V_1 (g_{12} \cos \theta_{21} + b_{12} \sin \theta_{21}) \quad (2.5)$$

$$Q_2 = Q_{g2} - Q_{c2} = -B_2 V_2^2 - V_2 V_1 (g_{12} \sin \theta_{21} - b_{12} \cos \theta_{21}) \quad (2.6)$$

sendo:

$$G_2 = g_{12};$$

$B_2 = b_{12}$ (elementos *shunt* de barra e de linha foram desprezados).

A barra 1 foi adotada como referência angular ($\theta_1 = 0$), desta forma, $\theta_{21} = \theta_2$ e então, as equações (2.5) e (2.6) podem ser escritas como segue:

$$\begin{aligned} P_2 - G_2 V_2^2 &= -V_2 V_1 (g_{12} \cos \theta_2 + b_{12} \sin \theta_2) \\ &= -y_{12} V_2 V_1 (\cos \theta_2 \cos \varphi - \sin \varphi \sin \theta_2) \\ &= -y_{12} V_2 V_1 \cos(\theta_2 + \varphi) \end{aligned} \quad (2.7)$$

e

$$\begin{aligned} Q_2 + B_2 V_2^2 &= -V_2 V_1 (g_{12} \sin \theta_2 - b_{12} \cos \theta_2) \\ &= -y_{12} V_2 V_1 (\sin \theta_2 \cos \varphi - \sin \varphi \cos \theta_2) \\ &= -y_{12} V_2 V_1 \sin(\theta_2 + \varphi) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Elevando ambos os lados das equações (2.7) e (2.8) ao quadrado e somando-as a seguir, obtém-se:

$$(P_2 - G_2 V_2^2)^2 + (Q_2 + B_2 V_2^2)^2 = V_2^2 V_1^2 (g_{12}^2 + b_{12}^2) = V_2^2 V_1^2 y_{12}^2 \quad (2.9)$$

Obtendo-se uma equação biquadrática, para ser utilizada no cálculo do módulo da tensão na barra 2.

$$(G_2^2 + B_2^2) V_2^4 - (2(G_2 P_2 - B_2 Q_2) + y_{12}^2 V_1^2) V_2^2 + (P_2^2 + Q_2^2) = 0 \quad (2.10)$$

Neste trabalho, para traçar a curva PV considera-se apenas a potência consumida da barra 2, então a Equação (2.10) pode ser escrita da seguinte forma:

$$(G_2^2 + B_2^2) V_2^4 + (2(G_2 P_{c2} - B_2 Q_{c2}) - y_{12}^2 V_1^2) V_2^2 + (P_{c2}^2 + Q_{c2}^2) = 0 \quad (2.11)$$

Por praticidade e sem perda de generalidade, definem-se:

$$a = (G_2^2 + B_2^2) \quad (2.12)$$

$$b = (2(G_2 P_{c2} - B_2 Q_{c2}) - y_{12}^2 V_1^2) \quad (2.13)$$

$$c = (P_{c2}^2 + Q_{c2}^2) \quad (2.14)$$

Desprezando a resistência da linha de transmissão (r_{12}), segue-se que:

$$G_2 = \frac{r_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = 0 \quad (2.15)$$

e

$$B_2 = \frac{-x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{-1}{x_{12}} \quad (2.16)$$

Aplicando as equações acima nas equações (2.12) e (2.13) e fazendo

$Q_{C2} = \tan \varphi P_{C2}$, para a Equação (2.14), obtém-se:

$$a = \frac{1}{x_{12}^2}$$

$$b = \frac{2P_{c2} \tan \varphi}{x_{12}} - \frac{V_1^2}{x_{12}^2}$$

$$c = P_{c2}^2 (1 + \tan^2 \varphi)$$

consequentemente, a Equação (2.11) pode ser escrita como segue:

$$aV_2^4 + bV_2^2 + c = 0 \quad (2.17)$$

que apresentará solução real sempre que:

$$\Delta = b^2 - 4ac \geq 0 \quad (2.18)$$

Para todo P_{c2} , Q_{c2} , e V_1 que satisfazem a Equação (2.18), o módulo da tensão na barra 2 será dado pela equação abaixo:

$$V_2 = \pm \frac{\sqrt{-b \pm \sqrt{\Delta}}}{2a} \quad (2.19)$$

A Figura 2.3 ilustra de forma genérica a Equação (2.19) e mostra que para cada valor de P_{c2} , existem dois possíveis valores para V_2 , um para o sinal positivo (região AB) e outro para o sinal negativo (região DB) da equação.

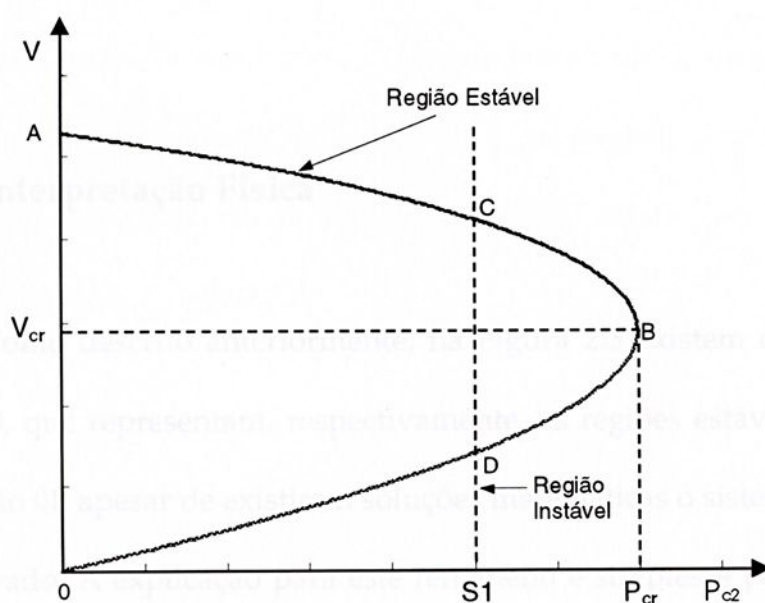


Figura 2.3: Variação da magnitude de tensão V_2 em função de P_{c2} .

Na região AB encontram-se as soluções de alta tensão ou soluções estáveis, enquanto, na região 0B encontram-se as soluções de baixa tensão ou soluções instáveis. Pode-se observar que aumentando a carga da barra 2, os valores das tensões na região AB diminuem, enquanto na região 0B aumentam.

O ponto B representa um ponto extremo, isto é, o ponto no qual a curva inverte a direção. Pode-se concluir que neste ponto, para uma dada carga na barra 2 a solução para V_2 é única (condição em que $\Delta = 0$ na Equação (2.18)), ou seja, o sistema atingiu o ponto de máxima transferência de potência ou ponto crítico (P_{cr}), sendo a tensão correspondente a este ponto chamada de tensão crítica (V_{cr}).

2.4 Interpretação Física

Como descrito anteriormente, na Figura 2.3 existem duas regiões, AB e 0B, que representam, respectivamente, as regiões estável e instável. Na região 0B apesar de existirem soluções matemáticas o sistema não pode ser operado. A explicação para este fenômeno é simples e pode ser dada da seguinte forma [Gupta90]:

- Suponha que o sistema esteja operando, para um nível de carga S_1 .

Operando na região AB da curva representada pela Figura 2.3, se a

carga aumenta (devido a uma perturbação ou variação nas condições operacionais) o sistema é capaz de suprir esta carga adicional sem nenhum problema. Como esperado, o único fato adicional que ocorrerá é uma ligeira diminuição na tensão terminal (V_2);

- Agora operando na região OB, sobre as mesmas condições citadas acima, pela Figura 2.3, observa-se que para o sistema suprir o aumento da carga, a tensão na barra 2 também aumentará. Em outras palavras pode-se dizer que na região OB, um aumento na carga irá requerer um aumento simultâneo na tensão final (V_2), o que é impossível porque isto viola uma lei fundamental para o fluxo de eletricidade. Devido a essa violação essa região é chamada região instável, isto é, a rede não pode ser operada, nesta região. Consequentemente, qualquer discussão em relação à operação na região OB é puramente acadêmica e toda análise relacionada ao problema de tensão “*steady state*”, na prática, enfoca apenas a região AB.

2.5 Curva PV

A curva PV é a curva de máxima transferência de potência em função da tensão da barra de carga para um dado fator de potência [Cigré92]. A curva PV para um sistema de potência AC, relaciona a tensão



em uma dada barra em função da variação da potência ativa nesta barra, quando algum parâmetro do sistema ou da carga varia.

Esta curva tornou-se um dos principais instrumentos nos estudos operacionais e de planejamento em sistemas de potências, pois são úteis para as análises conceituais de estabilidade de tensão. O benefício desta metodologia de análise é que esta curva provê uma indicação da proximidade do ponto de colapso ao longo de uma faixa de variação de carga para a rede em análise [Alves00].

Através das curvas PV pode-se observar a potência máxima de carga que pode ser conectada em uma determinada barra, e sempre que a carga exceder o sistema poderá entrar em colapso. Nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 o ponto B representa a máxima transferência de potência, que é o limite teórico para o carregamento da rede, considerando-se cada uma de suas barras.

Nas próximas seções serão apresentadas análises dos efeitos das variações de cada um dos três parâmetros ($\tan \phi$, magnitude de tensão do gerador (V_1) e reatância da linha) na curva PV para o sistema de duas barras da Figura 2.2. Quando estes parâmetros são variados os valores de V_2 e Q_{C2} são automaticamente ajustados.



2.5.1 A Curva PV e a Tangente de φ

A Figura 2.4 apresenta quatro curvas PV para quatro valores distintos da $\tan \varphi$. Em cada curva a potência reativa é ajustada automaticamente. Adotando como referência a magnitude de tensão na barra, e definindo o ângulo φ como $\varphi = \arctan \frac{Q}{P}$ e o fator de potência como $\cos \varphi$, então, se $\tan \varphi$ apresenta sinal negativo, significa que a potência reativa é capacitiva, caso contrário, indutiva.

A magnitude de tensão V_1 e a reatância da linha (x_{12}) são mantidas constantes, e respectivamente iguais a 1.0 pu e 0.1 pu.

Da Figura 2.4 pode-se extrair as seguintes observações:

- Para cada valor da tangente de φ existe um ponto crítico além do qual não há transmissão de potência ativa;
- Para cada nível de potência ativa, exceto no ponto crítico, existem dois pontos de operação para a tensão V_2 . Um é o ponto de operação de alta tensão (ponto de operação estável) e o outro na qual a tensão é menor que a tensão crítica (ponto de operação instável);

- No ponto crítico (B), a derivada da potência ativa em relação a tensão de uma determinada barra, neste caso, barra 2, torna-se zero. Se a carga tende a aumentar além deste ponto crítico, então o sistema não possuirá um ponto de operação factível o que resultará no colapso.

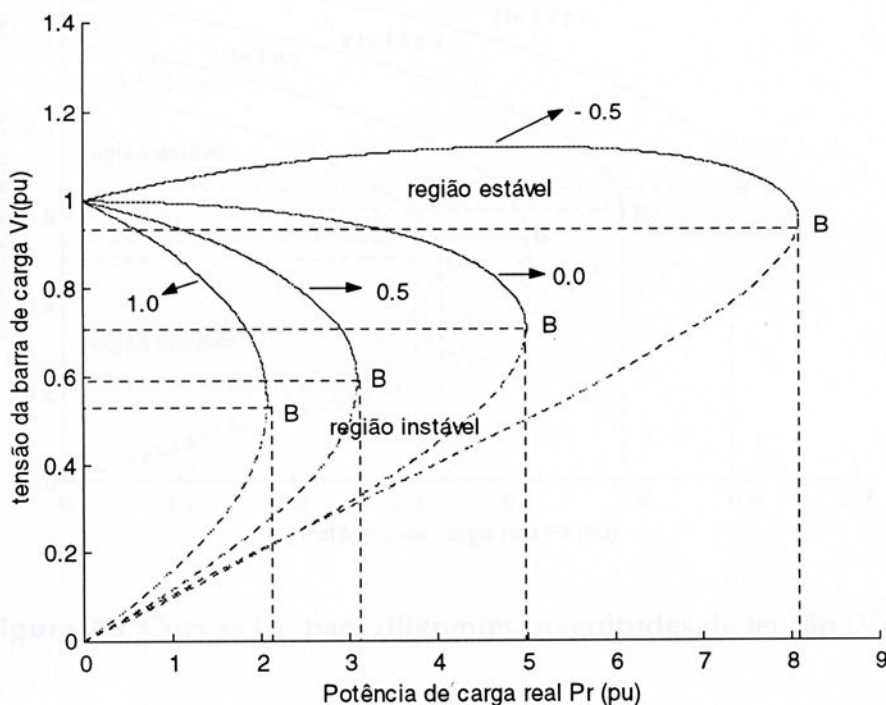


Figura 2.4: Curvas PV para diferentes $\tan \phi$.

2.5.2 A Curva PV e a Magnitude de Tensão do Gerador (V_1)

A Figura 2.5 ilustra a variação (comportamento) da potência ativa na barra 2 (P_{C2}) para quatro valores distintos de V_1 . Através desta figura

pode-se observar que um aumento na magnitude de tensão na barra 1 (V_1) acarretará no aumento da máxima potência disponível.

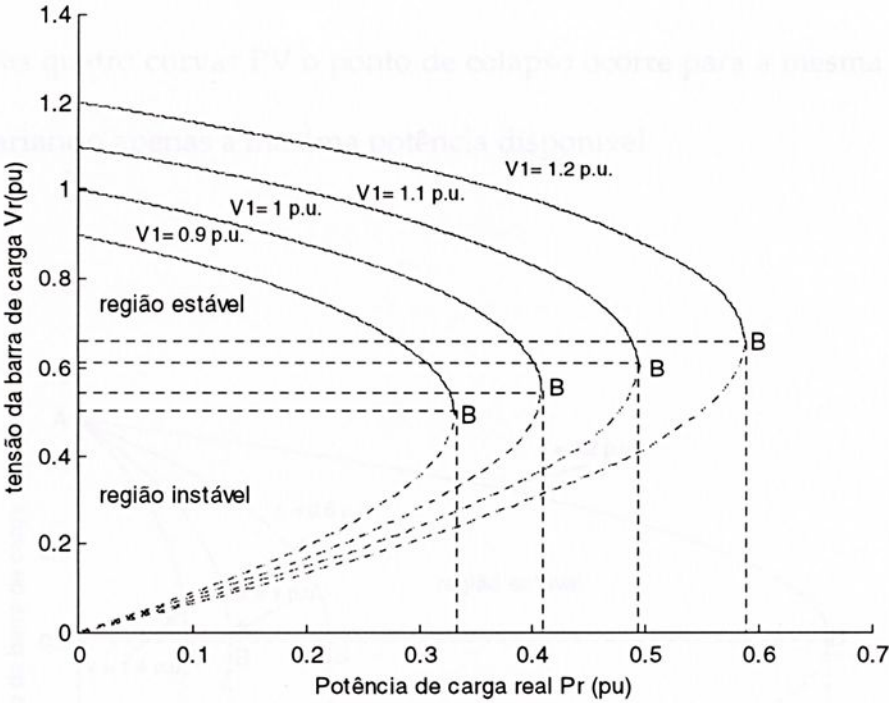


Figura 2.5: Curvas PV para diferentes magnitudes de tensão (V_1).

2.5.3 A Curva PV e Reatância da Linha de Transmissão

A influência da reatância da linha de transmissão na curva PV é analisada mantendo os parâmetros V_1 e $\tan \phi$ constantes. Da Figura 2.6 verifica-se que:

- No ponto A, a magnitude da tensão na carga é igual a magnitude da tensão no gerador, o que permite concluir que o circuito está aberto;
- O ponto 0 é o ponto de curto circuito e neste ponto a tensão V_2 é nula;
- Nas quatro curvas PV o ponto de colapso ocorre para a mesma tensão, variando apenas a máxima potência disponível.

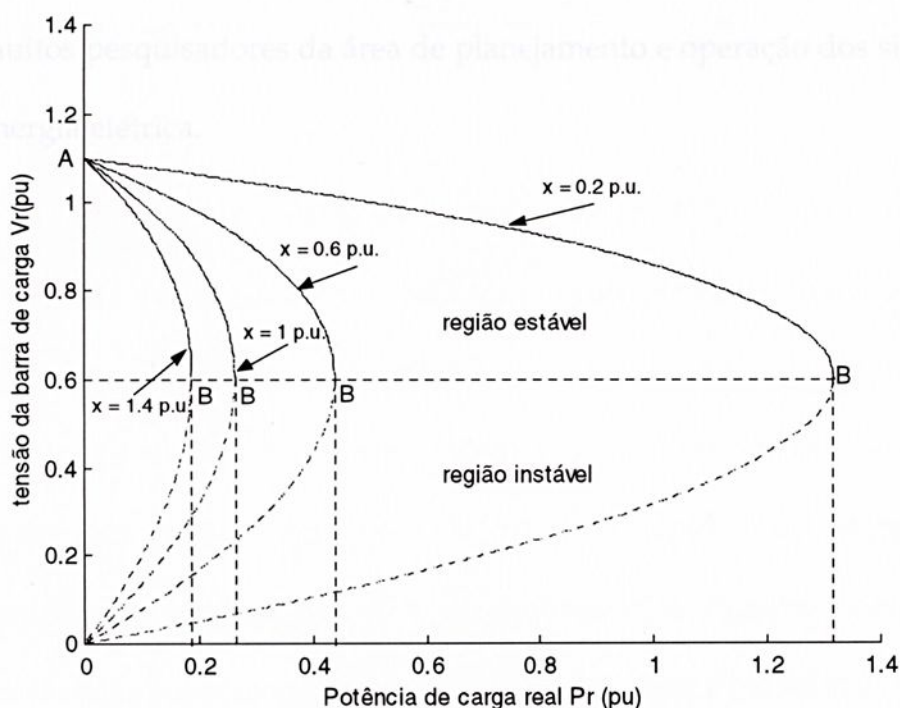


Figura 2.6: Curvas PV para diferentes reatâncias.

Para ilustrar esta curva a reatância da linha sofreu um aumento, e quando este parâmetro aumenta o sistema enfraquece e com isso o ponto de colapso deve ocorrer para potências menores.

Desta forma, pode-se dizer que o fato mais importante que ocorre quando este parâmetro sofre variações é que a tensão para a máxima transferência de potência continua a mesma. Nos últimos anos com o desenvolvimento da tecnologia em eletrônica de potência permitindo a construção de dispositivos de controle estático de alta tensão, a análise da variação deste parâmetro para melhorar a capacidade de transferência de potência nos sistemas de energia elétrica, tem merecido atenção especial de muitos pesquisadores da área de planejamento e operação dos sistemas de energia elétrica.



3.1 Teoria das Bifurcações

3

Técnicas para Análise de Estabilidade de Tensão

As análises do desempenho dos sistemas de potências quanto à estabilidade de tensão são realizadas principalmente para atender necessidades tais como: identificar os pontos fracos dos sistemas de transmissão e estabelecer as ações objetivando reforçar o desempenho dos sistemas para futuros aumentos de demanda; prover estratégias para assegurar a estabilidade nos casos de contingências, durante as variações das demandas e das condições operacionais do sistema [Alves00].

As ferramentas e técnicas para o estudo da estabilidade de tensão dos sistemas de potências podem ser classificadas em duas categorias: análises dinâmica e estática. A análise efetuada no capítulo anterior teve como base o modelo estático da rede, ou seja, a rede foi modelada como um sistema de equações algébricas não-lineares. A análise estática será

tratada ao longo deste capítulo, enquanto a análise dinâmica será apenas comentada por não se tratar de técnicas abordadas no presente trabalho.

3.1 Teoria das Bifurcações

Independente do tamanho ou da complexidade do modelo do sistema de potência existem poucos modos em que o sistema se torna instável e a teoria da bifurcação presta-se a predizer como um sistema de potências, tipicamente se torna instável, sendo a idéia principal, o estudo da estabilidade.

A teoria da bifurcação assume que os parâmetros do sistema de potência variam lentamente, descrevendo mudanças qualitativas como a perda da estabilidade de tensão. Dependendo do modelo de sistema de potência utilizado, podem existir diferentes tipos de bifurcação, sendo o tipo sela-nó um dos mais importante na área de planejamento e operação em sistemas de potência, pois ocorre quando o equilíbrio estável do sistema desaparece.



3.1.1 A Bifurcação no Sistema de Potência

A bifurcação pode surgir no sistema de potência quando o comportamento dinâmico de um sistema sofre mudanças devido as variações de parâmetros.

As análises de bifurcações requerem que o modelo do sistema de potência seja especificado na forma de equações que contenham dois tipos de variáveis: de estado e parâmetros. Desta forma, considere um sistema dinâmico não-linear descrito pela equação diferencial:

$$\dot{x} = f(x, \lambda) \quad (3.1)$$

em que x e λ são vetores que contêm respectivamente as variáveis de estado e os parâmetros que este sistema depende. O ponto (x_0, λ_0) é chamado ponto de equilíbrio de (3.1), se $f(x_0, \lambda_0) = 0$, e pode ser estável ou instável, de acordo com o comportamento do sistema após uma determinada perturbação.

As variações nos parâmetros desse sistema de equações não-lineares podem conduzir o mesmo a mudanças qualitativas nos pontos de equilíbrio. Estas mudanças podem fazer aparecer novos pontos de

equilíbrio (soluções) ou desaparecer os já existentes (sistema sem solução). Os pontos onde ocorre tal mudança são denominados *pontos de bifurcação*.

3.1.2 Bifurcação Sela-Nó

Existem diversas formas de abordagens usadas para a análise do colapso de tensão e uma das mais ricas é relacioná-lo à bifurcação do tipo selá-nó do sistema de potência [Alves00].

Uma das dificuldades na aplicação da teoria da bifurcação em sistemas de potências é que as equações destes sistemas têm vetores multidimensionais, o que torna a geometria da bifurcação multidimensional. Através da redução de Liapunov-Schmidt é possível transformar sistemas de múltiplos parâmetros em um sistema genérico, com um único parâmetro, no qual pode-se aplicar os conceitos desenvolvidos por Sotomayor [Rocha].

O sistema resultante da redução de (3.1) a um único parâmetro $t \in \mathfrak{R}$ é dado por,

$$\dot{x} = f(x, \lambda(t)) \quad (3.2)$$

Definindo $Df_x|_{(x_*, \lambda_*)}$ como a matriz jacobiana de f com relação a x avaliado no ponto (x_*, λ_*) e aplicando os conceitos expostos por Sotomayor, este ponto será considerado um ponto de bifurcação sela-nó, na qual $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ satisfaz as condições de existência e unicidade das soluções, x é o vetor das variáveis de estado com n componentes, então pode-se dizer que a bifurcação é do tipo sela-nó se obedecer a seguinte condição:

- $Df_x|_{(x_*, \lambda_*)}$ tem um único autovalor simples nulo, com seus correspondentes autovetores à direita v_* e a esquerda w_* temos que:

$$Df_x|_{(x_*, \lambda_*)} v_* = w_*, \quad Df_x|_{(x_*, \lambda_*)} = 0$$

Esta condição é necessária para que, no ponto de bifurcação, $Df_x|_{(x_*, \lambda_*)}$ seja considerada singular, e assim caracterizam uma mudança de estabilidade.

Para exemplificar este tipo de bifurcação, considere o sistema dinâmico que pode ser localmente descrito pela equação diferencial:

$$\dot{x} = -x^2 + \lambda = f_\lambda(x) \quad (3.3)$$

Os pontos de equilíbrio da equação acima formam uma parábola que existe apenas para $\lambda \geq 0$. O estudo da estabilidade da Equação (3.3)

reduz-se à investigação do sinal de equação diferencial $\frac{df_\lambda}{dx}$ calculada no

equilíbrio. A condição de estabilidade é $\left(\frac{df_\lambda}{dx}\right)_{equil} < 0$.

Da Equação (3.2) observa-se que os pontos de equilíbrio são $+\sqrt{\lambda}$ e $-\sqrt{\lambda}$, desde que

$$\left.\frac{df_\lambda}{dx}\right|_{\sqrt{\lambda}} = -2\sqrt{\lambda} < 0$$

o equilíbrio $+\sqrt{\lambda}$ é estável. Por outro lado $-\sqrt{\lambda}$ é instável. Para $\lambda = 0$, tem-se apenas uma solução, que é o ponto de bifurcação, ou seja, neste ponto ocorre alteração qualitativa de comportamento. A Figura 3.1 ilustra este tipo de bifurcação, sendo que a linha contínua representa a parte estável da curva e a linha pontilhada a parte instável. Este tipo de bifurcação é genérico, isto é, este tipo de bifurcação pode ser encontrado no sistema de potência sempre que são consideradas as condições de operações típicas e de modelamento.

Através da Figura 3.1 pode-se observar que as variações nos parâmetros λ conduzem o sistema a uma mudança qualitativa nos pontos de equilíbrio. Estas variações podem fazer aparecer novos pontos de equilíbrio (soluções) ou desaparecer os já existentes (sistema sem solução).

Os pontos onde ocorrem tais mudanças são denominados de pontos de bifurcação.

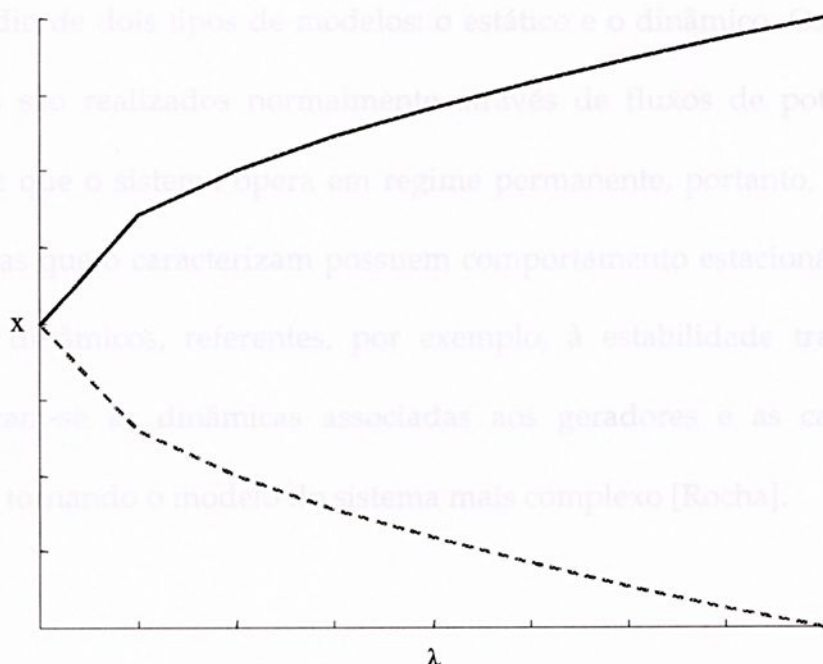


Figura 3.1: Bifurcação sela-nó.

Como descrito anteriormente, a mudança qualitativa do comportamento do sistema pode ser causada por diferentes tipos de bifurcações. As bifurcações do tipo sela-nó e hopf são reconhecidas como as principais responsáveis pela instabilidade de tensão nos sistemas de potências.

A bifurcação do tipo sela-nó é também conhecida como bifurcação estática, e é o tipo mais comum em sistemas de potência, e corresponde ao desaparecimento de um equilíbrio estável do sistema.

3.2 Modelagem do Sistema de Potência

Os sistemas elétricos de potências podem ser analisados por intermédio de dois tipos de modelos: o estático e o dinâmico. Os estudos estáticos são realizados normalmente através de fluxos de potências e supõe-se que o sistema opera em regime permanente, portanto, todas as grandezas que o caracterizam possuem comportamento estacionário. Nos estudos dinâmicos, referentes, por exemplo, à estabilidade transitória, consideram-se as dinâmicas associadas aos geradores e as cargas do sistema, tornando o modelo do sistema mais complexo [Rocha].

3.2.1 Análise Dinâmica

O principal objetivo desta análise é esclarecer os mecanismos envolvidos no fenômeno da estabilidade de tensão, através do detalhamento dos efeitos de todos os equipamentos de controle.

As análises dinâmicas consideram que todos os fenômenos de instabilidade de tensão são essencialmente dinâmicos. De todas as técnicas de análises disponíveis, a simulação não linear no domínio do tempo é a que provê a réplica mais fiel da dinâmica real da instabilidade de tensão, apesar de requerer tempos enormes de CPU e não prover informações em relação à sensibilidade ou ao grau de estabilidade [Man93].



As limitações citadas acima tornam o uso desta análise inviável tanto para a monitoração *on-line* do sistema, quanto para a análise dos grandes sistemas para os quais necessita-se avaliar um grande número de condições e contingências. Desta forma, os métodos estáticos, tal como a análise das características da curva PV da rede em torno de um ponto de operação e que requerem muito menos tempo de CPU, podem efetivamente ser utilizados não só para prover uma melhor compreensão do fenômeno como também para a aplicação *on-line*, objetivando a monitoração, a prevenção e o controle do fenômeno, antes da ocorrência das perturbações que podem conduzir o sistema ao colapso de tensão.

3.2.2 Análise Estática

O planejamento e a operação em SEE em relação à estabilidade de tensão tem como base assegurar uma margem de estabilidade de tensão adequada e segura, desta forma, as análises estáticas representam as bases do estudo da estabilidade de tensão.

As técnicas estáticas são baseadas na formulação das equações do fluxo de carga e tem como objetivo reproduzir as características mais importantes do fenômeno da instabilidade de tensão, sem recorrer à complexidade numérica e a carga computacional associada à simulação no domínio do tempo.



Nesta seção, as observações feitas para as curvas PV, considerando um sistema simples de duas barras, serão generalizadas para um sistema de grande porte. A questão agora é como generalizar estas observações para um problema com $(m + 1)$ máquinas e n barras de carga. Para esta finalidade neste trabalho faz-se o uso das técnicas de análises estáticas, que geralmente tentam responder as seguintes perguntas:

1. Dada uma condição operacional, o sistema é estável?
2. Para um dado ponto operacional: Quanto o sistema está próximo de se tornar instável?
3. Se o sistema é instável, onde e quando ocorreu a instabilidade de tensão?

Em outras palavras, a análise “steady-state” (estado estacionário) responde a estas perguntas considerando os limites de estabilidade e o mecanismo da instabilidade de tensão. Para determinar a margem de estabilidade de tensão, o sistema é carregado até ocorrer a instabilidade de tensão e as condições do sistema para os diferentes aumentos de carga são obtidas resolvendo-se as equações do fluxo de carga.

O fenômeno do colapso de tensão está intimamente relacionado à singularidade da matriz jacobiana do fluxo de potência. Muitos



pesquisadores da área de planejamento e operação de SEE têm se dedicado ao estudo da determinação da singularidade da matriz jacobiana, entre eles [Cañ96, Löf92, Löf93, Man93, Tir88, Zan94, Zan96].

Para explicar o ponto de colapso de tensão para um sistema de grande porte este trabalho considera que a carga varia por todo o sistema e que a variação de potência ativa das cargas será assumida não somente pela barra *slack*, mas por todas as barras de geração disponíveis. Estes pontos podem ser determinados de várias maneiras, sendo o método da continuação uma excelente ferramenta para estender as observações do exemplo clássico (sistema de duas barras) para os problemas de grandes sistemas [Tir88] ou através de técnicas que efetuam o controle ótimo de potências ativa e reativa conforme proposto no capítulo 4 deste trabalho.

O método da continuação consiste em determinar o lugar geométrico das raízes do conjunto de equações algébricas do sistema:

$$f(\underline{x}, \underline{p}) = 0 \quad (3.4)$$

Em que $f = [f_1, \dots, f_{n+m}, g_1, \dots, g_{n+m}]^T$

$$\underline{x} = [\theta_1, \dots, \theta_{n+m}, V_1, \dots, V_{n+m}]^T$$

$$\underline{p} = [P_1, \dots, P_{n+m}, Q_1, \dots, Q_{n+m}]^T$$

são respectivamente vetores de função, estado e parâmetros. Aqui as cargas são tratadas como parâmetros independentes.

Mantendo $\underline{p}$ constante na Equação (3.4) e diferenciando-a com respeito a $\underline{x}$, observa-se que a igualdade de

$$df(\underline{x}, \underline{p}) = 0 \quad (3.5)$$

é mantida. Se $\underline{x}$ e $\underline{p}$ são parametrizados por um escalar λ , então a Equação (3.5) pode ser escrita como:

$$\frac{\partial f(\underline{x}, \underline{p})}{\partial \underline{x}} \frac{\partial \underline{x}}{\partial \lambda} + \frac{\partial f(\underline{x}, \underline{p})}{\partial \underline{p}} \frac{\partial \underline{p}}{\partial \lambda} = 0 \quad (3.6)$$

Resolver a Equação (3.6) significa indicar um par $(\underline{x}^*, \underline{p}^*)$ tal que $f(\underline{x}^*, \underline{p}^*) = 0$ e descrever como $\underline{p}$ varia em relação a λ . Seja $f(\underline{x}, \underline{p})$ dada pelas equações referentes as equações de balanço do fluxo de carga (.), são reescritas abaixo de forma mais adequada:

$$f_i = P_i - \sum_k V_i V_k Y_{ik} \cos(\theta_{ik} + \alpha_i - \alpha_k) = 0$$

e

$$g_i = Q_i - \sum_k V_i V_k Y_{ik} \sin(\theta_{ik} + \alpha_i - \alpha_k) = 0$$

$$(f_{\underline{x}}) \underline{y} = - \left(\frac{d\underline{p}}{dV_i} \right) \quad (3.8)$$

em que

$$\underline{y} = \frac{dx}{dV_i}$$

e V_i a tensão na barra i .

Desde que o vetor $\underline{y}$ seja não nulo e o sistema (3.8) é linear homogêneo no ponto de equilíbrio, segue-se que a matriz $(f_{\underline{x}})$ é não invertível, ou seja, a matriz $(f_{\underline{x}})$ é singular. Assim a questão da sensibilidade tensão/potência para uma rede real deve dar atenção à singularidade da matriz $f_{\underline{x}}$. Desta forma, é importante saber o quanto a matriz $f_{\underline{x}}$ está próxima de se tornar singular.

3.3.1 Decomposição em Valor Singular

3.3 Índices de Estabilidade

O colapso de tensão é um fenômeno local que tem causado sérias consequências. Levando em consideração que em um sistema carregado a instabilidade de tensão pode ocorrer quando a carga total sofre um aumento súbito e relativamente pequeno, torna-se útil ao operador ter um

índice que lhe indique o valor máximo que a demanda total pode suportar sem causar a instabilidade de tensão.

As diversas técnicas para obtenção de índices têm como objetivo quantificar o quanto um determinado ponto de operação está próximo do ponto de colapso, isto é, calcular a condição do limite de estabilidade estática. Na literatura existem diversas técnicas para a obtenção de índices de estabilidade, entre elas: decomposição em valor singular mínimo [Cañ96, Lof92, Lof93, Man93, Tir88, Zan94, Zan96], decomposição em autovalores [Cañ96, Zan94, Zan96] e determinante do jacobiano reduzido [Cañ96, Zan94, Zan96].

Das técnicas citadas acima apenas a decomposição em valor singular será analisada detalhadamente, para subsidiar e validar a metodologia proposta neste trabalho.

3.3.1 Decomposição em Valor Singular

Esta técnica inicialmente proposta por Thomas e Tiranuchit em [Tir88], trata-se de uma medida matemática da distância entre um ponto de operação estudado e o limite de estabilidade de tensão estática. É empregada nos sistemas de potências, para analisar a singularidade da



matriz jacobiana, obtida a partir das equações estáticas do fluxo de carga (3.4).

Esta análise baseia-se no fato de que a decomposição singular provê o posto da matriz jacobiana dado pelo número de valores singulares não-nulos. Teoricamente todos os valores singulares de uma matriz podem ser obtidos através da *Decomposição do Valor Singular (DVS)*. Para o entendimento desta técnica considere a matriz $\underline{F}$ ($\underline{F} = \underline{f}_{\underline{x}}$), em que $\underline{f}_{\underline{x}}$ é a matriz jacobiana, então, determine as condições sobre a perturbação $\Delta \underline{F}$ tal que $\underline{F} + \Delta \underline{F}$ seja singular.

A noção de singularidade de $\underline{F} + \Delta \underline{F}$ está intimamente relacionada com o cálculo da sua inversa. Desta forma, se $\underline{F}$ é não singular, pode-se escrever:

$$(\underline{F} + \Delta \underline{F})^{-1} = (\underline{I} + \underline{F}^{-1} \Delta \underline{F})^{-1} \underline{F}^{-1}$$

A matriz $(\underline{I} + \underline{F}^{-1} \Delta \underline{F})$ tem inversa se:

$$\|\underline{F}^{-1} \Delta \underline{F}\| < 1$$

A desigualdade acima ocorre se:

$$\|\Delta \underline{F}\| < \frac{1}{\|\underline{F}^{-1}\|}$$

uma vez que,

$$\|\underline{F}^{-1}\Delta \underline{F}\| \leq \|\underline{F}^{-1}\| \|\Delta \underline{F}\|$$

para alguma norma de matriz adequada. Então uma medida da proximidade da matriz $\underline{F}$ à singularidade pode ser dada pelo número $\|\underline{F}^{-1}\|^{-1}$.

Para obter os resultados numéricos é necessário escolher uma norma adequada de matriz, dentre as propostas na literatura [Stew73]. A norma mais natural é dada por:

$$\|\underline{F}\|^2 = \phi_{\max}(\underline{F}^T \underline{F}) = \sigma_{\max}^2(\underline{F})$$

Sendo $\phi_{\max}(\underline{F}^T \underline{F})$ o autovalor máximo da matriz simétrica $(\underline{F}^T \underline{F})$ e $\sigma_{\max}(\underline{F})$ o maior valor singular de $\underline{F}$.

Em termos de valores singulares tem-se:

$$\|\underline{F}^{-1}\| = \sigma_{\max}(\underline{F}^{-1})$$

Porém, a decomposição em valor singular da matriz jacobiana, J , do fluxo de carga é dada por:

$$J = U \Sigma V^T = \sum_i^{2n-1} \sigma_i u_i v_i^T \quad (3.9)$$

em que n é o número de barras do sistema, os vetores u_i e v_i são respectivamente as i -ésimas colunas das matrizes unitárias, U e V , Σ é uma matriz diagonal com valores singulares σ_i , ou seja:

$$\Sigma(J) = \text{diag}\{\sigma_i(J)\} \quad i = 1, 2, \dots, 2n-1$$

Na qual os valores singulares σ_i são reais e positivos ($\sigma_i \geq 0$), para todo i , desde que,

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_{2n-1} \geq 0$$

ou seja, os valores singulares da matriz $\Sigma(J)$ são decrescentes.

O menor valor singular ($\sigma_{2n-1}(J)$), indica o quanto a matriz jacobiana do fluxo de potência está próxima de se tornar singular e o ponto $\sigma_{2n-1}(J) = 0$ é conhecido como ponto de bifurcação e consequentemente, para este ponto a matriz estudada é singular.

As equações linearizadas do fluxo de carga, de acordo com o método de Newton-Raphson, são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

em que ΔP e ΔQ correspondem aos desvios de potências ativa e reativa, respectivamente, enquanto, $\Delta \theta$ e ΔV correspondem às correções das magnitudes e ângulos das tensões. As submatrizes J_1 , J_2 , J_3 e J_4 correspondem às derivadas de potência com relação às tensões da matriz jacobiana, desta forma, a Equação (3.11) pode ser escrita como segue:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Aplicando a decomposição dos valores singulares como descrito na Equação (3.9) tem-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = U \Sigma V^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_i^{2n-1} \sigma_i u_i v_i^T \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Como a matriz jacobiana do fluxo de potência, J , é não singular (admite inversa) e U , V são matrizes unitárias ($U^{-1} = U^T$, $V^{-1} = V^T$), os efeitos das pequenas variações nas injeções de potências ativa e reativa sobre o vetor $[\Delta\theta, \Delta V]^T$, pode ser calculado multiplicando-se ambos os membros da Equação (3.11) por J^{-1} e assim segue-se que:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = (U \Sigma V^T)^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Resolvendo-se os produtos de matrizes, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = (V^T)^{-1} \Sigma^{-1} U^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Conforme descrito anteriormente as matrizes U e V são unitárias, então, fazendo uso desta propriedade a Equação (3.15) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = V \Sigma^{-1} U^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

ou

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \sum_i^{2n-1} v_i \sigma_i^{-1} u_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

sendo

$$J^{-1} = V \Sigma^{-1} U^T = \sum_i^{2n-1} v_i \sigma_i^{-1} u_i^T \quad (3.18)$$

e

$$\|J^{-1}\|^{-1} = \sigma_{\min}(J) \quad (3.19)$$

em que $\sigma_{\min}(J)$ é o valor singular mínimo de J . Desta forma o valor singular mínimo é um índice de segurança para monitorar o quão perto um sistema de potência está operando próximo a um limite de instabilidade.

Da Equação (3.18) pode-se observar que o maior valor de Σ^{-1} irá ocorrer para o inverso do valor singular mínimo da matriz. Contudo, próximo ao ponto de colapso, quando um valor singular é quase zero, a resposta do sistema é totalmente determinada pelo valor singular mínimo, σ_{2n-1} , associada aos vetores singulares v_{2n-1} e u_{2n-1} .

Daqui

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = v_{2n-1} \sigma_{2n-1}^{-1} u_{2n-1}^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

em que

$$v_{2n-1} = [\theta_1 \dots \theta_{n-1} \ V_1 \dots V_{n-1}]^T \quad (3.21)$$

$$u_{2n-1} = [P_1 \dots P_{n-1} \ Q_1 \dots Q_{n-1}]^T \quad (3.22)$$

A seguir apresenta-se uma relação entre valor singular mínimo e os correspondentes vetores singulares, obtida da Equação (3.20).

$$v_{2n-1}^T \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \sigma_{2n-1}^{-1} u_{2n-1}^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Como o valor singular mínimo, σ_{2n-1} , assume valores muito pequenos o seu inverso σ_{2n-1}^{-1} , assumirá valores extremamente grandes e desta forma, qualquer perturbação nas injeções de potências ativa e reativa, por menor que seja, afetará significativamente as variáveis de estado. Desta forma, suponha que para o colapso de tensão os desvios de potências sejam definidos por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = u_{2n-1} \quad (3.24)$$

em que u_{2n-1} é a última coluna de U , então, da Equação (3.24) segue-se que:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \sigma_{2n-1}^{-1} v_{2n-1} \quad (3.25)$$

sendo v_{2n-1} a última coluna da matriz unitária V .

A Equação (3.25) explica o colapso de tensão e através dela, pode-se observar que pequenas variações nas injeções de potências resultam em uma grande perturbação nas magnitudes e ângulos de tensões. Este fato ocorre porque o valor singular mínimo (VSM) tem domínio sobre o comportamento das equações do fluxo de carga, quando o sistema está operando próximo ao ponto de singularidade (bifurcação ou colapso). Contudo, para o ponto de colapso de tensão o inverso da matriz jacobiana do fluxo de potência não existe.

Para as equações acima e discussões sobre a decomposição do valor singular do fluxo de potência as seguintes interpretações podem ser feitas para o valor singular mínimo e os correspondentes vetores singulares das matrizes U e V :

- menor valor singular σ_{2n-1} indica uma estimativa da distância do limite de estabilidade “steady-state”;
- vetor singular de V , v_{2n-1} , correspondente à σ_{2n-1} , indica as tensões e ângulos mais sensíveis;

- vetor singular de U , u_{2n-1} , correspondente à σ_{2n-1} , indica a direção mais sensível da variação de injeções de potências ativa e reativa.

Outra propriedade da decomposição em valor singular que pode ser observada, é que, adicionando-se uma coluna na matriz estudada, J , o maior valor singular irá aumentar, enquanto o menor reduzirá.

Esta decomposição também pode ser realizada através da matriz jacobiana reduzida do fluxo de carga e usada para determinar a proximidade do colapso de tensão [Cañ96]. Para esta finalidade considere inicialmente o modelo de fluxo de carga convencional dado pela Equação (3.10).

A estabilidade de tensão pode ser afetada pelas potências ativa e reativa (P e Q), embora, para a obtenção da matriz jacobiana reduzida, a potência ativa será mantida constante, ou seja, na Equação (3.10) a variação de potência ativa é desprezada, $\Delta P = 0$.

Assim,

$$\Delta Q = [J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2] \Delta V \quad (3.26)$$

sendo,

$$[J_4 - J_3 J_1^{-1} J_2] = J_r \quad (3.27)$$

e J_r , denominada matriz jacobiana reduzida, descreve as magnitudes de tensões e injeções de potências reativa das barras. Desprezando-se a potência ativa e os ângulos na Equação (3.10), enfoca-se o estudo no fornecimento da demanda de reativos para o sistema, assim como, minimiza-se o esforço computacional [Cañ96].

Este tipo de índice explora a singularidade da matriz jacobiana, e esta singularidade pode ser interpretada como uma sensibilidade infinita da solução do fluxo de potência, para pequenas perturbações nos parâmetros da rede. O ponto onde este fenômeno ocorre é chamado de ponto de bifurcação estática, ou seja, é o ponto na qual o sistema perde o equilíbrio devido a algumas perturbações nos parâmetros da rede.

3.3.1.1 Implementação da DVS

A obtenção do valor singular mínimo e seus respectivos vetores singulares podem ser basicamente descritos por um algoritmo computacional com quatro passos computacionais, conforme apresentado abaixo:

1. resolver $J^T u_{2n-1}^{(k)} = v_{2n-1}^{(k)}$;

$$2. \text{ estimar } \hat{\sigma}_{2n-1} = \left(\frac{\|v_{2n-1}^{(k)}\|_2}{\|u_{2n-1}^{(k)}\|_2} \right);$$

$$3. \text{ resolver } J v_{2n-1}^{(k+1)} = u_{2n-1}^{(k)};$$

$$4. \text{ estimar } \hat{\sigma}_{2n-1} = \left(\frac{\|u_{2n-1}^{(k)}\|_2}{\|v_{2n-1}^{(k+1)}\|_2} \right).$$

O algoritmo descrito acima mostra apenas a idéia básica do processo iterativo mostrado nos diagramas de bloco das Figuras 3.2 e 3.3, sendo σ_{2n-1} o menor valor singular e u_{2n-1} e v_{2n-1} , os respectivos vetores singulares das matrizes U e V .

As Figuras 3.2 e 3.3 representam respectivamente a decomposição em valores singulares das matrizes J e J_r . Para inicializar o algoritmo representado pelo fluxograma da Figura 3.2, é necessário um vetor inicial $v_{2n-1}^{(i)}$. Uma possibilidade é escolher $v_{2n-1}^{(i)} = [0 \dots 0 \ 1 \dots 1]^T$, no qual as posições nulas e unitárias correspondem, respectivamente, aos ângulos e tensões no vetor das variáveis de estado das equações do fluxo de potência. O motivo para esta escolha é que a maioria das tensões sofre variações (tendem a aumentar ou a diminuir, simultaneamente).

Figura 3.2: Decomposição em Valor Singular aplicado a matriz J .

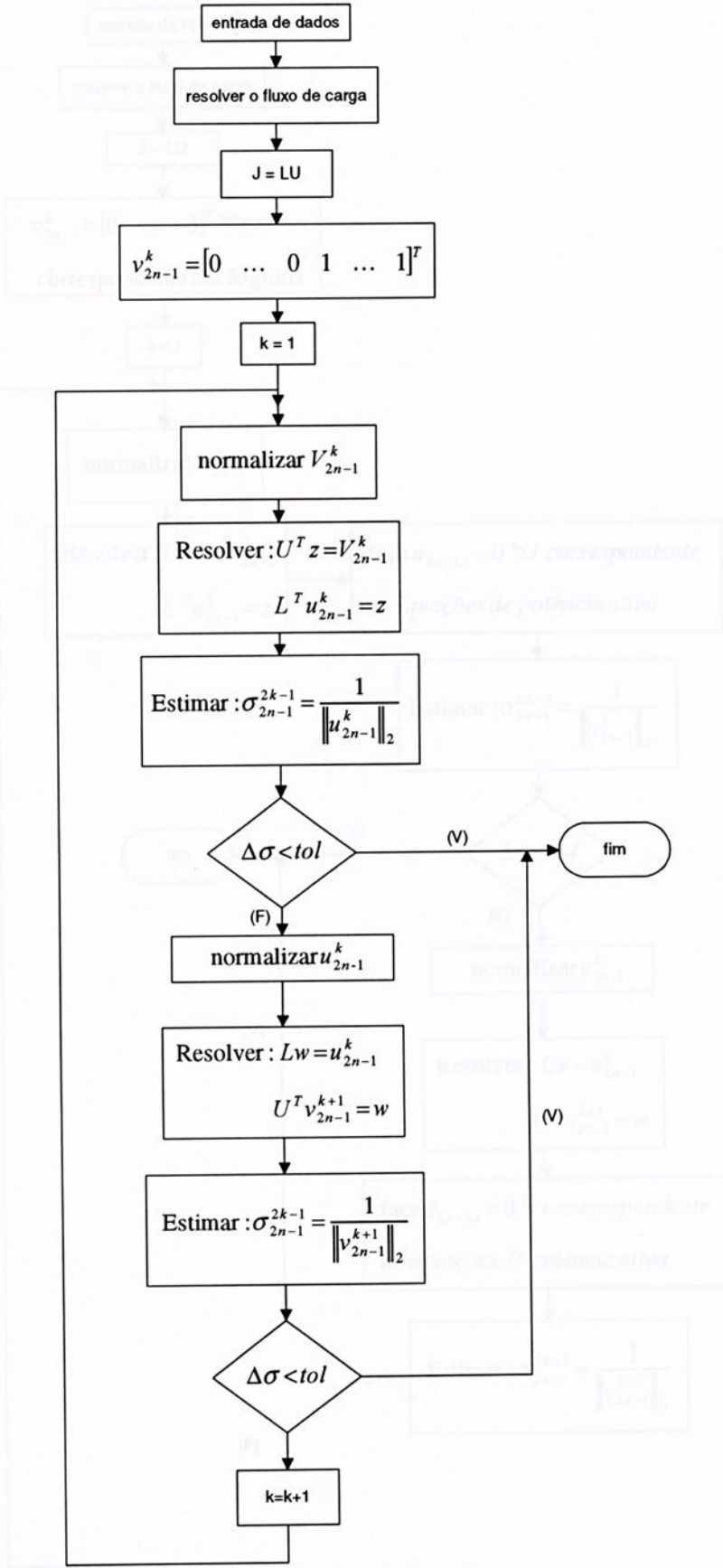


Figura 3.2: Decomposição em Valor Singular aplicado a matriz J .

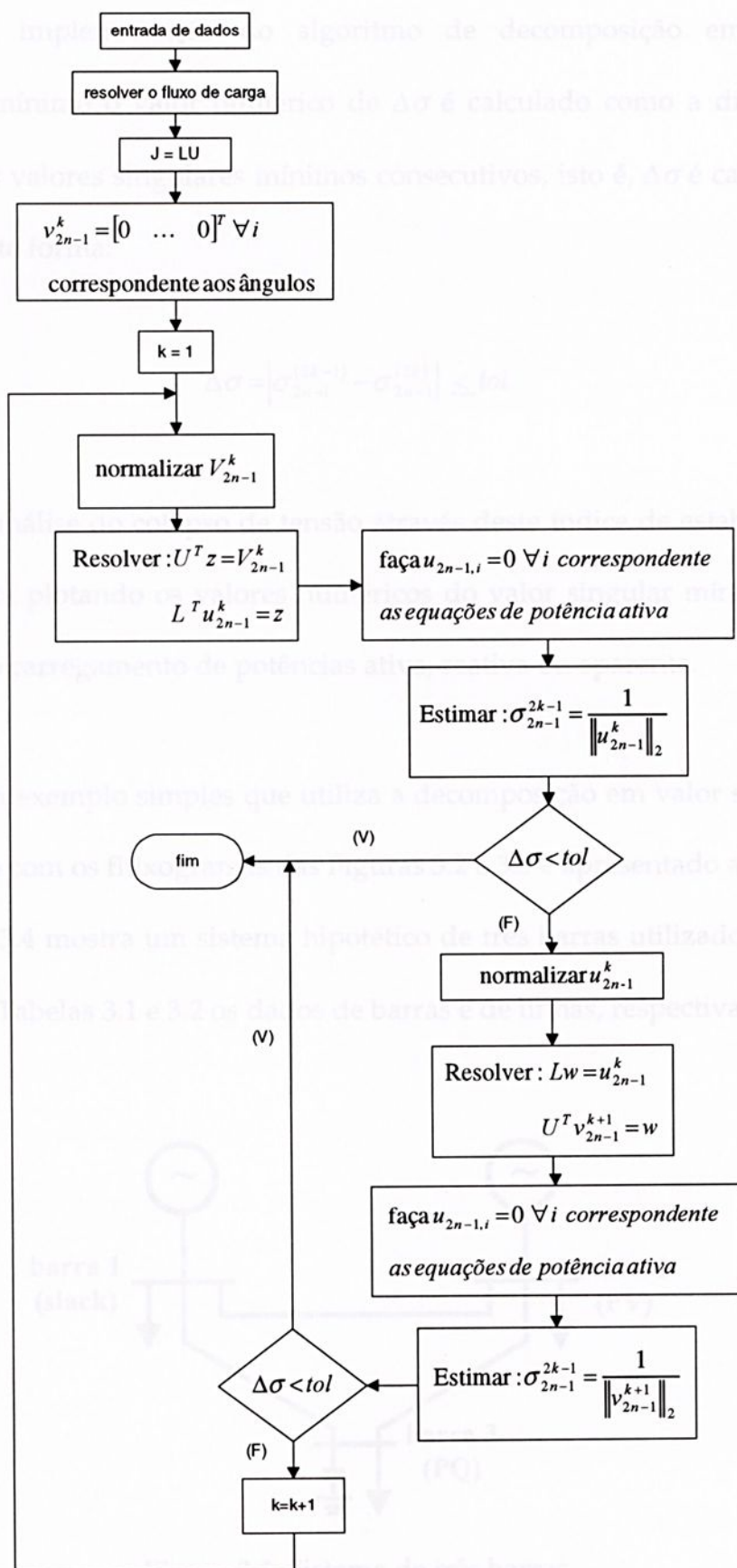


Figura 3.3: Decomposição em Valor Singular aplicado a matriz J_r .

Na implementação do algoritmo de decomposição em valor singular mínimo o valor numérico de $\Delta\sigma$ é calculado como a diferença entre dois valores singulares mínimos consecutivos, isto é, $\Delta\sigma$ é calculado da seguinte forma:

Dados das Barras (pu)										
	Barra	P	Q	P_{max}	Q_{max}	Q_{min}	V_{min}	V_{max}	V_{base}	V_{lim}
1	V8	0	1,10	0,00	1,30	-0,35	0,45	0,200	0,105	0,0
2	PV	0	1,35	0,00	1,55	-0,45	0,250	0,125	0,0	0,0
3	PQ	1	1,10	0,00	1,30	-0,35	0,45	0,200	0,105	0,0

$$\Delta\sigma = \left| \sigma_{2n-1}^{(2k-1)} - \sigma_{2n-1}^{(2k)} \right| \leq tol$$

A análise do colapso de tensão através deste índice de estabilidade é realizada plotando os valores numéricos do valor singular mínimo em relação ao carregamento de potências ativa, reativa ou aparente.

Um exemplo simples que utiliza a decomposição em valor singular de acordo com os fluxogramas das Figuras 3.2 e 3.3 é apresentado a seguir. A Figura 3.4 mostra um sistema hipotético de três barras utilizado para o teste e as Tabelas 3.1 e 3.2 os dados de barras e de linhas, respectivamente.

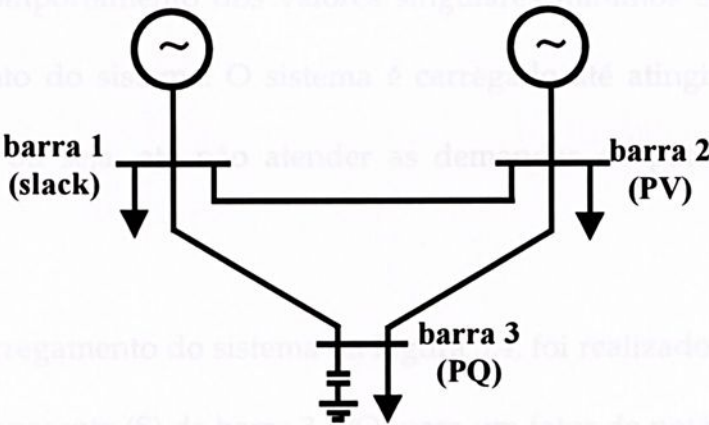


Figura 3.4: Sistema de três barras.

Tabela 3.1: Dados das barras usados nas simulações do sistema hipotético de três barras:

Dados das Barras (p.u)										
Barra	Tipo	θ	V	P_{gmin}	P_{gmax}	Q_{gmin}	Q_{gmax}	P_c	Q_c	Bsh
1	V θ	0	1,10	0,00	1,50	-0,05	0,45	0,200	0,105	0,0
2	PV	0	1,05	0,00	1,00	-0,45	0,45	0,250	0,128	0,0
3	PQ	0	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,498	0,255	0,0

Tabela 3.2: Dados das linhas usados nas simulações do sistema hipotéticos de três barras.

Dados das Linhas (p.u)				
NOI	NOF	R	X	Ysh
2	1	0,0723	0,3099	0,084
2	3	0,0723	0,3099	0,084
3	1	0,0723	0,3099	0,084

A Figura 3.5 mostra os valores singulares mínimos obtidos para o sistema hipotético de três barras e três linhas de transmissão. Esta figura ilustra o comportamento dos valores singulares mínimos em função do carregamento do sistema. O sistema é carregado até atingir o ponto de bifurcação, ou seja, até não atender as demandas de potências ativa e reativa.

O carregamento do sistema da Figura 3.4, foi realizado aumentando a potência aparente (S) da barra 3 (PQ) para um fator de potência $\varphi = 0.89$,

isto é, $\tan \varphi = 0.5$. A tolerância tol adotada nos testes para a obtenção dos resultados apresentados nesta seção foi 10^{-6} .

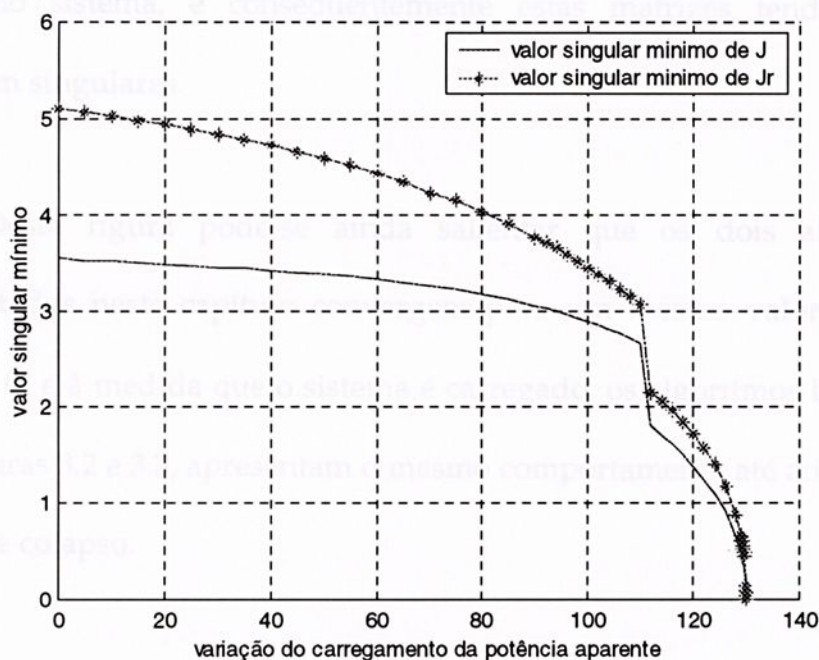


Figura 3.5: Valor Singular mínimo da matrizes J e Jr.

Os “saltos” no valor numérico de $\sigma_n(\bullet)$ (valor singular mínimo das matrizes J e Jr) são devidos ao fato de estar utilizando um programa para cálculo de fluxo de carga com características especiais, onde ocorrem mudanças dos nós PV's em PQ's, quando os limites de geração da potência reativa são atingidos.

Quando estes limites são atingidos a dimensão da matriz jacobiana aumenta e devido a este fato o valor numérico de $\sigma_n(\bullet)$ se reduz. Estes saltos são considerados uma propriedade desejável para o índice de

colapso de tensão estático, porque indicam quando os recursos de potência reativa da rede são esgotados [Löf92]. Verifica-se ainda que os valores singulares mínimos tendem a zero à medida que se aumenta a carga no sistema, e consequentemente estas matrizes tendem a se tornarem singulares.

4 Desta figura pode-se ainda salientar que os dois algoritmos apresentados neste capítulo convergem para um mesmo valor singular ($\sigma_n(\bullet) = 0$) e à medida que o sistema é carregado, os algoritmos ilustrados nas Figuras 3.2 e 3.3, apresentam o mesmo comportamento até atingirem o ponto de colapso.



4.1 Formulação do Problema de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa

4

O Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa e a Estabilidade de Tensão

O controle ótimo de potências ativa e reativa é um caso particular de um problema muito mais genérico, o fluxo de potência ótimo (FPO), que consiste em determinar o melhor ponto de operação dos sistemas através da otimização de uma função objetivo, satisfazendo um conjunto de restrições de operações e limitações físicas dos sistemas.

Neste capítulo com base na aplicação das condições de otimalidade de Karush-Khun-Tucker [Baz93] ao problema de fluxo de potência ótimo, é proposta uma técnica para a análise das condições de operação em que se garante a estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica. Em seguida a técnica de solução e o algoritmo computacional para o problema de controle ótimo de potências ativa e reativa são detalhados.

4.1 Formulação do Problema de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa

Quando a solução do fluxo de carga padrão (FPP), apresentado no capítulo 2, não produz resultados aceitáveis é necessário ajustar as variáveis de controle, e resolver novamente o sistema de equações (2.1) e (2.2). Em um sistema real, na qual um grande número de variáveis de controle necessitam ser ajustadas, para satisfazer uma condição do problema, o uso do FP torna-se um exaustivo processo de tentativas e erros.

Neste caso o FPO é o instrumento ideal para resolver as equações do FP, ajustando simultaneamente, de maneira ótima (ou quase ótima), todas as variáveis de controle do sistema para satisfazer algum critério preestabelecido do problema.

O FPO é um problema de otimização restrita, não linear, não convexo e de grande porte. Ele determina o melhor ponto de operação do sistema através da otimização da função objetivo que representa um dado desempenho do sistema, satisfazendo as restrições de operação.

Sua formulação pode ser apresentada genericamente através do seguinte conjunto de equações:

$$\text{Min } f(\underline{x})$$

$$\text{Sujeito a: } g(\underline{x}) = 0 \quad (4.1)$$

$$\underline{h}^{\min} \leq h(\underline{x}) \leq \underline{h}^{\max}$$

$$\underline{x}^{\min} \leq \underline{x} \leq \underline{x}^{\max}$$

em que:

- $f(\underline{x})$ – função escalar que representa o desempenho do sistema;
- $g(\underline{x})$ – conjunto das restrições de igualdade formado pelas equações de do fluxo de potência;
- $h(\underline{x})$ – restrições funcionais de desigualdade;
- $\underline{x}$ – variáveis de estado dos sistemas;
- $\underline{x}^{\min}$, $\underline{h}^{\min}$ e $\underline{x}^{\max}$, $\underline{h}^{\max}$ – limites mínimos e máximos, de $\underline{x}$ e $h(\underline{x})$.

No planejamento e operação dos SEE, são considerados determinadas condições de carga e topologia. O problema de controle ótimo de potências ativa e reativa é um caso particular do FPO. Este problema pode ser formulado como um problema de programação não-linear de grande porte, da seguinte forma:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{NBG} Cpg_i(Pg_i) + \sum_{i=1}^{NBG} Cqg_i(Qg_i)$$

Sujeito a.

$$Pg_i - P_{Ci} - P_i(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \quad i = 1, \dots, NBG$$

$$-P_{Ci} - P_i(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \quad i = 1, \dots, NBC$$

$$Qg_i - Q_{Ci} - Q_i(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \quad i = 1, \dots, NBG$$

$$-Q_{Ci} - Q_i(\underline{\theta}, \underline{V}) = 0 \quad i = 1, \dots, NBC \quad (4.2)$$

$$Pg_i^{\min} \leq Pg_i \leq Pg_i^{\max} \quad i = 1, \dots, NBG$$

$$Qg_i^{\min} \leq Qg_i \leq Qg_i^{\max} \quad i = 1, \dots, NBG$$

$$V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max} \quad k = 1, \dots, NB$$

$$\theta_k^{\min} \leq \theta_k \leq \theta_k^{\max} \quad k = 1, \dots, NB$$

sendo:

- $Cpg_i(Pg_i)$ – componente da função custo associada à potência ativa gerada na barra i ;
- $Cqg_i(Qg_i)$ – componente da função custo associada à potência reativa gerada na barra i ;
- Pg_i – potência ativa gerada na barra i ;

- Qg_i – potência reativa gerada na barra i ;
- θ_k – ângulo da tensão na barra k ;
- V_k – magnitude de tensão na barra k ;
- Pg_i^{min} e Pg_i^{max} – limites de geração de potência ativa na barra i ;
- Qg_i^{min} e Qg_i^{max} – limites de geração de potência reativa na barra i ;
- V_k^{min} e V_k^{max} – limites das tensão na barra k ;
- θ_k^{min} e θ_k^{max} – limites dos ângulo de tensão na barra k ;
- NBG – número de barras de geração;
- NBC – número de barras de carga;
- NB – número de barras da rede elétrica.

A partir da formulação do problema Lagrangeano $L(\underline{x}^*)$ associado ao problema (4.2), serão obtidas as condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) [Baz93] para esse problema. Seja o Lagrangeano associado a (4.2):

$$\begin{aligned}
L(\underline{x}^*) = & \sum_{i=1}^{NBG} [Cp g_i(P g_i) + Cq g_i(Q g_i)] + \sum_{i=1}^{NBG} \pi P g_i [P g_i - P c_i - P_i(\theta, V)] + \\
& + \sum_{i=1}^{NBG} \pi P c_i [-P c_i - P_i(\theta, V)] + \sum_{i=1}^{NBG} \pi Q g_i [Q g_i - Q c_i - Q_i(\theta, V)] + \\
& + \sum_{i=1}^{NBG} \pi Q c_i [-Q c_i - Q_i(\theta, V)] + \sum_{i=1}^{NBG} \bar{\mu} P_i (P g_i - P g_i^{\max}) + \sum_{i=1}^{NBG} \underline{\mu} P_i (P g_i^{\min} - P g_i) + \\
& + \sum_{i=1}^{NBG} \bar{\mu} Q_i (Q g_i - Q g_i^{\max}) + \sum_{i=1}^{NBG} \underline{\mu} Q_i (Q g_i^{\min} - Q g_i) + \sum_k^{NB} \bar{\mu} V_k (V_k - V_k^{\max}) + \\
& + \sum_{k=1}^{NB} \underline{\mu} V_k (V_k^{\min} - V_k)
\end{aligned}$$

As condições de KKT, para que um ponto

$$\underline{x}^* = [P g_i^*, Q g_i^*, \theta_k^*, V_k^*, \pi P g_i^*, \pi Q g_i^*, \pi P c_i^*, \pi Q c_i^*, \bar{\mu} P_i^*, \bar{\mu} Q_i^*, \underline{\mu} P_i^*, \underline{\mu} Q_i^*, \bar{\mu} V_k^*, \underline{\mu} V_k^*]$$

seja ótimo para (4.2) são:

$$\text{i) } \bar{\mu} P_i^*, \underline{\mu} P_i^* \geq 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\bar{\mu} Q_i^*, \underline{\mu} Q_i^* \geq 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\bar{\mu} V_k^*, \underline{\mu} V_k^* \geq 0 \quad k \in \text{NB}$$

$$\pi P g_i^*, \pi P c_i^*, \pi Q g_i^*, \pi Q c_i^* \leq 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\text{ii) } \bar{\mu} P_i^* (P g_i - P g_i^{\max}) = 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\underline{\mu}P_i^* (Pg_i^{\min} - Pg_i) = 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\bar{\mu}Q_i^* (Qg_i - Qg_i^{\max}) = 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\underline{\mu}Q_i^* (Qg_i^{\min} - Qg_i) = 0 \quad i \in \text{NBG}$$

$$\bar{\mu}V_k^* (V_k - V_k^{\max}) = 0 \quad k \in \text{NB}$$

$$\underline{\mu}V_k^* V_k^{\min} - V_k = 0 \quad k \in \text{NB}$$

$$\text{iii) } Pg_i^* \leq Pg_i^{\max} \quad i \in \text{NBG}$$

$$Pg_i^* \geq Pg_i^{\min} \quad i \in \text{NBG}$$

$$Qg_i^* \leq Qg_i^{\max} \quad i \in \text{NBG}$$

$$Qg_i^* \geq Qg_i^{\min} \quad i \in \text{NBG}$$

$$V_k^* \leq V_k^{\max} \quad k \in \text{NB}$$

$$V_k^* \geq V_k^{\min} \quad k \in \text{NB}$$

iv) estacionaridade do problema Lagrangeano:

Fazendo:

$$L(Pg_i^*, Qg_i^*, \theta_i^*, V_k^*, \pi Pg_i^*, \pi Qg_i^*, \pi Pc_i^*, \pi Qc_i^*, \bar{\mu}P_i^*, \bar{\mu}Q_i^*, \underline{\mu}P_i^*, \underline{\mu}Q_i^*, \bar{\mu}V_k^*, \underline{\mu}V_k^*) \triangleq L(\underline{x}^*)$$

segue-se que:

$$\begin{aligned}
\nabla_{V_k} L(\underline{x}^*) = & -\pi^{Pg_i} \left(\frac{\partial P_i(\theta, V)}{\partial V_k} \right)_{i \in NBG} - \pi^{Pc_i} \left(\frac{\partial P_i(\theta, V)}{\partial V_k} \right)_{i \in NBC} \\
& - \pi^{Qg_i} \left(\frac{\partial Q_i(\theta, V)}{\partial V_k} \right)_{i \in NBG} - \pi^{Qc_i} \left(\frac{\partial Q_i(\theta, V)}{\partial V_k} \right)_{i \in NBC} + \\
& + \bar{\mu}_{V_k} - \underline{\mu}_{V_k} = 0
\end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned}
\nabla_{\theta_k} L(\underline{x}^*) = & -\pi^{Pg_i} \left(\frac{\partial P_i(\theta, V)}{\partial \theta_k} \right)_{i \in NBG} - \pi^{Pc_i} \left(\frac{\partial P_i(\theta, V)}{\partial \theta_k} \right)_{i \in NBC} - \\
& - \pi^{Qg_i} \left(\frac{\partial Q_i(\theta, V)}{\partial \theta_k} \right)_{i \in NBG} - \pi^{Qc_i} \left(\frac{\partial Q_i(\theta, V)}{\partial \theta_k} \right)_{i \in NBC} = 0
\end{aligned} \quad (4.4)$$

$$\nabla_{Pg_i} L(\underline{x}^*) = Cp_{g_i}(Pg_i) + \pi^{Pg_i} + \bar{\mu}_{P_i}^* - \underline{\mu}_{P_i}^* = 0 \quad (4.5)$$

$$\nabla_{Qg_i} L(\underline{x}^*) = Cq_{g_i}(Qg_i) + \pi^{Qg_i} + \bar{\mu}_{Q_i}^* - \underline{\mu}_{Q_i}^* = 0 \quad (4.6)$$

sendo: $k = 1, \dots, NB$.

O sistema de equações (4.3)-(4.6) pode ser expressa na forma matricial o que resulta em:

$$\begin{bmatrix} Cpg_i^* \\ \hline 0 \\ \hline Cqg_i^* \\ \hline 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi^P g_i^* \\ \hline 0 \\ \hline \pi^Q g_i^* \\ \hline 0 \end{bmatrix} - [\pi^P \quad \pi^Q]^T \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial P(\theta, V)}{\partial V} & \frac{\partial P(\theta, V)}{\partial \theta} \\ \hline \frac{\partial Q(\theta, V)}{\partial V} & \frac{\partial Q(\theta, V)}{\partial \theta} \end{bmatrix}^* + [\underline{\mu}V] - [\bar{\mu}V] + \begin{bmatrix} \bar{\mu}P_i^* \\ \hline 0 \\ \hline \bar{\mu}Q_i^* \\ \hline 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{\mu}P_i^* \\ \hline 0 \\ \hline \underline{\mu}Q_i^* \\ \hline 0 \end{bmatrix} = 0$$

$$-[\pi^P \quad \pi^Q]^T \begin{bmatrix} \frac{\partial P(\theta, V)}{\partial V} & \frac{\partial P(\theta, V)}{\partial \theta} \\ \hline \frac{\partial Q(\theta, V)}{\partial V} & \frac{\partial Q(\theta, V)}{\partial \theta} \end{bmatrix}^* = - \begin{bmatrix} Cpg_i^* + \pi^P g_i^* + \bar{\mu}P_i^* - \underline{\mu}P_i^* \\ \hline 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \\ \hline Cqg_i^* + \pi^Q g_i^* + \bar{\mu}Q_i^* - \underline{\mu}Q_i^* \\ \hline 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \end{bmatrix} + \underline{\mu}V - \bar{\mu}V \quad (4.7)$$

Em que para fins de facilitar a notação compacta utilizou-se:

$$\pi^P \triangleq \begin{bmatrix} \pi^P_i & i \in NBG \\ \pi^P_i & i \in NBC \end{bmatrix}$$

$$\pi^Q \triangleq \begin{bmatrix} \pi^Q_i & i \in NBG \\ \pi^Q_i & i \in NBC \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mu}_V = \begin{bmatrix} \bar{\mu}_{V_1}^* \\ \bar{\mu}_2^* \\ \vdots \\ \bar{\mu}_{NB}^* \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mu}_{V^*} = \begin{bmatrix} \underline{\mu}_{V_1^*} \\ \underline{\mu}_2^* \\ \vdots \\ \underline{\mu}_{NB}^* \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix}$$

A base teórica da técnica para o estudo de estabilidade de tensão proposta neste trabalho está baseada na análise do sistema matricial (4.7). Um ponto factível de operação $(V_k^*, \theta_k^*, Pg_i^*, Pg_i^*)$, deve atender todas as restrições impostas ao problema (4.2). Relaxando-se as restrições que mantêm os limites das magnitudes das tensões $(V_k^{\min} \leq V_k \leq V_k^{\max})$ no problema (4.2), para qualquer condição de operação (contingências e/ou carregamento), considerando-se que o sistema tenha condição de atender toda a demanda ativa, vai ocorrer que em um dado cenário de operação, não será mais possível atender a demanda de potência reativa. Nesta situação não é mais possível satisfazer a Equação Matricial (4.7), o que permite concluir que a matriz jacobiana que faz parte deste sistema calculada na vizinhança do ponto de operação instável $\underline{x} = (V_k, \theta_k, Pg_i, Pg_i)$ ($i \in \text{NBG}$ e $k = 1, \dots, \text{NB}$) passou por um ponto de singularidade $|J|=0$. A partir dessa conclusão, propõe-se neste trabalho como um índice seguro para análise de estabilidade de tensão, permitir

que o sistema sofra alterações de parâmetros, até o ponto mais próximo a esta condição de factibilidade.

A vantagem dessa técnica está no fato que com o aumento da carga, o operador possa decidir pelas unidades geradoras de menores custos e que não coloquem em risco a estabilidade do sistema.

Para solução do problema (4.2) são propostas na literatura diferentes técnicas de programação não linear (Gradiente Ótimo Reduzido Generalizado, Método do Lagrangeano Aumentado e Métodos de Pontos Interiores aliados ao Método de Newton), técnicas de otimização combinatorial (Algoritmos Evolutivos, Simulated Annealing) e técnica de Programação Linear. Neste trabalho o problema (4.2) é resolvido através de uma técnica denominada Programação Linear Sucessiva (PLS) [Stott83]. Esta técnica consiste de uma sucessão de cálculos de fluxo de carga (não linear) para a obtenção de um ponto de operação (V, θ, Pg, Qg) e programação linear (modelo linear).

Para que o problema (4.2) seja resolvido utilizando a técnica de programação linear sucessiva, as equações estáticas do fluxo de carga são linearizadas em torno de um ponto de operação (θ^0, V^0) . Assim linearizando-se a Equação (4.2) em torno de um ponto de operação, obtém-se:



$$\text{Min} \sum_{i=1}^{BG} Cpg_i \Delta Pg_i + \sum_i^{BG} Cqg_i \Delta Qg_i$$

Sujeito a:

$$\begin{bmatrix} \Delta Pg_i \\ 0 \\ \Delta Qg_i \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta V_k \end{bmatrix} = 0$$

$$i = 1, \dots, \text{NBG}$$

$$k = 1, \dots, \text{NB}$$

$$Pg_i - Pg_i^{\min} \leq \Delta Pg_i \leq Pg_i^{\max} - Pg_i \quad i = 1, \dots, \text{NBG} \quad (4.8)$$

$$Qg_i - Qg_i^{\min} \leq \Delta Qg_i \leq Qg_i^{\max} - Qg_i \quad i = 1, \dots, \text{NBG}$$

$$\theta_i - \theta_i^{\min} \leq \Delta \theta_i \leq \theta_i^{\max} - \theta_i \quad i = 1, \dots, \text{NB}$$

$$V_i - V_i^{\min} \leq \Delta V_i \leq V_i^{\max} - V_i \quad i = 1, \dots, \text{NB}$$

4.2 Implementação Computacional do Algoritmo

Para resolver o problema de controle ótimo de potências ativa e reativa através da técnica de PLS é necessário uma entrada de dados iniciais que são obtidos a partir dos resultados de um programa que calcula o fluxo de carga. Uma vez resolvido o PL os vetores de estado obtidos são utilizados para processar um novo fluxo de carga e reiniciar o

Figura 4.1: Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa

problema de programação linear até atingir a convergência, como indicado no diagrama da Figura (4.1).

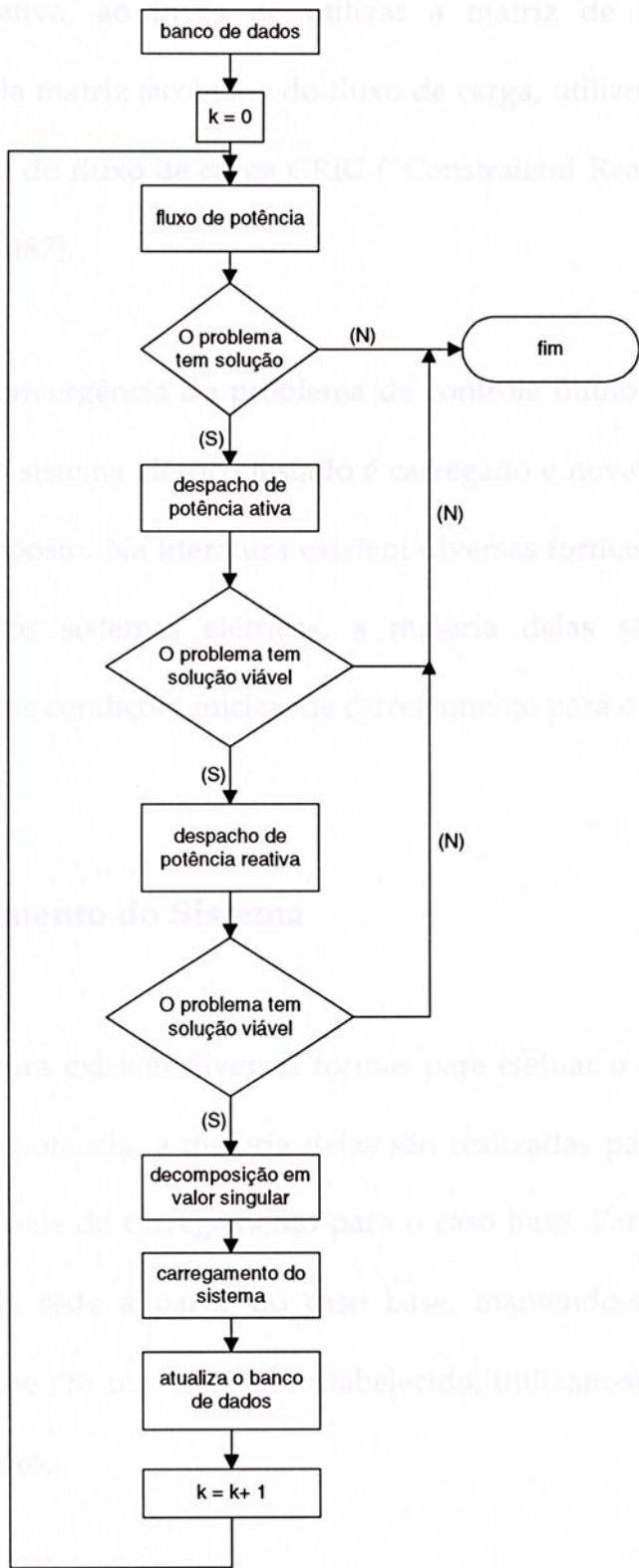


Figura 4.1: Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa.

Na implementação do controle ótimo de potências ativa e reativa foi efetuado o desacoplamento das potências ativa e reativa. No despacho de potência reativa, ao invés de utilizar a matriz de sensibilidade, representada pela matriz jacobiana do fluxo de carga, utilizou-se a matriz jacobiana reativa do fluxo de carga CRIC (“Constraining Reactive Implicit Coupling”) [mant87].

Após a convergência do problema de controle ótimo de potências ativa e reativa, o sistema elétrico testado é carregado e novamente aplica-se o método proposto. Na literatura existem diversas formas de efetuar o carregamento dos sistemas elétricos, a maioria delas são realizadas parametrizando as condições iniciais de carregamento para o caso base.

4.3 Carregamento do Sistema

Na literatura existem diversas formas para efetuar o carregamento dos sistemas de potência, a maioria delas são realizadas parametrizando as condições iniciais de carregamento para o caso base. Para aumentar o carregamento da rede a partir do caso base, mantendo-se o fator de potência constante em um valor preestabelecido, utilizam-se as equações (4.9) e (4.10) abaixo:

$$P_{Ci}^{k+1} = (1 + \lambda) P_{Ci}^k \quad (4.9)$$



$$Q_{Ci}^{k+1} = P_{Ci}^{k+1} \left(\sqrt{\frac{1-fp^2}{fp}} \right) \quad (4.10)$$

Em que:

- fp – fator de potência;
- λ – fator de carregamento.

A parametrização do crescimento da carga, mantendo o fator de potência do próprio sistema, é realizada utilizando as equações (4.11) e (4.12) a seguir:

$$P_{Ci}^{k+1} = (1 + \lambda) P_{Ci}^k \quad (4.11)$$

$$Q_{Ci}^{k+1} = (1 + \lambda) Q_{Ci}^k \quad (4.12)$$

O fator de carregamento λ , também é conhecido como parâmetro da bifurcação. No caso base (entrada de dados iniciais) este parâmetro é assumido ser nulo e após a convergência do método proposto em cada condição de operação este parâmetro é aumentado uniformemente até atingir o ponto de bifurcação sela-nó, no fluxo de potência padrão (FPP) e no método proposto até o sistema testado atingir o ponto de infactibilidade, ou seja, não atender as condições de KKT.

Os testes foram realizados considerando-se um sistema teste hipotético de três barras e três linhas, os sistemas elétricos AEP 30 [Pro68] e IEEE118 [Lab184] e um sistema real brasileiro de 309 barras, em que os dados de barras e de linhas encontram-se no Apêndice A.

As implementações computacionais foram realizadas na linguagem FORTRAN e para o processo de otimização utilizou-se uma subrotina

5 **Testes e Resultados**

implementação computacional do algoritmo de controle ótimo de potências ativa e reativa, os limites dos ângulos das tensões nas barras dos

sistemas testados, foram mantidos "abertos" exceto para a barra slack que teve os limites inferiores e superiores fixos em 0 rad.

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos através de testes utilizando-se as técnicas de controle ótimo de potências ativa e reativa (CPAR) e de decomposição em valor singular (DVS). Discute-se os principais aspectos envolvidos na aplicação da metodologia proposta para a análise de estabilidade de tensão, tais como: as tensões das barras, os pontos de infactibilidade e os valores singulares mínimos obtidos em cada condição de carregamento para os sistemas elétricos testados.

Para fins de comparação com a metodologia proposta neste trabalho, são apresentados os resultados obtidos utilizando-se a técnica de fluxo de carga convencional (FCC) e a técnica de controle ótimo de potência reativa (CPR), detalhada em [Mant87].

Os testes foram realizados considerando-se um sistema teste hipotético de três barras e três linhas, os sistemas elétricos AEP 30 [Fre68] e IEEE118 [Lebl84] e um sistema real brasileiro de 309 barras, em que os dados de barras e de linhas encontram-se no Apêndice A.

As implementações computacionais foram realizadas na linguagem FORTRAN e para o processo de otimização utilizou-se uma subrotina comercial de P.L. que faz parte do pacote MINOS [Min5.4]. Para a implementação computacional do algoritmo de controle ótimo de potências ativa e reativa, os limites dos ângulos das tensões nas barras dos sistemas testados, foram mantidos “abertos” exceto para a barra *slack* que teve os limites inferiores e superiores fixos em 0 *rad*.

As tolerâncias adotadas para a obtenção dos testes foram respectivamente, 10^{-6} para a convergência dos valores singulares mínimos e 10^{-4} para a convergência dos programas de fluxo de carga utilizados (fluxo de carga convencional da programação linear sucessiva, fluxo de carga com controle de geração de reativos).



5.1 Sistema Hipotético de Três Barras

O diagrama unifilar deste sistema e seus respectivos dados de barras e de linhas foram apresentados no Capítulo 3. Este sistema apresenta as seguintes características:

- 01 barra de folga ou *slack* ($V\theta$);
- 01 barra com controle de reativo (PV);
- 01 barra de carga (PQ);
- 03 linhas de transmissão.

Seu carregamento foi realizado aumentando-se a potência aparente (S) da barra de carga (barra 3), na qual manteve-se o fator de potência (fp) constante e igual a 0,89 em todas as condições de carregamento.

A técnica proposta neste trabalho e a técnica de controle ótimo de potência reativa requer a especificação de alguns limites, tais como: tensão, potências ativa e reativa geradas. Para análise destas técnicas utilizou-se os seguintes limites:

- Tensão:

$$0,0 \leq V \leq 1,2 \text{ p.u.};$$

- Potências reativa gerada na barra *slack* e PV:

$$-0,45 \leq Q_g \leq 0,45 \text{ p.u.};$$

- Potências reativa gerada na barra *slack* e PV:

$$0,0 \leq Pg_1 \leq 1,5 \text{ p.u.};$$

$$0,0 \leq Pg_2 \leq 1,0 \text{ p.u..}$$

Os coeficientes de custo das variáveis de decisão (Pg_i , Qg_i) foram adotados constantes e iguais a 1 em todas as condições de carregamento.

5.1.1 Fluxo de Carga Convencional (FCC)

Nas Figuras 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, o comportamento das magnitudes de tensões na barra 3 (PQ) e dos valores singulares mínimos em função do carregamento de potência aparente. Neste teste o sistema foi carregado até atingir um ponto próximo ao ponto de colapso, ou seja, até um ponto de operação em que sua matriz jacobiana está preste a se tornar singular.

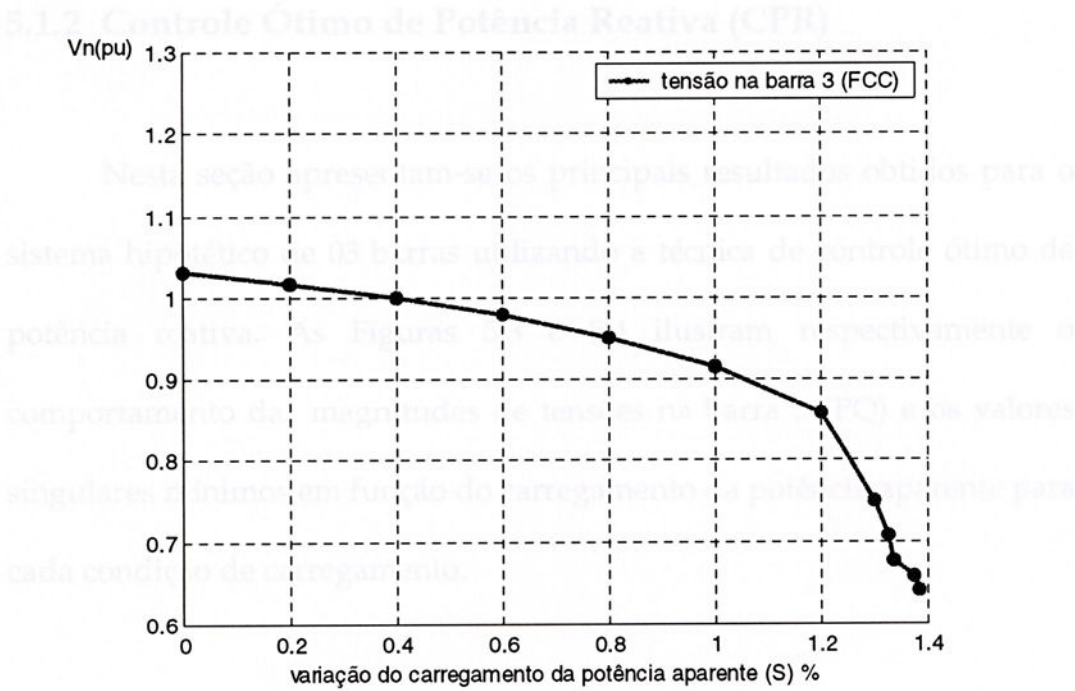


Figura 5.1: Tensão na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica fluxo de carga convencional.

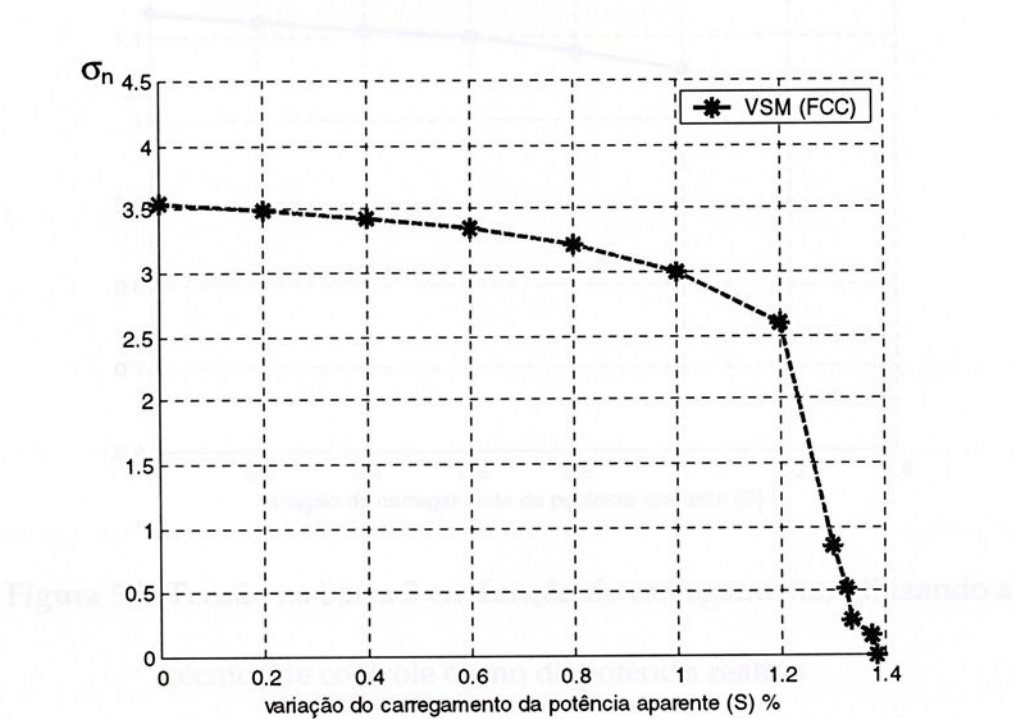


Figura 5.2: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional .

5.1.2 Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)

Nesta seção apresentam-se os principais resultados obtidos para o sistema hipotético de 03 barras utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa. As Figuras 5.3 e 5.4 ilustram respectivamente o comportamento das magnitudes de tensões na barra 3 (PQ) e os valores singulares mínimos em função do carregamento da potência aparente para cada condição de carregamento.

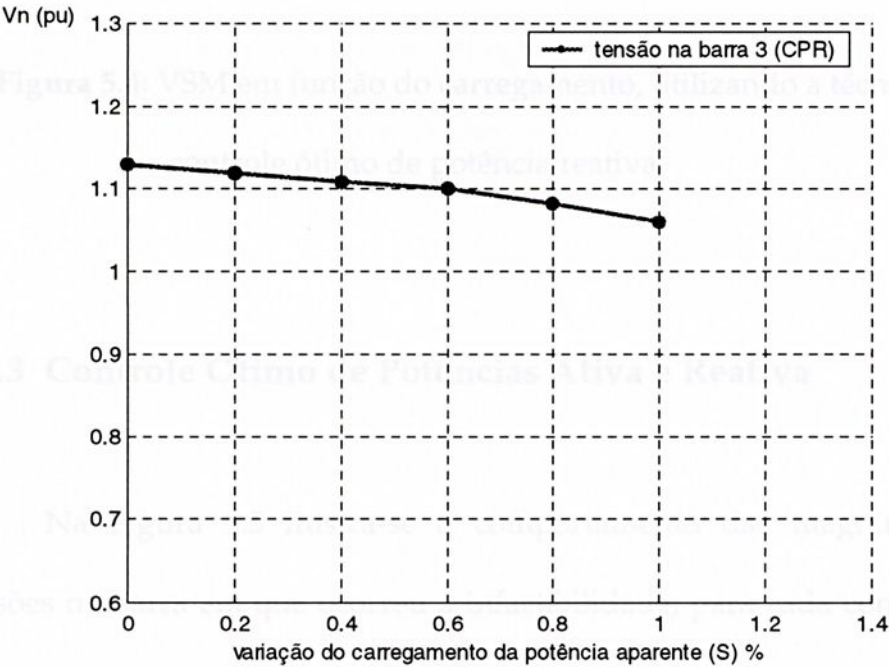


Figura 5.3: Tensão na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa.

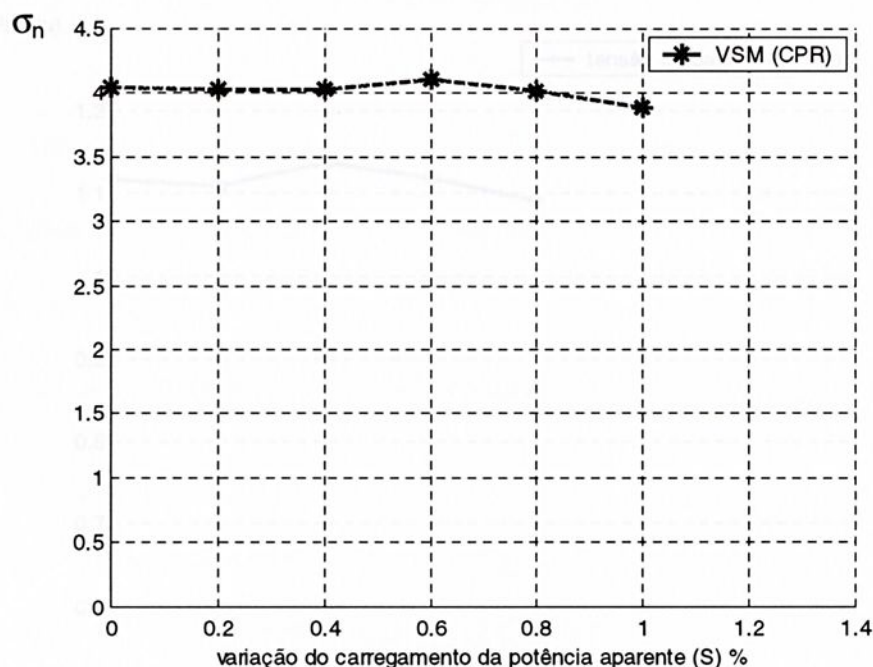


Figura 5.4: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa.

5.1.3 Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa

Na Figura 5.5 ilustra-se o comportamento das magnitudes de tensões na barra em que ocorreu a infactibilidade, para cada condição de carregamento em que este sistema atende as restrições de igualdade e desigualdade e as condições de KKT, enquanto na Figura 5.6 apresentam-se os valores singulares mínimos obtidos para as condições citadas acima.

5.1.4 Decomposição em Valor Singular

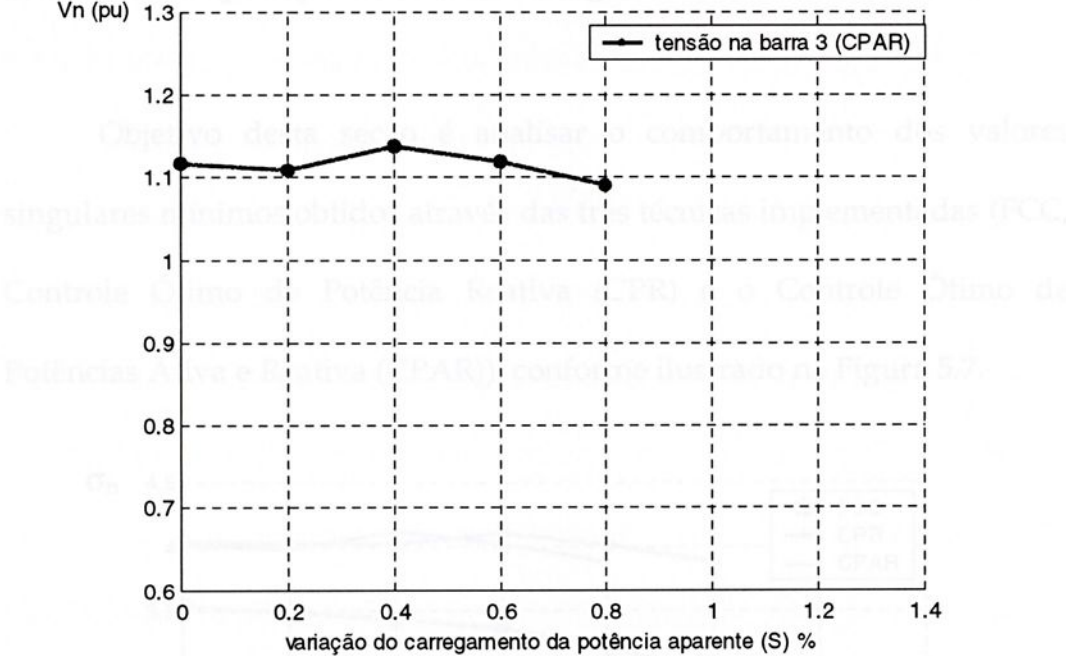


Figura 5.5: Tensão na barra 3 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potências ativa e reativa.

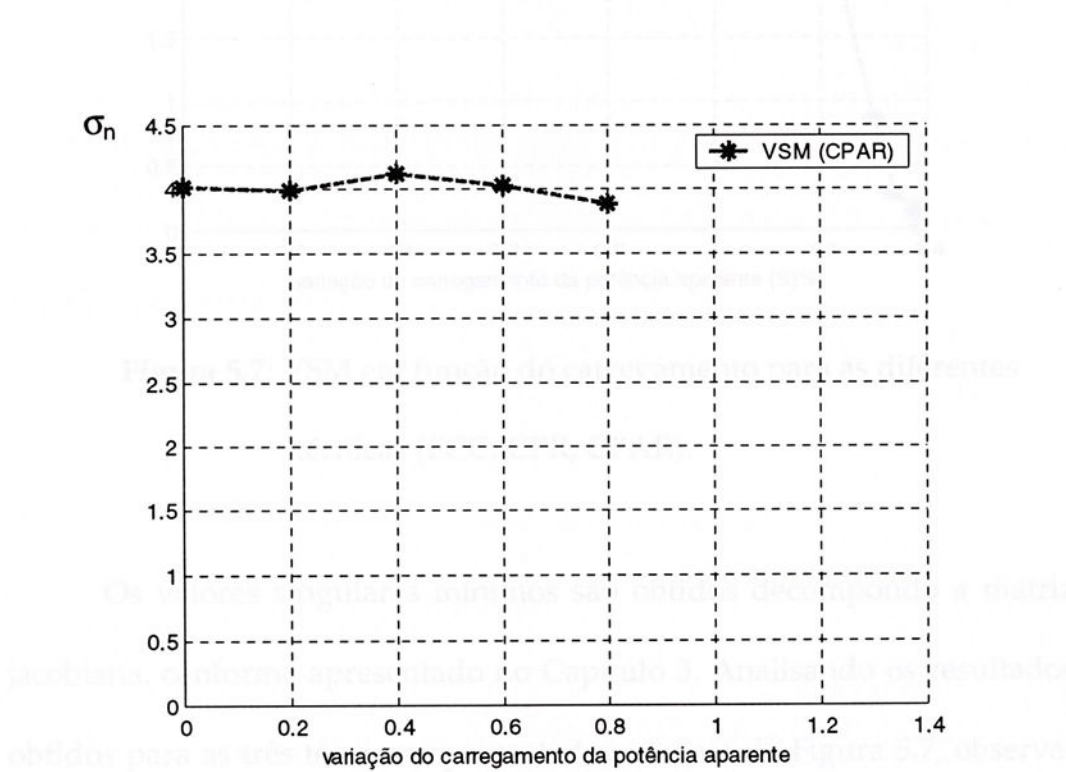


Figura 5.6: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potências ativa e reativa.

5.1.4 Decomposição em Valor Singular

Objetivo desta seção é analisar o comportamento dos valores singulares mínimos obtidos através das três técnicas implementadas (FCC, Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR) e o Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)), conforme ilustrado na Figura 5.7.

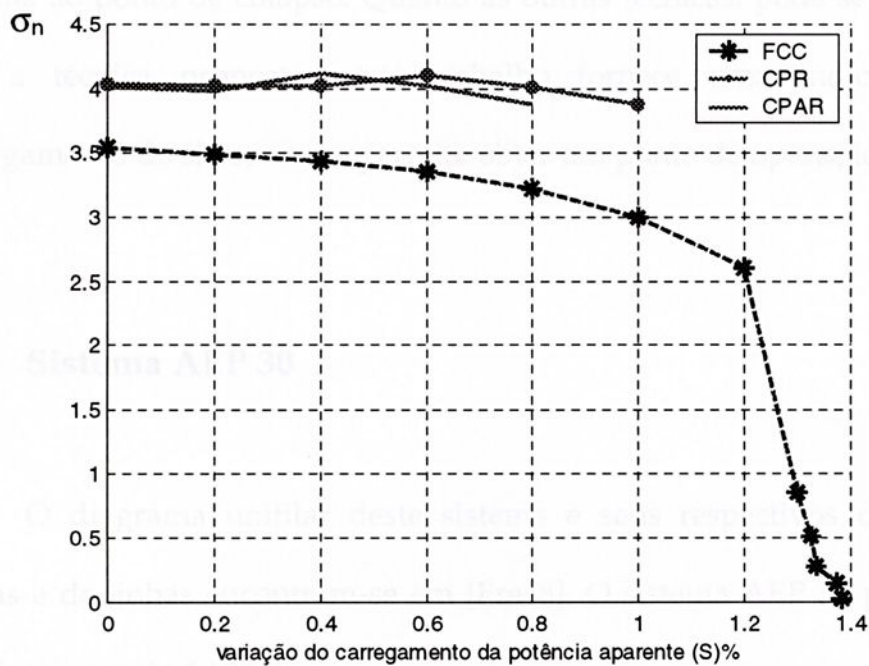


Figura 5.7: VSM em função do carregamento para as diferentes técnicas (FCC, CPR, CPAR).

Os valores singulares mínimos são obtidos decompondo a matriz jacobiana, conforme apresentado no Capítulo 3. Analisando os resultados obtidos para as três técnicas apresentadas, através da Figura 5.7, observa-se que ao aplicar a técnica de decomposição em valor singular na matriz jacobiana do fluxo de carga convencional, à medida em que o sistema é

perturbado através do carregamento da barra de carga, a barra PV atinge o seu limite de potência reativa gerada, tornando-se uma barra do tipo PQ.

Observando-se o gráfico da técnica FCC apresentado na Figura 5.7, esta troca do tipo de barra ocorre entre 120% e 130% do carregamento da potência aparente, e nestas condições de carga, há um “salto” na magnitude do valor singular mínimo, que conduz mais rapidamente o sistema ao ponto de colapso. Quanto às outras técnicas, pode-se ressaltar que a técnica proposta neste trabalho fornece uma indicação do carregamento do sistema que permite obter um ponto de operação seguro.

5.2 Sistema AEP 30

O diagrama unifilar deste sistema e seus respectivos dados de barras e de linhas encontram-se em [Fre68]. O sistema AEP 30 possui as seguintes características:

- 01 barra de folga ou *slack* (V_θ);
- 05 barras com controle de reativos (PV);
- 24 barras de carga (PQ);
- 41 linhas de transmissão;
- 04 transformadores com *tap* variável.

Nas implementações computacionais deste sistema elétrico as tensões nas barras PV's e PQ's foram mantidas dentro do limite $0,0 \leq V \leq 1,2 \text{ p.u.}$, enquanto para a barra "slack" foi dentro do limite $0,0 \leq V \leq 1,1 \text{ p.u.}$. O carregamento foi realizado apenas nas barras 17, 18, 19 e 20, mantendo o fator de potência do próprio sistema.

Na Tabela 5.1 apresentam-se os limites de potências ativa e reativa gerada das barras PV's e slack, adotados para a implementação do algoritmo de controle ótimo de potências ativa e reativa.

Tabela 5.1: Limites das barras de geração utilizados nas simulações do sistema AEP 30.

Limites das Barras de Geração Sistema AEP 30					
Barra	Tipo	Pot. Ativa (p.u)		Pot. Reativa (p.u)	
		P_{gmin}	P_{gmax}	Q_{gmin}	Q_{gmax}
1	Vθ	0,00	1,10	0,00	0,00
2	PV	0,00	0,80	-0,40	0,50
5	PV	0,00	0,70	-0,40	0,40
8	PV	0,00	0,50	-0,10	0,40
11	PV	0,00	0,55	-0,06	0,24
13	PV	0,00	0,35	-0,06	0,24

5.2.1 Fluxo de Carga Convencional

As Figura 5.8 e 5.9 ilustram, respectivamente, o comportamento das magnitudes de tensões na barra 26 (PQ) e dos valores singulares mínimos

em função do carregamento da potência aparente do sistema elétrico testado.

Na implementação desta técnica o sistema foi carregado até atingir um ponto de operação muito próximo ao ponto de colapso, pois a partir deste ponto de operação, qualquer pequena perturbação no sistema torna-se impossível atender as demandas de potências ativa e reativa.

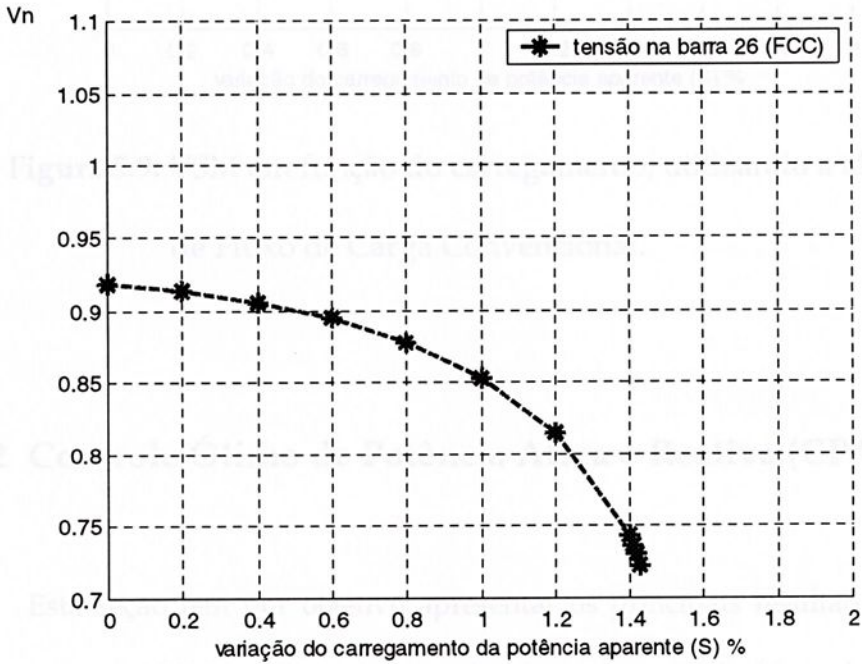


Figura 5.8: Tensão na barra 26 em função do carregamento, utilizando a técnica de Fluxo de Carga Convencional.

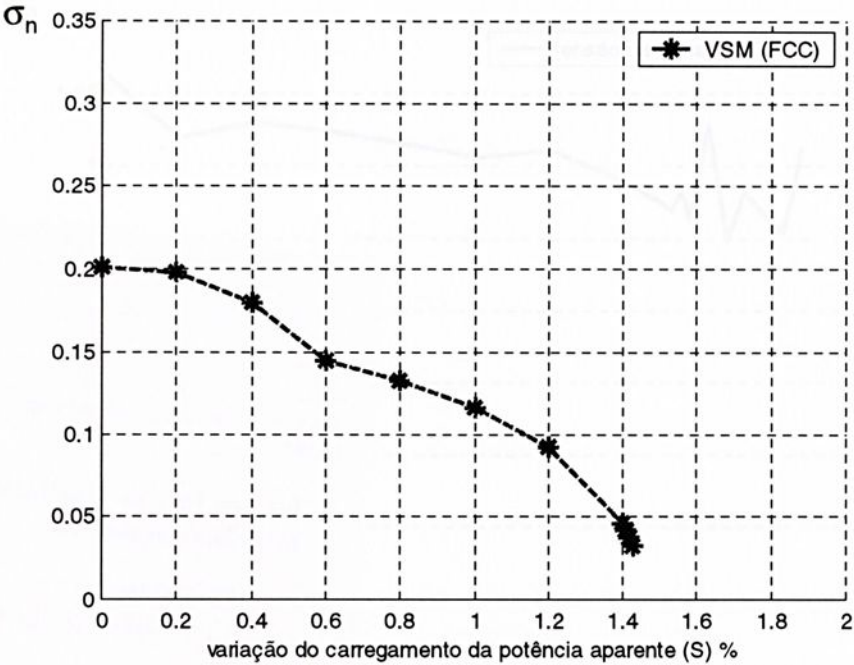


Figura 5.9: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de Fluxo de Carga Convencional.

5.2.2 Controle Ótimo de Potência Ativa e Reativa (CPAR)

Esta seção tem por objetivo apresentar os principais resultados obtidos para o sistema AEP 30, utilizando-se o algoritmo de controle ótimo de potências ativa e reativa. A Figura 5.10 ilustra o comportamento da magnitude de tensão na barra em que ocorreu a infactibilidade enquanto a Figura 5.11 mostra o comportamento dos valores singulares mínimo em função do carregamento da potência aparente. Os coeficientes de custo das variáveis de decisão (P_{gi} , Q_{gi}) foram adotados constantes e iguais a 1 em todas as condições de carregamento.

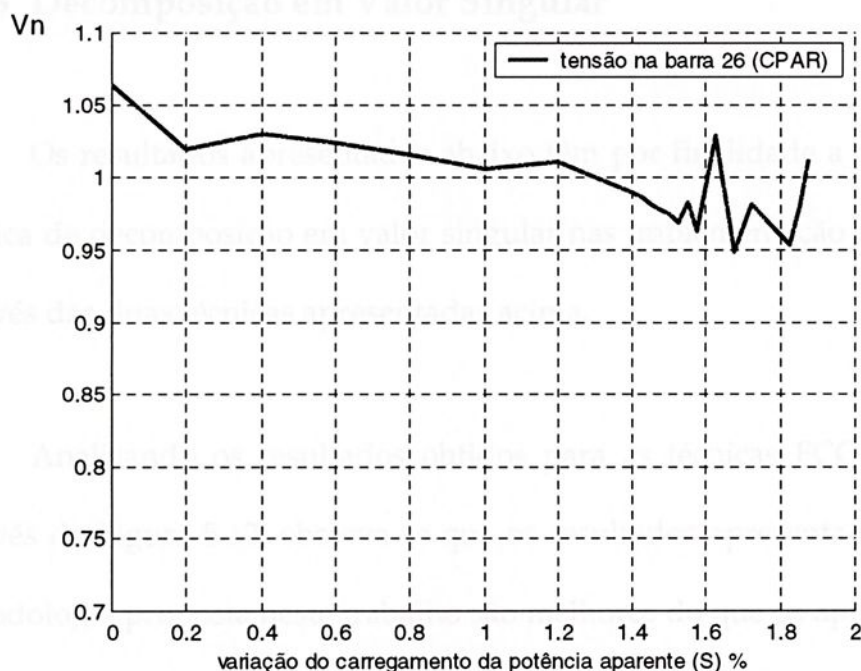


Figura 5.10: Tensões na barra 26 em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa.

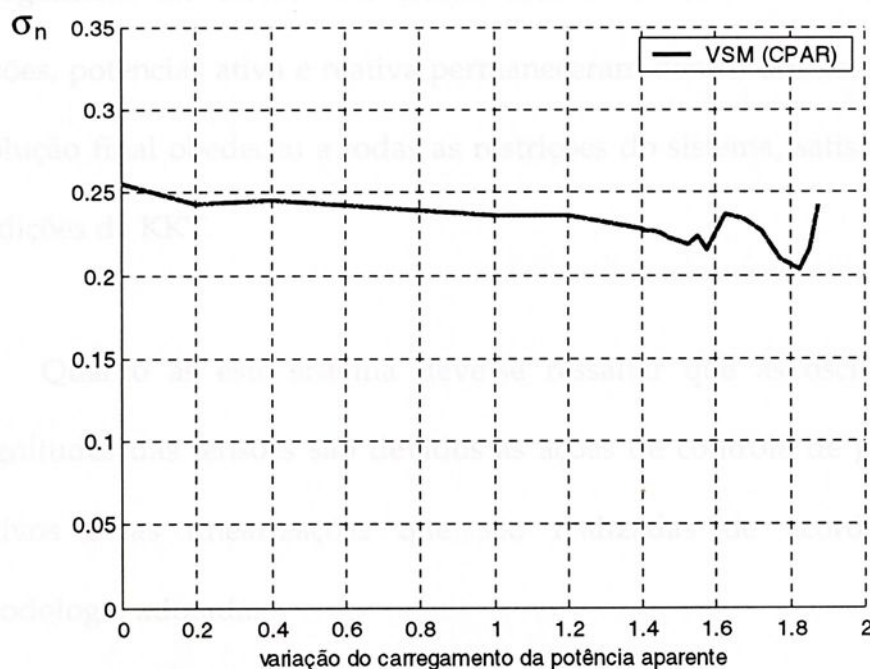


Figura 5.11: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa.

5.2.3 Decomposição em Valor Singular

Os resultados apresentados abaixo têm por finalidade a análise da técnica de decomposição em valor singular nas implementações realizadas através das duas técnicas apresentadas acima.

Analizando os resultados obtidos para as técnicas FCC e CPAR, através da Figura 5.12, observa-se que os resultados apresentados para a metodologia proposta neste trabalho são melhores do que os apresentados quando utiliza-se a técnica FCC.

Para este sistema foi possível aumentar com segurança o valor do carregamento até 187,5%. No estado final do sistema AEP 30, todas as tensões, potências ativa e reativa permaneceram dentro dos seus limites e a solução final obedeceu a todas as restrições do sistema, satisfazendo as condições de KKT.

Quanto a este sistema deve-se ressaltar que as oscilações nas magnitudes das tensões são devidos às ações de controle de geração de reativos e as linearizações que são realizadas de acordo com a metodologia adotada.

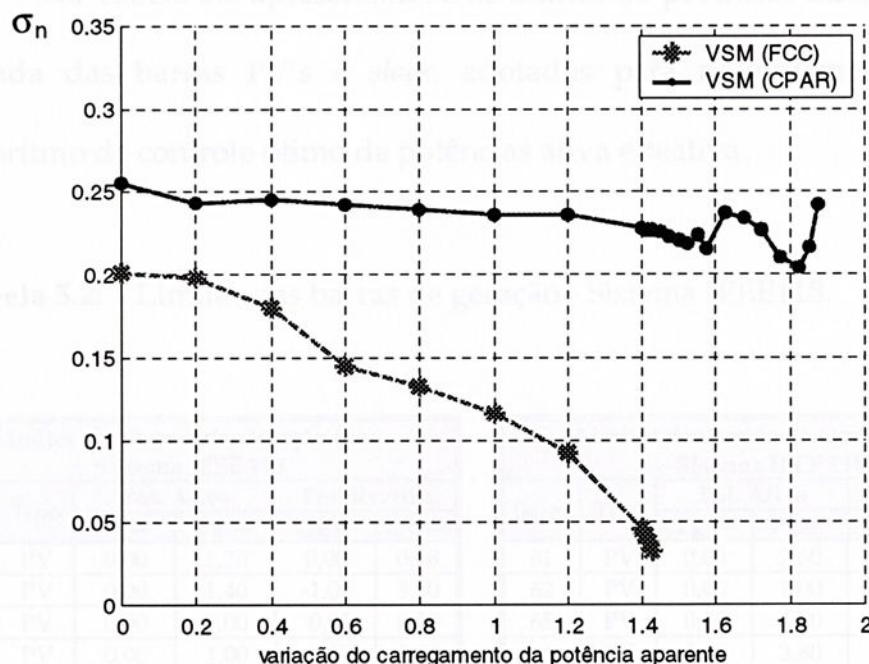


Figura 5.12: VSM em função do carregamento para as diferentes técnicas de análise do problema (FCC e CPAR)

5.3 Sistema IEEE 118

Em [Lebl84] apresenta-se o sistema IEEE 118 e seus respectivos dados de barras e de linhas. Este sistema possui as seguintes características:

- 01 barra de folga ou *slack* ($V\theta$);
- 60 barras com controle de reativos (PV)
- 57 barras de carga (PQ)
- 179 linhas de transmissão;
- 09 transformadores com *tap* variável.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os limites de potências ativa e reativa gerada das barras PV's e *slack*, adotados para a implementação do algoritmo de controle ótimo de potências ativa e reativa.

Tabela 5.2: Limites das barras de geração - Sistema IEEE118.

Limites das Barras de Geração (p.u) Sistema IEEE 118					
Barra	Tipo	Pot. Ativa		Pot. Reativa	
		P _{gmin}	P _{gmax}	Q _{gmin}	Q _{gmax}
1	PV	0,00	1,20	0,00	0,08
4	PV	0,00	1,40	-1,00	3,00
6	PV	0,00	1,00	-0,05	0,30
8	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
10	PV	0,00	4,00	-1,00	3,00
12	PV	0,00	1,80	-0,30	0,75
15	PV	0,00	1,00	-0,05	0,23
17	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
18	PV	0,00	1,00	-0,05	0,23
19	PV	0,00	1,00	-0,05	0,15
20	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
21	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
22	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
24	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
25	PV	0,00	3,20	-1,00	3,00
26	PV	0,00	3,90	-3,00	6,00
27	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
30	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
31	PV	0,00	1,07	-1,00	3,00
32	PV	0,00	1,00	-0,05	0,23
34	PV	0,00	1,00	-0,05	0,23
36	PV	0,00	1,00	-0,05	0,15
38	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
40	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
42	PV	0,00	0,00	-1,00	3,00
46	PV	0,00	1,19	-1,00	3,00
49	PV	0,00	3,04	-1,00	3,00
54	PV	0,00	1,48	-1,00	3,00
55	PV	0,00	1,00	-0,05	0,11
56	PV	0,00	1,00	-0,05	0,11
59	PV	0,00	2,55	-1,00	3,00

Limites das Barras de Geração (p.u) Sistema IEEE 118					
Barra	Tipo	Pot. Ativa		Pot. Reativa	
		P _{gmin}	P _{gmax}	Q _{gmin}	Q _{gmax}
61	PV	0,00	2,60	-1,00	3,00
62	PV	0,00	1,00	0,00	0,08
65	PV	0,00	4,00	-1,00	3,00
66	PV	0,00	3,80	-1,00	3,00
69	Vθ	0,00	6,00	0,00	0,00
70	PV	0,00	1,00	0,00	0,08
71	PV	0,00	0,00	0,00	0,00
72	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
73	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
74	PV	0,00	1,00	0,00	0,00
76	PV	0,00	1,00	0,00	0,08
77	PV	0,00	1,00	-0,10	0,38
80	PV	0,00	4,10	-1,00	3,00
85	PV	0,00	1,00	0,00	0,08
87	PV	0,00	1,04	-1,00	3,00
89	PV	0,00	6,30	-1,00	3,00
90	PV	0,00	1,00	0,00	0,00
91	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
92	PV	0,00	1,00	0,00	0,08
99	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
100	PV	0,00	3,00	-1,00	3,00
103	PV	0,00	1,20	-0,05	0,15
104	PV	0,00	1,00	-0,05	0,15
105	PV	0,00	1,00	-0,05	0,15
107	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
110	PV	0,00	1,00	0,00	0,01
111	PV	0,00	1,20	-1,00	3,00
112	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
113	PV	0,00	1,00	-1,00	3,00
116	PV	0,00	1,00	-2,50	5,25

Neste sistema carregou-se a potência aparente de todas as barras PQ's, mantendo o fator de potência do próprio sistema. Os limites de tensões nas barras PV's e PQ's foram mantidos dentro do limite $0,55 \leq V \leq 1,15$ p.u. enquanto para a barra "slack" foi mantido em $0,55 \leq V \leq 1,05$ p.u.. Na implementação dos testes realizados com este sistema manteve-se as tensões iniciais em 1 p.u. e os coeficientes de custo das variáveis de decisão (P_{gi} , Q_{gi}) foram adotados constantes e iguais a 1 em todos as condições de carregamento.

5.3.1 Fluxo de Carga Convencional

Na Figura 5.13 tem-se finalidade ilustrar o comportamento das magnitudes de tensões das barras na qual ocorreram as infactibilidades (43, 48 e 82).

Na Figura 5.14 apresentam-se os valores singulares mínimos obtidos para este teste em cada condição de carregamento em que a matriz jacobiana do fluxo de carga deste sistema é não singular.

Figura 5.14: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional.

5.3.2 Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)

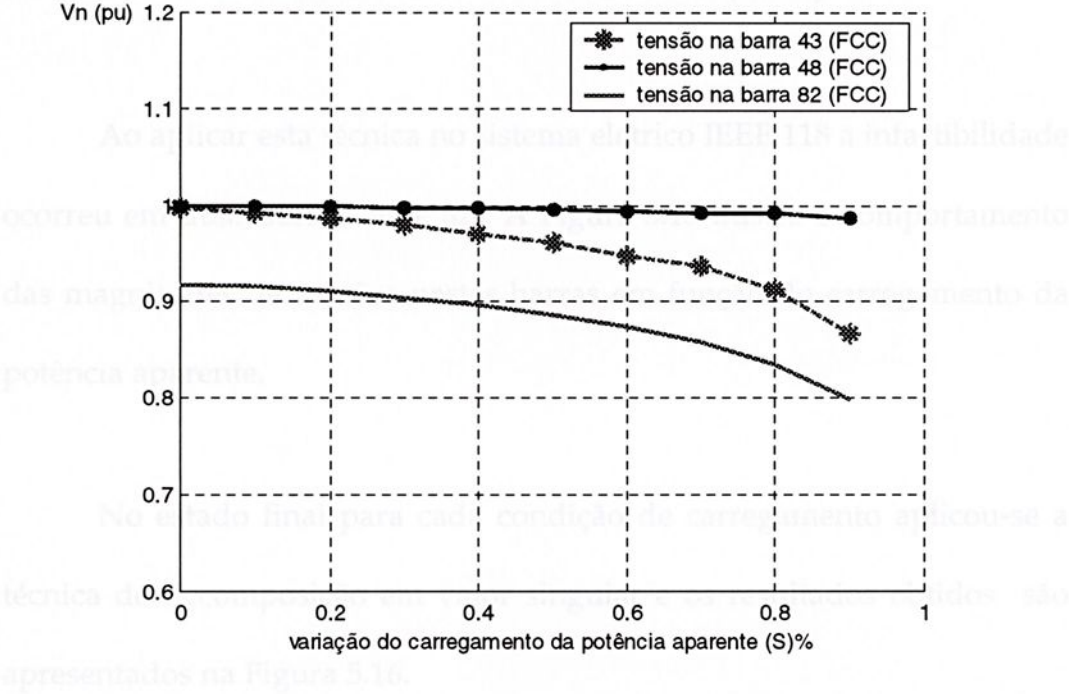


Figura 5.13: Tensões nas barras 43, 48 e 82 em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional.

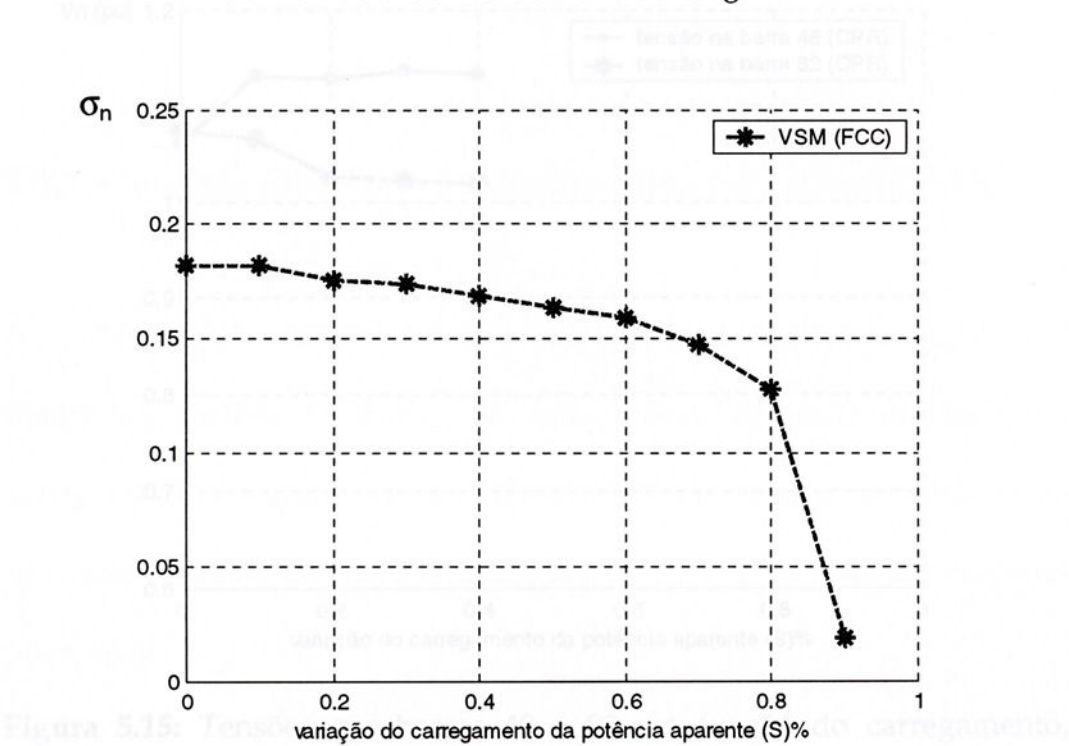


Figura 5.15: Tensões nas barras 43 e 82 em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional.

Figura 5.14: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de fluxo de carga convencional.

5.3.2 Controle Ótimo de Potência Reativa (CPR)

Ao aplicar esta técnica no sistema elétrico IEEE 118 a infactibilidade ocorreu em duas barras (48 e 82). A Figura 5.15 ilustra o comportamento das magnitudes de tensões nestas barras em função do carregamento da potência aparente.

No estado final para cada condição de carregamento aplicou-se a técnica de decomposição em valor singular e os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.16.

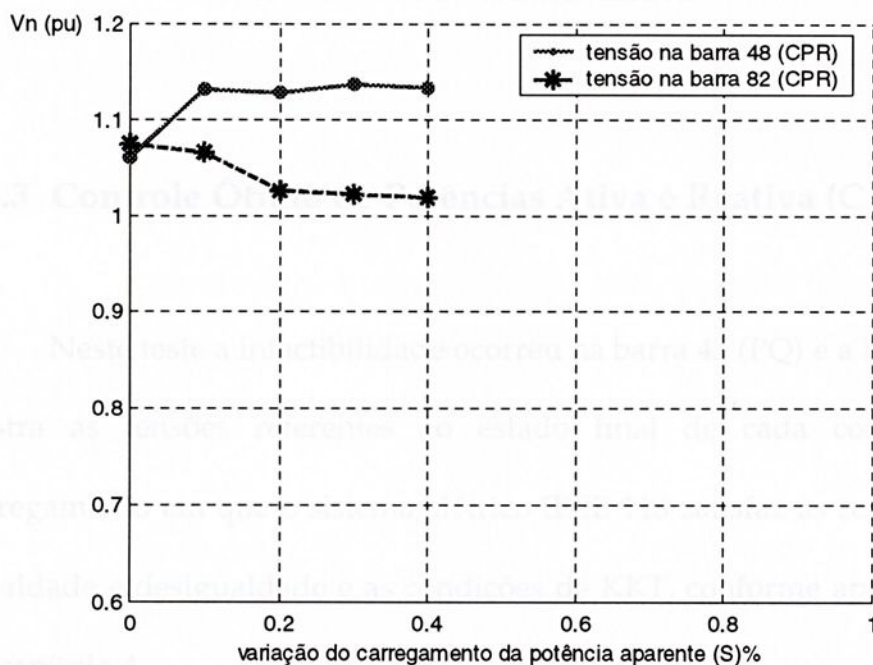


Figura 5.15: Tensões nas barras 48 e 82 em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potência Reativa.

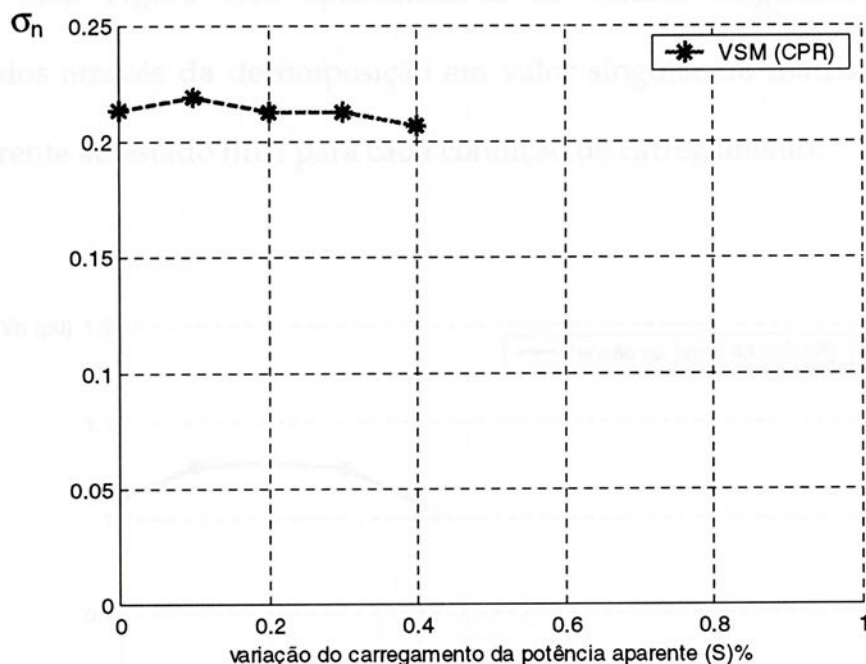


Figura 5.16: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potência Reativa.

5.3.3 Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa (CPAR)

Neste teste a infactibilidade ocorreu na barra 43 (PQ) e a Figura 5.17 ilustra as tensões referentes ao estado final de cada condição de carregamento em que o sistema elétrico IEEE 118 satisfaz as restrições de igualdade e desigualdade e as condições de KKT, conforme apresentadas no capítulo 4.

Na Figura 5.18 apresentam-se os valores singulares mínimos obtidos através da decomposição em valor singular da matriz jacobiana referente ao estado final para cada condição de carregamento.

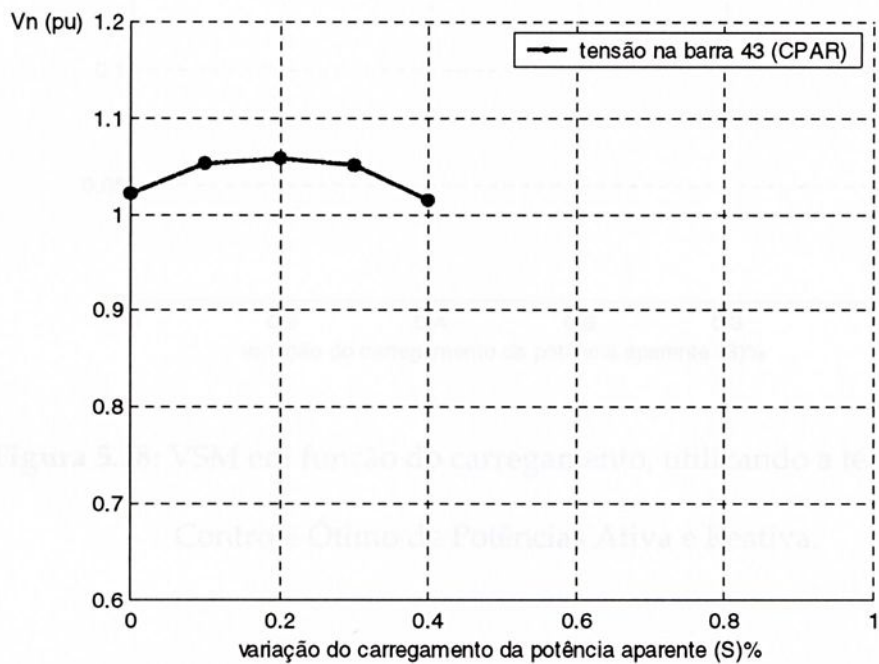


Figura 5.17: Tensão na barra 43 em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa.

Na figura 5.19 apresentam-se os valores singulares mínimos obtidos através da metodologia proposta neste trabalho (CPAR) e das técnicas utilizadas para fins de comparação (PQ e PQ+PFC).

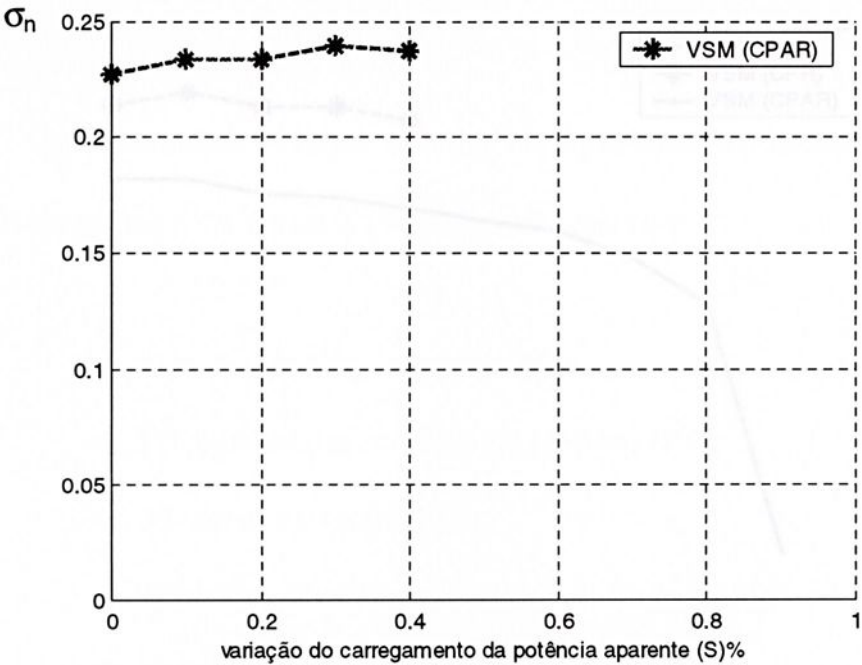


Figura 5.18: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de Controle Ótimo de Potências Ativa e Reativa.

5.3.4 Decomposição em Valor Singular

Na Figura 5.19 apresentam-se os valores singulares mínimos obtidos através da metodologia proposta neste trabalho (CPAR) e das técnicas utilizadas para fins de comparação (FCC e CPR).

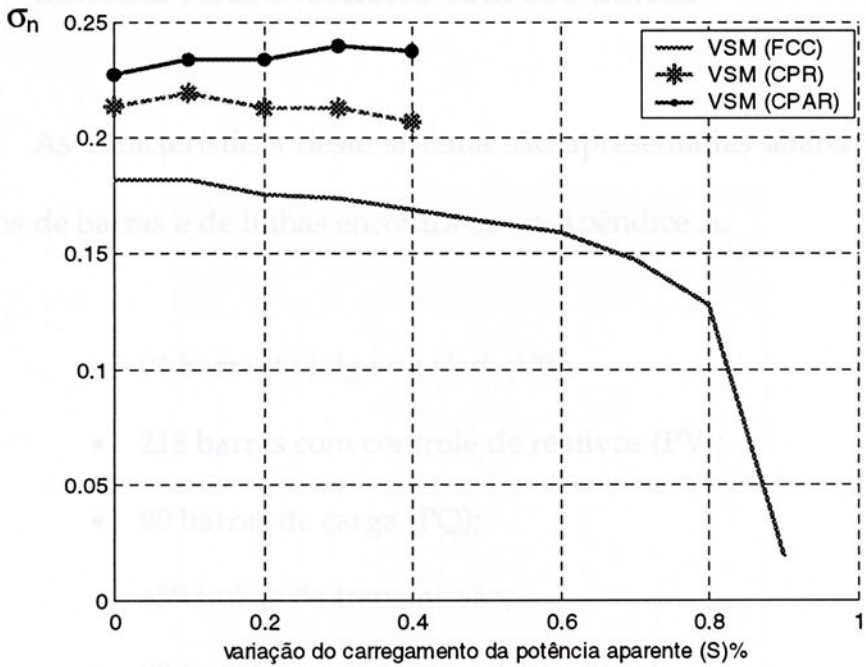


Figura 5.19: VSM em função do carregamento, para as diferentes técnicas de análise do problema (FCC, CPR e CPAR).

Analisando a Figura 5.19 observa-se que o comportamento dos valores singulares mínimos são mais estáveis para o caso da metodologia proposta neste trabalho, que o comportamento dos obtidos quando utiliza-se a técnica de fluxo de carga convencional, pois conforme citado na seção 5.1.4, na técnica FCC as magnitudes dos valores singulares mínimos apresentam “saltos” quando as barras do tipo PV atingem seus limites de reativos, transformando-se em barras do tipo PQ.

5.4 Sistema Real Brasileiro com 309 Barras

As características deste sistema são apresentadas abaixo e os seus dados de barras e de linhas encontra-se no Apêndice A.

- 01 barra de folga ou *slack* (V_0);
- 218 barras com controle de reativos (PV);
- 90 barras de carga (PQ);
- 459 linhas de transmissão;
- 80 transformadores com *tap* variável.

Nas implementações computacionais deste sistema as tensões nas barras foram mantidas dentro do limite $0,75 \leq V \leq 1,10 p.u$ e o carregamento realizado apenas nas barras 102, 135, 145, 165, 173, 197, 212 e 219, nas quais manteve-se o fator de potência do próprio sistema.

Neste sistema apenas algumas barras PV's possuem limites de geração diferentes de zero, conforme apresentado na Tabela 5.3. Além destas considerações, em todas as condições de carregamento as tensões e ângulos iniciais foram mantidos respectivamente em $1 p.u.$ e $0 rad$ e os coeficientes de custo das variáveis de decisão (P_{gi} , Q_{gi}) adotados constantes e iguais a 1.

Tabela 5.3: Limites das barras de geração - Sistema Real Brasileiro de 309 barras.

Limites das Barras de Geração Sistema Real Brasileiro de 309 barras					
Barra	Tipo	Pot. Ativa (p.u)		Pot. Reativa (p.u)	
		P _{gmin}	P _{gmax}	Q _{gmin}	Q _{gmax}
1	PV	0,000	13,960	-5,400	5,400
2	Vθ	0,000	34,440	-10,000	10,000
3	PV	0,000	12,21	-4,800	4,800
4	PV	0,000	2,220	-0,600	0,600
5	PV	0,000	0,980	-0,520	0,520
6	PV	0,000	6,400	-2,000	2,000
7	PV	0,000	3,720	-1,600	1,600
8	PV	0,000	0,740	-0,360	0,360
9	PV	0,000	5,540	-1,120	1,120
10	PV	0,000	4,140	-1,200	1,200
11	PV	0,000	1,430	-0,690	0,690
12	PV	0,000	1,410	-0,560	0,560
13	PV	0,000	1,320	-0,540	0,540
14	PV	0,000	3,470	-1,440	1,440
15	PV	0,000	2,640	-1,400	1,400
16	PV	0,000	8,080	0,000	0,000
17	PV	0,000	0,800	-0,500	0,500
18	PV	0,000	1,090	-0,680	0,680
19	PV	0,000	0,320	-0,170	0,170
20	PV	0,000	0,280	-0,180	0,180
21	PV	0,000	0,860	-0,520	0,520
22	PV	0,000	0,000	-1,700	1,700
23	PV	0,000	0,000	-1,700	1,700

5.4.1 Fluxo de Carga Convencional

Neste teste não foi possível realizar o carregamento do sistema, pois o mesmo já se encontra em seus limites operacionais, ou seja, o ponto de operação inicial deste sistema está muito próximo do ponto crítico, e para qualquer pequena perturbação o sistema pode atingir um ponto de operação instável, e nestas condições a matriz jacobiana do fluxo de potência está prestes a tornar-se singular.

5.4.2 Controle Ótimo de Potência Reativa

Na Figura 5.20 apresenta-se o gráfico do comportamento da magnitude de tensão na barra que ocorreu a infactibilidade ao utilizar esta técnica enquanto a Figura 5.21 o comportamento dos valores singulares mínimos obtidos no estado final de cada condição de carregamento.

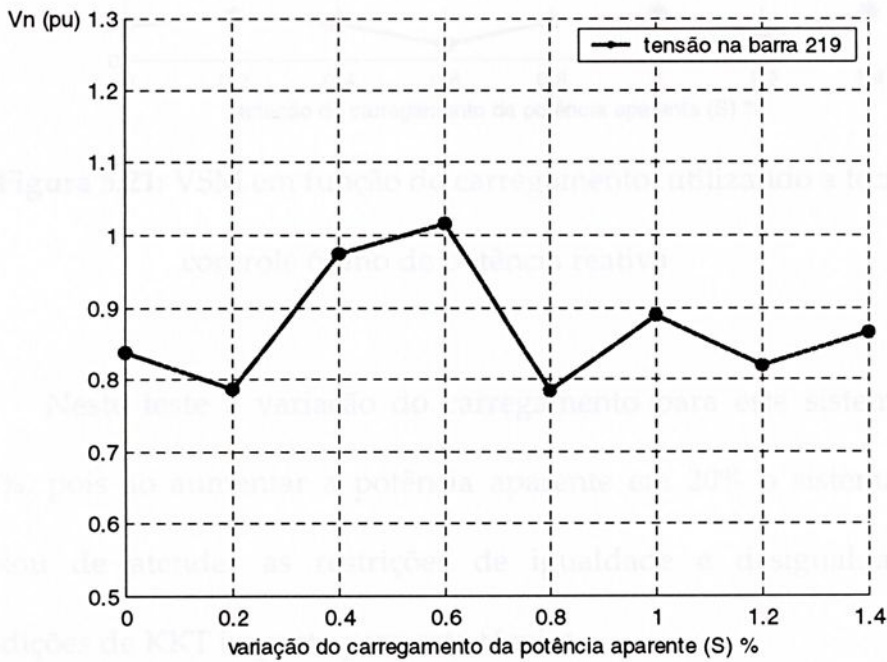


Figura 5.20: Tensão na barra 219 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa

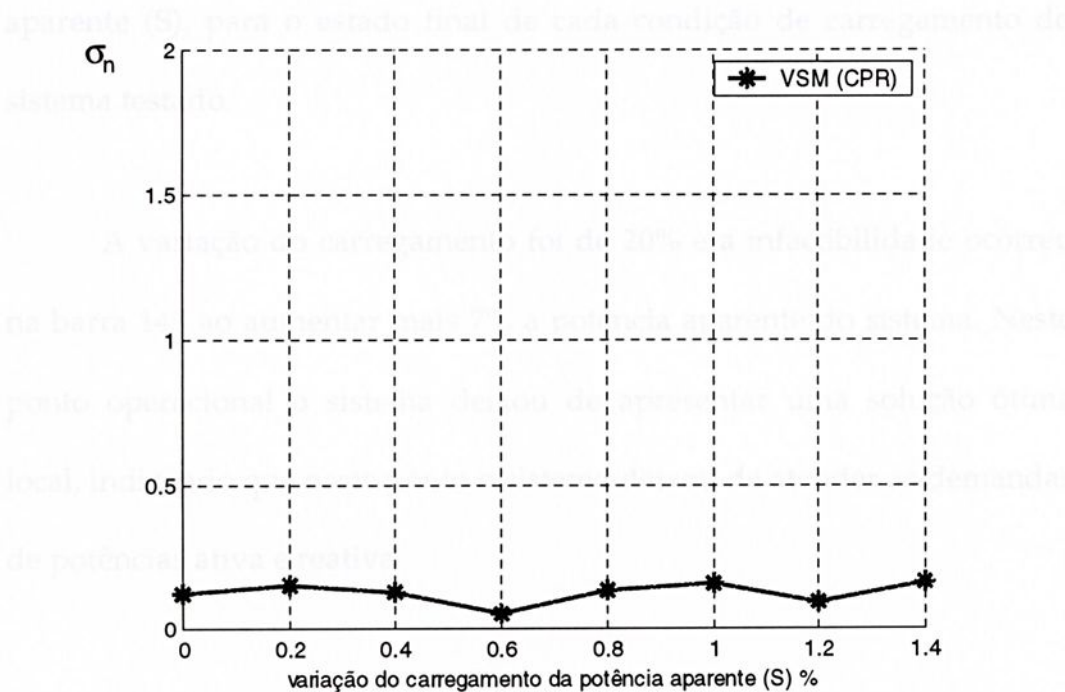


Figura 5.21: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potência reativa

Neste teste a variação do carregamento para este sistema foi de 140%, pois ao aumentar a potência aparente em 20% o sistema testado deixou de atender as restrições de igualdade e desigualdade e as condições de KKT imposta para esta técnica.

5.4.3 Controle Ótimo de Potência Ativa e Reativa

Nas Figuras 5.22 e 5.23 apresentam-se respectivamente, o comportamento das magnitudes de tensões na barra 145 (PQ) e dos valores singulares mínimos em função do carregamento da potência

aparente (S), para o estado final de cada condição de carregamento do sistema testado.

A variação do carregamento foi de 20% e a infactibilidade ocorreu na barra 145 ao aumentar mais 7% a potência aparente do sistema. Neste ponto operacional o sistema deixou de apresentar uma solução ótima local, indicando que neste ponto o sistema deixou de atender as demandas de potências ativa e reativa.

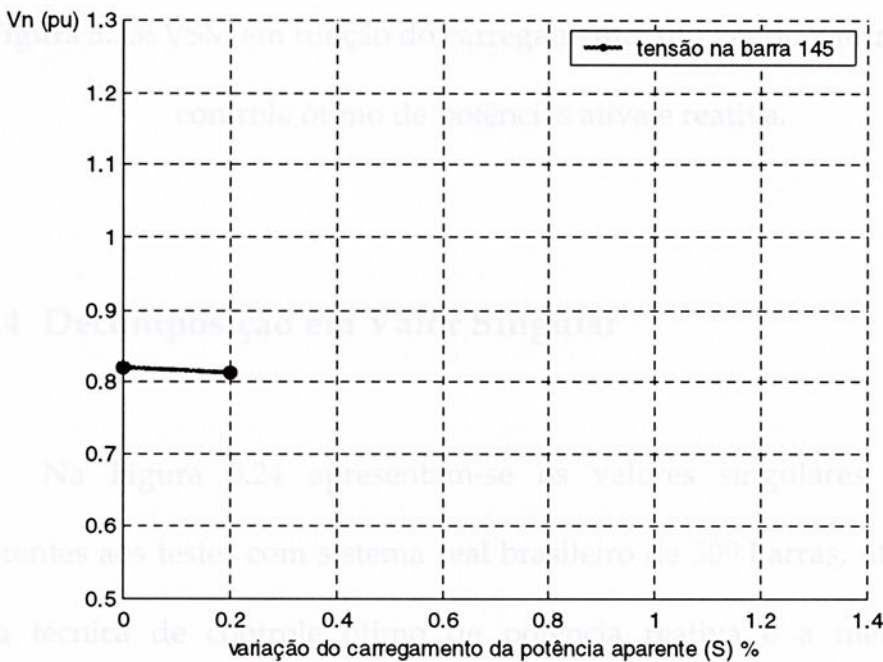


Figura 5.22: Tensão na barra 145 em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potências ativa e reativa.

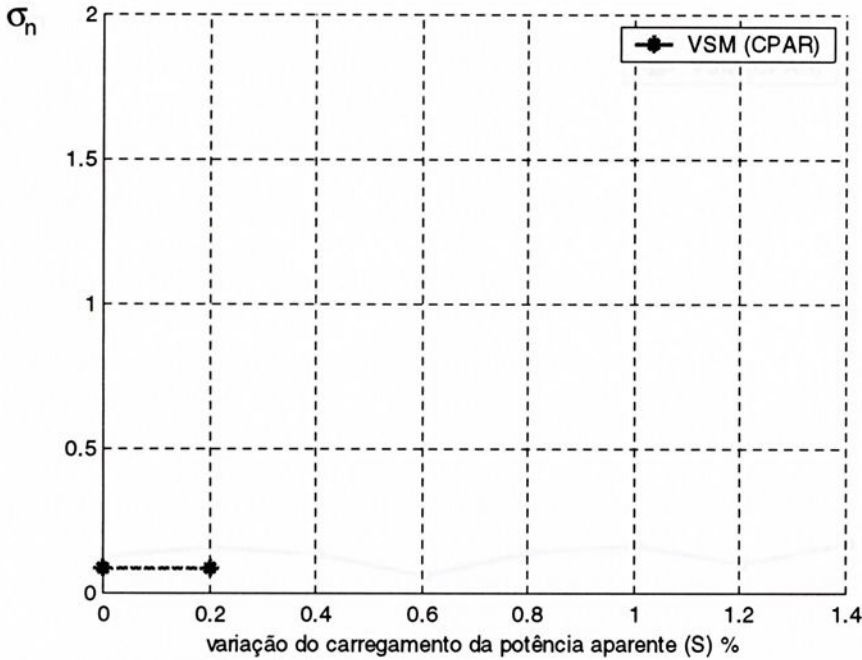


Figura 5.23: VSM em função do carregamento, utilizando a técnica de controle ótimo de potências ativa e reativa.

5.4.4 Decomposição em Valor Singular

Na Figura 5.24 apresentam-se os valores singulares mínimos referentes aos testes com sistema real brasileiro de 309 barras, utilizando-se a técnica de controle ótimo de potência reativa e a metodologia proposta neste trabalho.

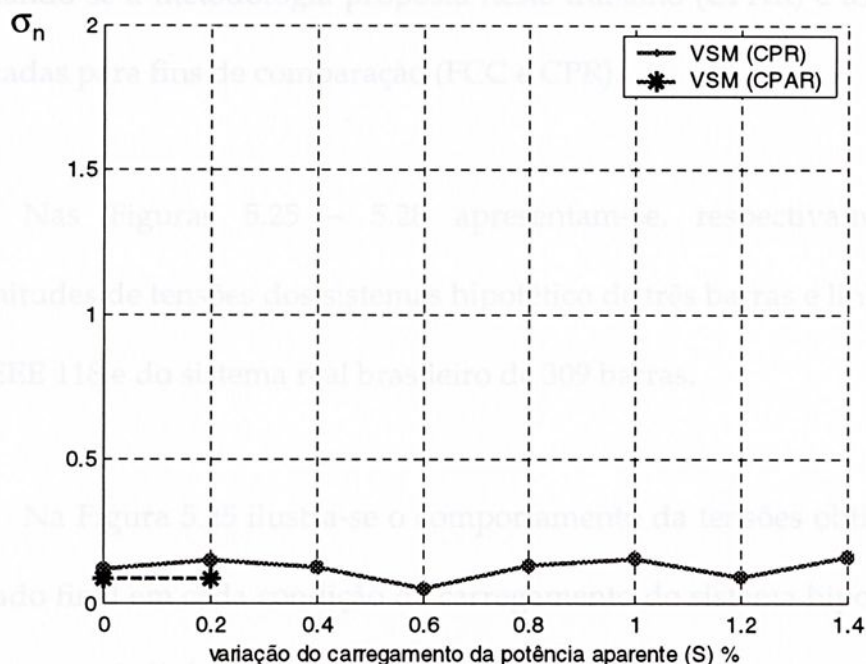


Figura 5.24: VSM em função do carregamento, obtidos através das diferentes técnicas de análise do problema (CPR e CPAR)

Da Figura 5.24 pode-se observar que embora o ponto de operação inicial deste sistema já se encontre em seus limites operacionais ao aplicar a técnica de controle ótimo de potências ativas e reativa, é possível carregar o sistema em 20%, obtendo-se resultados satisfatórios e coerentes.

5.5 Variação das Tensões nos Testes Realizados

Nesta seção tem-se por finalidade apresentar e discutir os gráficos das variações das magnitudes de tensões obtidas nos testes realizados

utilizando-se a metodologia proposta neste trabalho (CPAR) e as técnicas utilizadas para fins de comparação (FCC e CPR).

Nas Figuras 5.25 – 5.28 apresentam-se, respectivamente, as magnitudes de tensões dos sistemas hipotético de três barras e linhas, AEP 30, IEEE 118 e do sistema real brasileiro de 309 barras.

Na Figura 5.25 ilustra-se o comportamento da tensões obtidas para o estado final em cada condição de carregamento do sistema hipotético de 03 barras e três linhas de transmissão.

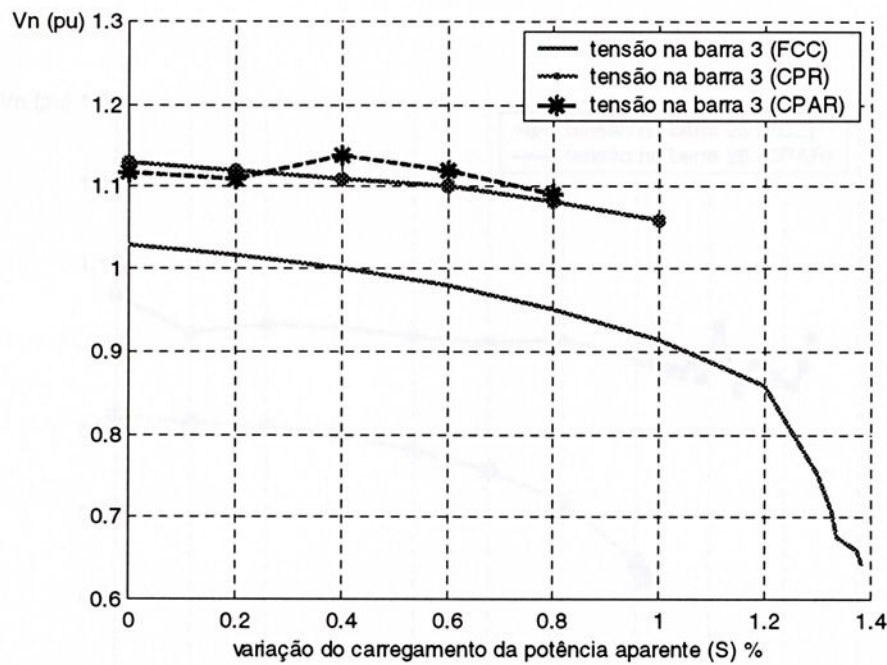


Figura 5.25: Tensões em função do carregamento para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas, obtidos através das técnica FCC, CPR e CPAR.

Analizando o comportamento das tensões obtidas para as diferentes técnicas de análise apresentadas neste trabalho, através da Figura 5.25, pode-se concluir que metodologia proposta nesta pesquisa apresenta um comportamento mais estável em relação as obtidas quando aplica-se a técnica de fluxo de carga convencional.

Na Figura 5.26, referente ao sistema AEP 30, observam-se algumas oscilações nas magnitudes de tensões. Este fato, ocorre devido as ações de controle de geração de reativos e as linearizações efetuadas devido a metodologia.

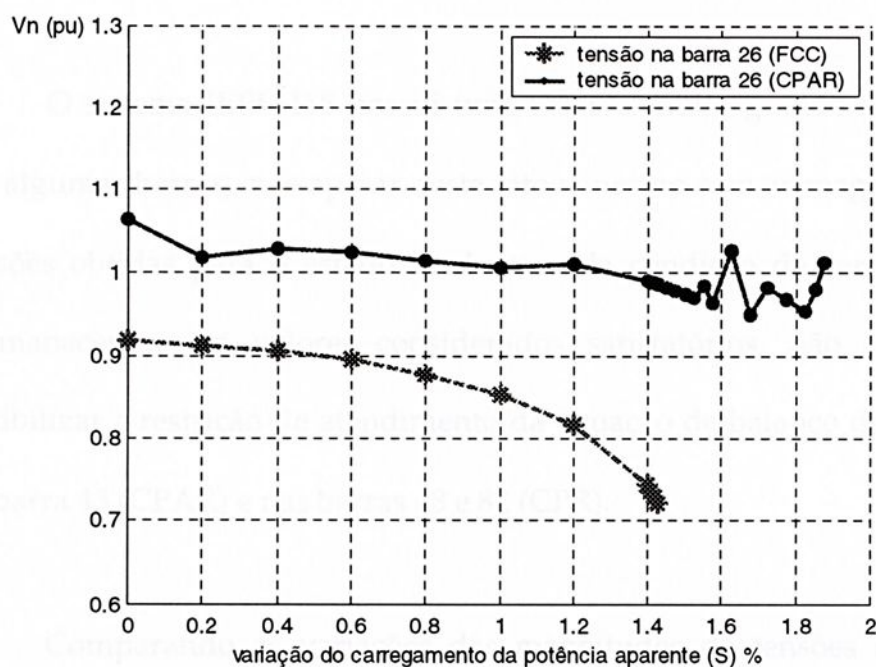


Figura 5.26: Tensões em função do carregamento para o sistema AEP 30, obtidos através das técnicas de análise FCC e CPAR.

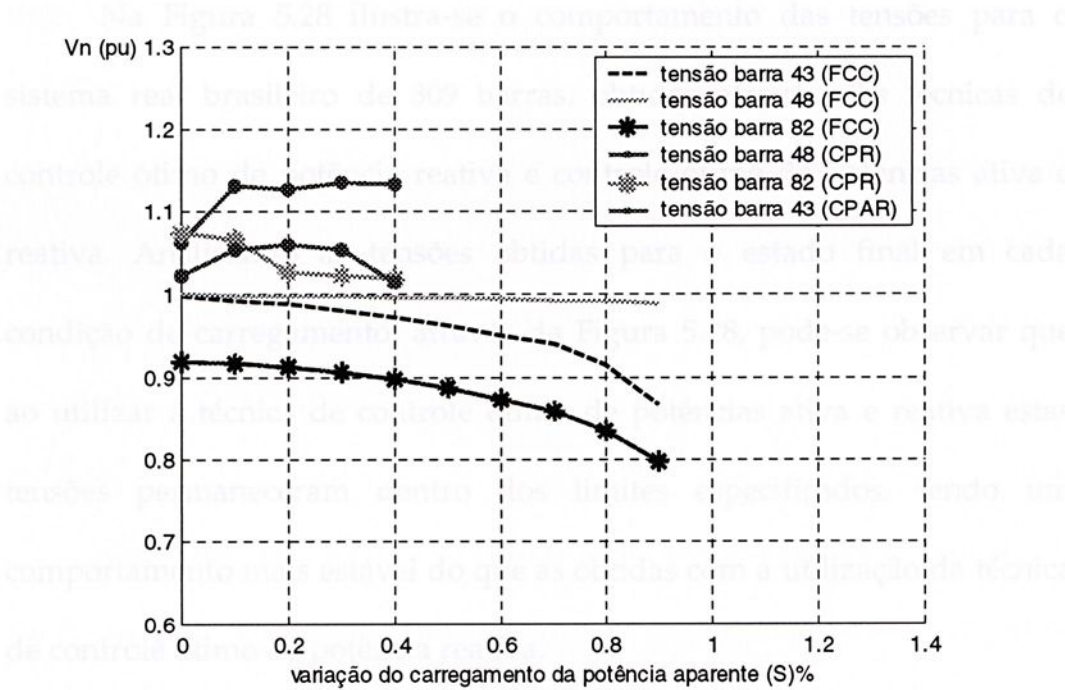


Figura 5.27: Tensões em função do carregamento para o sistema IEEE 118, obtidos através das técnicas de análise FCC, CPR e CPAR.

O sistema IEEE 118 possui uma reserva muito grande de reativos em algumas barras, mas apesar deste fato e mesmo com as magnitudes de tensões obtidas para o estado final em cada condição de carregamento permanecerem em valores considerados satisfatórios, não é possível factibilizar a restrição de atendimento da equação de balanço de potência na barra 43 (CPAR) e nas barras 48 e 82 (CPR).

Comparando as variações das magnitudes de tensões obtida ao aplicar as técnicas FCC e CPAR pode-se concluir que as tensões apresentadas através da metodologia proposta são sempre melhores do as obtidas para a técnica FCC.

Na Figura 5.28 ilustra-se o comportamento das tensões para o sistema real brasileiro de 309 barras, obtidos através das técnicas de controle ótimo de potência reativa e controle ótimo de potências ativa e reativa. Analisando as tensões obtidas para o estado final em cada condição de carregamento, através da Figura 5.28, pode-se observar que ao utilizar a técnica de controle ótimo de potências ativa e reativa estas tensões permaneceram dentro dos limites especificados, tendo um comportamento mais estável do que as obtidas com a utilização da técnica de controle ótimo de potência reativa.

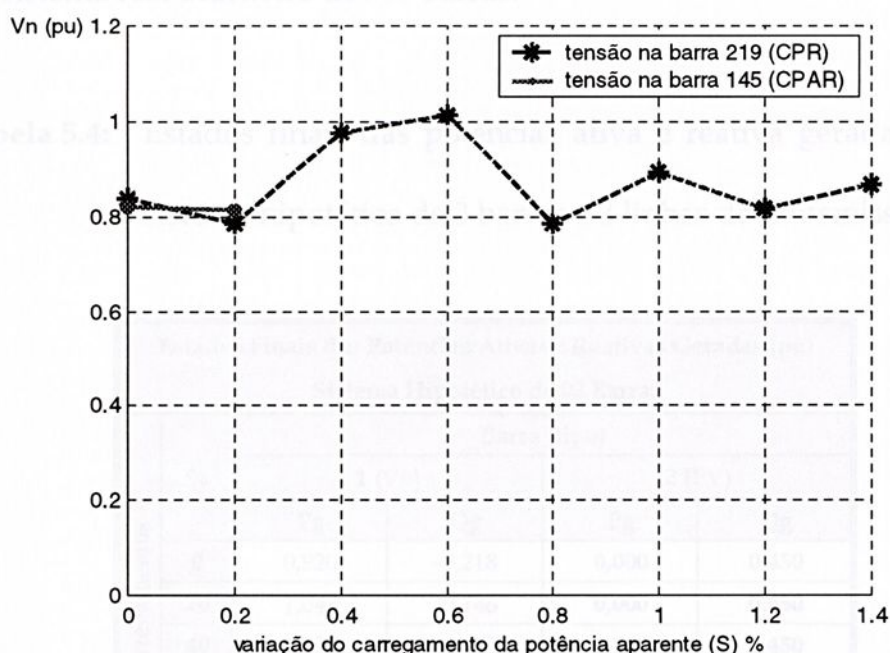


Figura 5.28 – Tensões em função do carregamento para o sistema real, obtidos através das técnicas CPR e CPAR.

5.6 As Potências Ativa e Reativa Geradas

Nesta seção tem-se por finalidade apresentar os estados finais das potências ativa e reativa geradas dos sistemas elétricos testados, obtidos através da metodologia proposta, para cada condição de carregamento analisada.

Nas Tabelas 5.4 – 5.7 apresentam-se, respectivamente, os estados finais das potências ativa e reativa geradas referentes ao sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas de transmissão, os sistemas testes AEP 30 e IEEE 118 e o sistema real brasileiro de 309 barras.

Tabela 5.4: Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema hipotético de 3 barras e 3 linhas de transmissão.

Estados Finais das Potências Ativas e Reativas Geradas (pu)					
Sistema Hipotético de 03 Barras					
Carregamentos	%	Barra (tipo)			
		1 (V0)		2 (PV)	
		Pg	Qg	Pg	Qg
	0	0,920	-0,218	0,000	0,450
	20	1,048	-0,146	0,000	0,450
	40	1,175	-0,055	0,000	0,450
	60	1,330	0,066	0,000	0,450
	80	1,493	0,450	0,026	0,251
	100	0,743	0,450	1,000	0,404

Tabela 5.5: Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema teste AEP 30.

Estados Finais das Potências Ativas e Reativas Geradas (pu)													
Sistema AEP 30													
	%	Barra (tipo)											
		1 (Vθ)		2 (PV)		5 (PV)		8 (PV)		11 (PV)		13 (PV)	
		Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg
Carregamentos	0	0,000	0,000	0,603	-0,391	0,700	0,321	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	20	0,000	0,000	0,653	0,500	0,700	-0,332	0,500	0,400	0,550	0,087	0,350	0,240
	40	0,000	0,000	0,712	0,374	0,700	-0,332	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	60	0,000	0,000	0,778	0,424	0,700	-0,331	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	80	0,062	0,000	0,800	0,495	0,700	-0,331	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	100	0,169	0,000	0,800	0,500	0,700	-0,257	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	120	0,297	0,000	0,800	-0,079	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	140	0,450	0,000	0,800	0,095	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	141	0,458	0,000	0,800	0,104	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	142	0,467	0,000	0,800	0,114	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	142,5	0,472	0,000	0,800	0,123	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	145	0,497	0,000	0,800	0,156	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	147,5	0,522	0,000	0,800	0,190	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	150	0,548	0,000	0,800	0,227	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	152,5	0,573	0,000	0,800	0,264	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	155	0,601	0,000	0,800	0,121	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	157,5	0,623	0,000	0,800	-0,047	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	162,5	0,685	0,000	0,800	0,118	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	167,5	0,748	0,000	0,800	-0,035	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	172,5	0,826	0,000	0,800	0,303	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	177,5	0,900	0,000	0,800	0,315	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	180	0,896	0,000	0,800	0,412	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	182,5	0,977	0,000	0,800	0,500	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	185	1,019	0,000	0,800	0,500	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240
	187,5	1,078	0,000	0,800	0,500	0,700	0,400	0,500	0,400	0,550	0,240	0,350	0,240

Tabela 5.6: Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema teste IEEE 118.

Estados Finais das Potências Ativa e Reativa Geradas (pu)											
Sistema IEEE 118s											
Barra	Tipo	Carregamentos									
		0%		10%		20%		30%		40%	
		Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg	Pg	Qg
1	PV	1,200	0,080	1,200	0,030	1,200	0,080	1,200	0,080	1,200	0,080
4	PV	1,400	0,157	1,400	-0,928	1,400	-0,872	1,400	0,025	1,400	-0,176
6	PV	1,000	0,300	1,000	-0,038	1,000	-0,004	1,000	0,196	1,000	0,273
8	PV	1,000	-0,972	1,000	-1,000	1,000	-0,866	1,000	-1,000	1,000	-1,000
10	PV	0,000	-1,000	0,338	-1,000	4,000	-1,000	4,000	-1,000	4,000	-1,000
12	PV	1,800	0,750	1,800	-0,143	1,800	0,658	1,800	0,750	1,800	0,750
15	PV	1,000	0,198	1,000	-0,008	1,000	0,213	1,000	0,230	1,000	0,230
17	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	PV	1,000	0,211	1,000	-0,011	1,000	0,130	1,000	0,010	1,000	0,023
19	PV	1,000	0,145	1,000	-0,031	1,000	0,141	1,000	0,150	1,000	0,150
20	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
21	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	PV	0,000	-0,804	0,000	-0,796	0,000	-0,669	0,000	-0,749	0,000	-0,771
25	PV	0,000	-1,000	0,000	2,302	0,000	-1,000	0,000	-1,000	0,000	-1,000
26	PV	0,000	3,376	0,000	-2,904	0,000	2,236	0,000	2,589	0,000	2,412
27	PV	0,000	-0,706	0,000	1,377	0,000	1,638	0,000	-0,731	1,000	-0,767
30	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
31	PV	0,000	-0,706	0,000	1,949	1,040	-0,800	1,070	-0,769	1,070	-0,767
32	PV	0,000	0,005	0,000	-0,050	0,000	-0,042	1,000	-0,009	1,000	-0,018
34	PV	1,000	0,230	1,000	-0,032	1,000	0,038	1,000	0,051	1,000	0,049
36	PV	1,000	0,140	1,000	-0,046	1,000	0,150	1,000	-0,023	1,000	-0,023
38	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	PV	1,000	-0,615	1,000	-0,794	1,000	-0,791	1,000	-0,749	1,000	-0,714
42	PV	0,000	-0,718	0,000	1,962	0,000	1,980	0,000	2,025	0,000	2,314
46	PV	1,190	-0,863	1,190	0,367	1,190	0,370	1,190	0,446	1,190	-0,882
49	PV	3,040	2,761	3,040	-0,953	3,040	-0,908	3,040	-0,895	3,040	-0,802
54	PV	1,480	0,963	1,480	-0,870	1,480	-0,874	1,480	-0,871	1,480	-0,836
55	PV	1,000	0,110	1,000	-0,048	1,000	-0,048	1,000	-0,048	1,000	-0,047
56	PV	1,000	0,110	1,000	-0,040	1,000	-0,041	1,000	-0,041	1,000	-0,039
59	PV	2,550	-0,837	2,550	0,781	2,550	1,029	2,550	1,059	2,550	1,315
61	PV	2,600	0,816	2,600	0,920	2,600	0,062	2,600	0,065	2,600	0,017
62	PV	1,000	0,080	1,000	0,003	1,000	0,004	1,000	0,004	1,000	0,080
65	PV	3,581	-0,437	4,000	-0,096	1,127	2,679	2,012	2,272	2,993	3,000
66	PV	3,800	0,124	3,800	-0,925	3,800	-0,972	3,800	-0,980	3,800	-0,973
69	Vθ	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70	PV	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,080	0,000	0,077
71	PV	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
72	PV	0,000	-0,829	0,000	0,480	0,000	-0,762	0,000	0,625	0,000	0,711
73	PV	0,000	1,016	0,000	0,475	0,000	-0,724	0,000	0,561	0,000	0,646
74	PV	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
76	PV	1,000	0,080	1,000	0,076	1,000	0,058	1,000	0,080	1,000	0,080
77	PV	0,000	0,380	0,000	0,310	0,000	0,291	0,000	0,380	0,000	0,380
80	PV	0,000	0,590	0,000	0,929	0,000	2,138	0,000	3,000	0,000	3,000
85	PV	0,194	0,080	0,194	0,080	0,194	0,080	0,194	0,080	0,194	0,080
87	PV	0,286	0,055	0,248	0,090	0,216	0,138	0,216	0,214	0,216	0,279

Estados Finais das Potências Ativa e Reativa Geradas (pu) - continuação											
Sistema IEEE 118s											
Barra	Tipo	Carregamentos									
		0%		10%		20%		30%		40%	
		P _g	Q _g	P _g	Q _g	P _g	Q _g	P _g	Q _g	P _g	Q _g
89	PV	0,000	0,167	0,000	0,737	0,000	1,010	0,000	1,236	0,000	1,724
90	PV	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	0,910	0,000	0,524	0,000
91	PV	0,802	-0,083	0,336	0,154	0,000	0,293	0,000	0,332	0,000	0,449
92	PV	1,000	0,079	1,000	0,080	0,610	0,080	0,496	0,080	0,000	0,080
99	PV	0,000	-0,954	0,000	-0,932	0,000	-0,931	0,000	0,284	0,000	0,365
100	PV	0,140	1,465	0,238	2,965	0,375	3,000	0,501	2,547	0,742	2,858
103	PV	0,000	0,150	0,000	0,150	0,000	0,150	0,000	0,150	0,000	0,150
104	PV	1,000	0,150	1,000	0,150	1,000	0,150	1,000	0,150	1,000	0,150
105	PV	0,107	0,150	0,229	0,150	0,356	0,150	0,275	0,150	0,479	0,150
107	PV	0,000	-0,121	0,000	-0,813	0,000	-0,644	0,000	-0,805	0,000	-0,807
110	PV	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010	0,000	0,010
111	PV	0,000	-0,135	0,000	-0,812	0,000	-0,816	0,000	-0,810	0,000	-0,810
112	PV	0,000	0,065	0,000	1,423	0,000	1,370	0,000	1,444	0,000	1,444
113	PV	0,000	-0,650	1,000	-0,854	1,000	-0,039	1,000	0,237	1,000	0,690
116	PV	0,000	-0,164	0,000	2,201	0,000	2,733	0,000	1,015	0,000	2,766

Tabela 5.7: Estados finais das potências ativa e reativa geradas para o sistema real brasileiro de 309 barras.

Estados Finais das Potências Ativa e Reativa Geradas (pu)					
Sistema Real Brasileiro de 309 barras					
Barra	Tipo	Carregamentos			
		0%		20%	
		P _g	Q _g	P _g	Q _g
1	PV	0,000	-5,400	0,000	-5,400
2	V θ	19,680	-6,435	21,925	-6,457
3	PV	0,000	-4,800	0,000	-4,800
4	PV	0,000	-0,600	0,000	-0,450
5	PV	0,000	-0,211	0,000	-0,415
6	PV	0,000	-0,804	0,000	-0,925
7	PV	0,000	0,748	0,000	0,701
8	PV	0,000	0,360	0,000	0,215
9	PV	0,000	-0,294	0,000	-0,318
10	PV	4,140	-0,871	4,140	-0,441
11	PV	1,430	-0,207	1,430	-0,254
12	PV	1,410	-0,560	0,000	-0,560
13	PV	0,000	-0,540	0,000	-0,540
14	PV	0,212	-0,837	0,127	1,440
15	PV	0,000	1,400	0,000	-0,889
16	PV	0,000	0,000	0,000	0,000
17	PV	0,000	-0,065	0,000	-0,065
18	PV	0,000	-0,471	0,000	-0,471
19	PV	0,000	-0,170	0,000	-0,170
20	PV	0,000	-0,180	0,000	-0,180
21	PV	0,000	-0,520	0,000	-0,520
22	PV	0,000	-1,700	0,000	-1,700
23	PV	0,000	-1,700	0,000	-1,700

Analizando-se as Tabelas 5.4 – 5.7, apresentadas acima, observa-se que a cada condição de operação a solução ótima local encontrada, mantém as potências ativa e reativa geradas dentro dos limites especificados para cada barra dos sistemas testados.

5.7 Comentários Gerais

Nos testes realizados com o sistema IEEE 118 e o sistema real brasileiro de 309 barras os limites inferiores das tensões foram consideradas diferentes de 0 *p.u.* mas os valores utilizados são bem inferiores aos considerados aceitáveis. Este fato, não afeta o potencial da metodologia proposta, pois as magnitudes das tensões permaneceram dentro dos limites aceitáveis.

A cada condição de operação foi encontrada uma solução ótima local e neste ponto de operação analisou-se o comportamento do valor singular mínimo. Nas barras em que ocorreram as infactibilidades no atendimento da demanda reativa, analisou-se o comportamento das tensões em cada condição de operação, e esta barra foi chamada de barra crítica do sistema.

A metodologia proposta neste trabalho apresentou resultados satisfatórios e coerentes em todos sistemas elétricos testados. Os sistemas foram carregados até não atenderem as restrições de igualdade referente



ao balanço de potência reativa, ou seja, o sistema deixou de apresentar uma solução ótima local, indicando que naquele ponto de operação o sistema elétrico testado deixou de atender as demanda de potência reativa.

6

Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma técnica para a análise de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica através do controle ótimo de potências ativa e reativa. Esta técnica consiste em determinar o melhor ponto de operação do sistema através da otimização de uma função objetivo que reflete os custos de geração das potências ativa e reativa, satisfazendo um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. A análise das condições de otimalidade de Karush-Kuhn-Tucker para este problema permite estabelecer e concluir as condições de operações estáveis dos sistemas.

Inicialmente estudou-se os conceitos de estabilidade e as ferramentas e técnicas utilizadas para a análise do problema de estabilidade de tensão, enfatizando-se a técnica de índices de estabilidade. Dos diversos tipos de índices de estabilidade existente na literatura,

6 Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma técnica para a análise de estabilidade de tensão em sistemas de energia elétrica através do controle ótimo de potências ativa e reativa. Esta técnica consiste em determinar o melhor ponto de operação do sistema através da otimização de uma função objetivo que reflete os custos de geração das potências ativa e reativa, satisfazendo um conjunto de restrições de igualdade e desigualdade. A análise das condições de otimalidade de Karush-Khuhn-Tucker para este problema permite estabelecer e concluir as condições de operações estáveis dos sistemas.

Inicialmente estudou-se os conceitos de estabilidade e as ferramentas e técnicas utilizadas para a análise do problema de estabilidade de tensão, enfatizando-se a técnica de índices de estabilidade. Dos diversos tipos de índices de estabilidade existente na literatura,

apenas a decomposição em valor singular foi utilizada, para servir de subsídio para a técnica proposta nesta pesquisa.

próximos ao limite de instabilidade de tensão.

A metodologia proposta foi implementada e testada nos seguintes sistemas: sistema hipotético de três barras e três linhas, os sistemas elétricos AEP 30 [Fre68] e IEEE 118 [Lebl84] e um sistema real brasileiro de 309 barras. Os resultados dos testes apresentados neste trabalho evidenciam o potencial desta metodologia, obtendo-se para todos os sistemas analisados pontos de operação seguros e factíveis.

margem de segurança para a estabilidade de tensão na formulação geral do problema.

Nos testes realizados, as tensões e as potências ativa e reativa geradas, dos sistemas analisados permaneceram dentro dos limites de operação preestabelecidos e a decomposição em valor singular teve seu comportamento bem mais estável, em relação ao caso não otimizado.

A metodologia de análise do problema de estabilidade de tensão, proposta neste trabalho, que afeta o planejamento de operação do sistema com base nos ajustes ótimos dos controles corretivos e preventivos é mais conservativa que as técnicas que utilizam a decomposição em valor singular e o fluxo de carga convencional. De acordo com os resultados dos testes realizados, a decomposição em valor singular da matriz jacobiana considerando as condições de operação do sistema (estado), obtidas através da técnica proposta antes de ocorrer a infactibilidade do balanço de potência reativa na(s) barra(s) crítica(s), mantém-se estável não

apresentado uma queda abrupta, o que permite concluir que a metodologia proposta não obtém como resultado pontos de operação próximos ao limite de instabilidade de tensão.

A proposta de futuras pesquisas que se faz a partir da experiência com o algoritmo proposto é resolver o problema linearizado de controle ótimo de potências ativa e reativa, fazendo o despacho de potências ativa e reativa de forma acoplada, ou seja, utilizando a matriz de sensibilidade representada pela matriz jacobiana e incluir restrições que garantam uma margem de segurança para a estabilidade de tensão na formulação geral do problema.

A. Alves, "Obtenção do ponto de Máximo Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Novas Técnicas de Parametrização para o Método da Continuação", Tese, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, junho 2000.

[Baz93] Bazaraa, M. S.; Sherali, H. D.; Shetty, C. M., 1993, "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms", 2ed., New York, John Wiley.

[Can96] Canizares, C. A., A. C. Z. de Souza e V. H. Quintana, "Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 11, no. 11, August 1996, pp. 1441-1450.

[Cigr92] Sekine, Y.; Takahashi, K.; Ichida, Y.; Ohura, Y.; Tsuchimori, N., 1992, "Method of Analysis and Assessment on Power System

7

Referências Bibliográficas

- [Alves00] D. A. Alves, "Obtenção do ponto de Máximo Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando Novas Técnicas de Parametrização para o Método da Continuação", Tese, Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, UNICAMP, junho 2000.
- [Baz93] Bazaraa, M. S.; Sherali, H. D.; Shetty, C. M., 1993, "Nonlinear Programming: Theory and Algorithms", 2.ed., New York, John Wiley.
- [Cañ96] Cañizares, C. A., A. C. Z. de Souza e V. H. Quintana, "Comparison of Performance Indices for Detection of Proximity to Voltage Collapse", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 3, no. 11, August 1996, pp. 1441-1450.
- [Cigré92] Sekine, Y.; Takahashi, K.; Ichida, Y.; Ohura, Y.; Tsuchimori, N., 1992, "Method of Analysis and Assessment on Power System

- [Man87] Voltage Phenomena, and Improvements Including Control Strategies for Greater Voltage Stability Margins", CIGRÉ, Aug./Sept 1992.
- [Fre68] Freris, L. L. and A. M Sasson, "Investigation of the Load-Flow Problem", IEE, vol. 115, no. 10, Oct. 1968, pp. 1459-1470.
- [Gupta90] Gupta, R. K.; Alaywan, Z. A.; Stuart, R. B; Reece, T. A., "Steady State Voltage Instability Operations Perspective", IEEE Trans. Power Systems, vol. 5, nº 4, November 1990, pp. 1345-1354.
- [Kun93] Kundur, P., 1993, "Power System Stability and Control", McGraw – Hill, New York.
- [Lebl84] Lebow, W. M & Outros, 1984, "Optimization of Reactive Volt-Ampere Sources in System Planning – vol. 1 Solution Techniques Computing Methods, and Result, EL-3729, final Report, November 1984.
- [Löf92] Löf, P. A., T. Smed, G. Anderson, and D. J. Hill, "Fast Calculation of a Voltage Stability Index", IEEE Trans. Power Systems, vol. 7, nº 1, February 1992, pp. 54-64.
- [Löf93] Löf, P. A., T. Smed, G. Anderson, and D. J. Hill, "Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems", IEEE Trans. Power Systems, vol. 8, nº 1, February 1993, pp. 326-337.
- [Man93] Mansour, Y., 1993, "Suggested Techniques for Voltage Stability Analysis", chapter 4, IEEE Power Engineering Society, pp. 73-104.



- [Mant87] Mantovani, J. R. S., 1987, "Planejamento de Reativos em Sistemas de Energia Elétrica: Solução via Programação Linear Sucessiva Utilizando um Modelo Implicitamente Acoplado", Tese de Mestrado, FEEC - UNICAMP.
- [Zand94] Zandbergen de Souza, A. C., "Discussion on Power Voltage", Paper for Ph.D. Thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 1994.
- [Min5.4] MINOS 5.4 User's Guide – Systems Optimization Laboratory, Stanford University, Stanford, California.
- [Mont83] Monticelli, A.;1983, "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica", São Paulo, Edgard Blucher Ltda.
- [Rocha] Rocha, C. R. R. e Pinto, L. M. V. G., "Teoria das Bifurcações em Sistemas de Potência: Uma Aplicação ao Problema de Otimização", DEE – PUC/RJ, pp. 245-250.
- [Stew73] Stewart, G. W; 1973, "Introduction to Matrix Computations", Academic Press, New York.
- [Sttot72] Stott, B.; Alsac, O.;1972, "Decoupled Newton Load Flow", *IEE e Trans. Power App. Systems*, v. pas 91, pp. 1955-1959.
- [Sttot74] Stott, B.; Alsac, O.;1974, "Fast Decoupled Newton Load Flow", *IEE e Trans. Power App. Systems*, v. pas 93, pp. 859-869.
- [Sttot83] Stott, B.; Alsac, O.;1983, "Experience with Linear Programing for Optimal Recheduling of Active and Reactive Power", *CIGRE-IFAC*, Florence, September, 1983, paper 104-1.



[Tir88] Tiranuchit, A. and R. J. Thomas, "A Posturing Strategy Against Voltage Instabilities in Electric Power Systems", *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 3, no. 1, February 1988, pp. 87-93.

[Zam94] Zambroni de Souza, A. C. "Discussion on Some Voltage Collapse Indices", *Electric Power Systems Research*, 10 march 1999, pp. 53-58.

[Zam96] Zambroni de Souza, A. C, "New Techniques to Efficiently Determine Proximity to Static Voltage Collapse" Ph. D. Thesis, Waterloo, Ontario, Canada, 1996.

Apêndice A

BANCO DE DADOS DO SISTEMA REAL BRASILEIRO DE 309 BARRAS

Dados das barras

Sistema Real Brasileiro de 309 Barras

BB	Nome	V	Ang	Pg	Qg	Limite	Limite	Pg	Qg	Res
500	1	1000	72	1000	-147	-510	560	500	0.0	0.0
501	1	1000	3614	-237	-1000	1000		0.0	0.0	3
502	1	1000	72	1000	-99.7	-480	480	500	0.0	0.0
503	1	1000	50	48.0	7.34	-080	160	500	0.0	0.0
506	1	1000	34	91.0	37.4	-087	052	500	0.0	0.0
507	1	1000	40	500	334	-000	200	500	0.0	0.0
511	1	1000	41	80.0	29.3	-060	160	511	0.0	0.0
512	1	945	44	64.0	-23.3	-030	046	512	0.0	0.0
513	1	1000	56	0.0	0.0	-013	73	513	0.0	0.0
514	1	1000	48	100	41.4	-103	120	514	0.0	0.0
515	1	1000	47	133	22.2	-049	059	515	0.0	0.0
516	1	1000	47	80.0	15.2	-056	056	516	0.0	0.0
517	1	1000	64	126	0.70	-053	014	517	0.0	0.0
518	1	1000	09	000	54.0	-144	143	518	0.0	0.0
520	1	940	05	178	38.4	-143	130	519	0.0	0.0
520	1	1000	68	0.0	0.0	0.0	0.0	520	0.0	0.0
521	1	1000	43	70.0	13.0	-060	040	521	0.0	0.0
522	1	1000	42	34.0	34.4	-066	060	522	0.0	0.0
523	1	1000	40	20.0	3.74	-017	017	523	0.0	0.0
525	1	940	71	24.0	-0.45	-016	0.0	525	0.0	0.0

Apêndice A

BANCO DE DADOS DO SISTEMA REAL BRASILEIRO DE 309 BARRAS

Dados das barras

Sistema Real Brasileiro de 309 barras

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh	
500	1		1030	72	1380	-149	-540	540	500	0.0	0.0	5
501	2		1030		2814	-232	-1000	1000		0.0	0.0	5
502	1		1030	72	1000	-99.3	-480	480	502	0.0	0.0	5
503	1		1025	60	96.0	7.96	-060	060	503	0.0	0.0	5
506	1		1020	46	91.0	27.4	-052	052	506	0.0	0.0	5
507	1		1035	63	560	234	-200	200	507	0.0	0.0	5
511	1		1010	41	80.0	29.2	-160	160	511	0.0	0.0	5
512	1		965	44	68.0	-22.1	-036	036	512	0.0	0.0	5
513	1		1000	56	0.0	0.0	-112	73	513	0.0	0.0	5
514	1		1000	46	300	43.4	-120	120	514	0.0	0.0	5
515	1		1020	47	132	23.2	-069	069	515	0.0	0.0	5
516	1		1020	42	90.0	15.2	-056	056	516	0.0	0.0	5
517	1		1000	64	126	0.70	-054	054	517	0.0	0.0	5
518	1		1000	69	300	54.0	-144	144	518	0.0	0.0	5
519	1		990	65	176	28.8	-140	140	519	0.0	0.0	5
520	1		1000	68	0.0	0.0	0.0	0.0	520	0.0	0.0	5
521	1		1020	49	70.0	13.0	-050	050	521	0.0	0.0	5
522	1		1040	42	96.0	34.8	-068	068	522	0.0	0.0	5
523	1		1020	40	26.0	3.74	-017	017	523	0.0	0.0	5
525	1		960	31	24.0	-2.85	-018	018	525	0.0	0.0	5

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh	
526	1		970	30	42.0	-10.9	-052	052	526	0.0	0.0	5
532	1		1020	41	0.0	40.4	-170	250	532	0.0	0.0	5
533	1		1020	40	0.0	19.0	-170	250	533	0.0	0.0	5
535	1		1087	65	0.0	0.0				0.0	0.0	5
536	1		1000	67	0.0	0.0				0.0	0.0	5
537	1		1050	62	0.0	0.0				10.0	6.17	5
538	1		1000	69	0.0	0.0				0.0	0.0	5
539	1		1000	67	0.0	0.0				0.0	0.0	5
541	1		1050	58	0.0	0.0				15.8	6.27	5
542	1		1000	68	0.0	0.0				0.0	0.0	5
546	1		1000	38	0.0	0.0				0.0	0.0	5
547	1		1000	56	0.0	0.0				0.0	0.0	-180 5
548	1		1050	52	0.0	0.0				4.45	2.12	5
549	1		1000	57	0.0	0.0				0.0	0.0	5
550	1		1040	51	0.0	0.0				1.21	0.40	5
551	1		1031	42	0.0	0.0				0.0	0.0	5
552	1		1013	53	0.0	0.0				0.0	0.0	-180 5
553	1		1030	42	0.0	0.0				0.0	0.0	5
554	1		1050	39	0.0	0.0				23.7	2.63	5
555	1		1029	38	0.0	0.0				39.4	18.0	5
559	1		1007	50	0.0	0.0				0.0	0.0	-540 5
560	1		1030	44	0.0	0.0				0.0	0.0	5
561	1		1016	52	0.0	0.0				0.0	0.0	5
562	1		1020	51	0.0	0.0				0.0	0.0	5
563	1		1002	48	0.0	0.0				0.0	0.0	5
564	1		1014	41	0.0	0.0				0.0	0.0	5
567	1		974	42	0.0	0.0				0.0	0.0	5
568	1		1015	36	0.0	0.0				0.0	0.0	5
571	1		976	42	0.0	0.0				0.0	0.0	5
572	1		1014	36	0.0	0.0				0.0	0.0	5
574	1		1021	35	0.0	0.0				0.0	0.0	5
575	1		1050	31	0.0	0.0				0.0	0.0	5
577	1		1010	42	0.0	0.0	0			0.0	0.0	5
578	1		1009	42	0.0	0.0				0.0	0.0	5
581	1		1000	41	0.0	0.0				0.0	0.0	5
582	1		1000	40	0.0	0.0				0.0	0.0	5
584	1		1000	41	0.0	0.0				0.0	0.0	5
586	1		996	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5
587	1		996	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5
588	1		1000	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5
589	1		1000	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5
590	1		1000	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5
591	1		1050	34	0.0	0.0				6.87	3.94	5
593	1		1000	40	0.0	0.0				0.0	0.0	5
594	1		1000	40	0.0	0.0				0.0	0.0	5
595	1		1040	33	0.0	0.0				0.0	0.0	5
598	1		1066	33	0.0	0.0				0.0	0.0	-180 5
599	1		1000	32	0.0	0.0				0.0	0.0	5
600	1		1000	28	0.0	0.0				0.0	0.0	5
601	1		1000	30	0.0	0.0				17.7	-0.71	5
611	1		1035	41	0.0	0.0				0.0	0.0	5
612	1		1033	41	0.0	0.0				0.0	0.0	5
613	1		1040	39	0.0	0.0				0.0	0.0	5

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh
615	1		1000	41	0.0	0.0			0.0	0.0	5
616	1		1050	38	0.0	0.0			0.0	0.0	5
618	1		1000	39	0.0	0.0			0.0	0.0	5
619	1		1050	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
623	1		973	32	0.0	0.0			0.0	0.0	5
624	1		1040	30	0.0	0.0			70.5-10.9		5
625	1		1018	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
626	1		1025	35	0.0	0.0			0.0	0.0	5
628	1		1018	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
629	1		1040	32	0.0	0.0			22.5	0.71	5
630	1		988	56	0.0	0.0			0.0	0.0	5
631	1		1010	35	0.0	0.0			0.0	0.0	5
632	1		1023	53	0.0	0.0			0.0	0.0	5
633	1		1000	42	0.0	0.0			0.0	0.0	5
634	1		1000	38	0.0	0.0			0.0	0.0	5
635	1		1022	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
636	1		1016	57	0.0	0.0			0.0	0.0	5
638	1		980	50	0.0	0.0			80.4	24.5	5
645	1		1000	57	0.0	0.0			0.0	0.0	5
646	1		991	56	0.0	0.0			0.0	0.0	5
647	1		1037	57	0.0	0.0			12.0	3.94	5
648	1		1012	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
649	1		1033	59	0.0	0.0			29.9	14.0	5
650	1		1001	39	0.0	0.0			0.0	0.0	5
653	1		1000	62	0.0	0.0			4.65	2.53	5
654	1		1028	60	0.0	0.0			0.0	0.0	5
655	1		1020	58	0.0	0.0			0.0	0.0	5
657	1		1014	38	0.0	0.0			12.3	5.96	5
659	0		999	48	0.0	0.0			75.2	25.5	5
660	1		995	48	0.0	0.0			13.1	5.16	5
661	1		1000	60	0.0	0.0			0.0	0.0	5
665	1		1004	57	0.0	0.0			0.0	0.0	5
666	1		1030	53	0.0	0.0			0.0	0.0	5
671	1		1000	58	0.0	0.0			0.0	0.0	5
672	1		1009	55	0.0	0.0			22.5	8.39	5
673	1		1002	55	0.0	0.0			0.0	0.0	5
674	1		1024	59	0.0	0.0			16.4	2.93	5
675	1		1009	57	0.0	0.0			0.0	0.0	5
678	1		993	30	0.0	0.0			9.70	4.45	5
680	1		974	29	0.0	0.0			0.0	0.0	5
681	1		999	29	0.0	0.0			39.6	17.9	5
682	1		1000	39	0.0	0.0			5.96	1.92	5
683	1		985	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
686	1		982	37	0.0	0.0			0.0	0.0	5
687	1		1002	38	0.0	0.0			0.0	0.0	5
688	1		1000	38	0.0	0.0			28.3	8.59	5
691	1		1011	38	0.0	0.0			0.0	0.0	5
692	1		980	33	0.0	0.0			38.5	18.7	5
693	1		1000	38	0.0	0.0			0.0	0.0	5
694	1		1003	30	0.0	0.0			59.8	12.0	5
695	1		977	32	0.0	0.0			67.4	29.6	5
696	1		978	31	0.0	0.0			16.6	7.99	5
697	1		977	32	0.0	0.0			12.2	5.56	5

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh
698	1		980	32	0.0	0.0			6.77	3.23	5
699	1		984	37	0.0	0.0			24.4	13.8	5
700	1		992	33	0.0	0.0			0.0	0.0	6
701	1		977	34	0.0	0.0			24.9	15.4	6
702	1		982	37	0.0	0.0			0.0	0.0	6
703	1		988	38	0.0	0.0			0.0	0.0	6
705	1		1009	34	0.0	0.0			0.0	0.0	6
709	1		1011	31	0.0	0.0			4.65	2.53	6
712	0		1000	30	0.0	0.0			15.4	4.04	6
720	1		1000	27	0.0	0.0			0.0	0.0	6
721	1		990	27	0.0	0.0			0.0	0.0	6
724	1		1000	28	0.0	0.0			3.94	1.72	6
725	1		1018	31	0.0	0.0			0.20	0.10	6
727	1		973	26	0.0	0.0			0.0	0.0	5
728	1		975	26	0.0	0.0			0.0	0.0	5
740	1		998	29	0.0	0.0			60.6	22.4	6
743	1		1027	33	0.0	0.0			9.30	5.76	6
746	1		1018	31	0.0	0.0			15.6	7.08	6
747	0		1005	29	0.0	0.0			53.0	19.0	6
748	1		1000	31	0.0	0.0			10.7	3.13	6
1900	1		1026	56	0.0	0.0			14.9	5.86	6
1901	1		1028	59	0.0	0.0			0.0	0.0	6
1902	1		1021	59	0.0	0.0			18.2	9.81	6
1905	1		1016	57	0.0	0.0			36.2	7.38	6
1906	1		1024	59	0.0	0.0			17.9	7.08	6
1907	1		1046	58	0.0	0.0			3.84	2.43	6
1908	1		1010	55	0.0	0.0			9.40	3.13	6
1909	1		1034	58	0.0	0.0			7.48	3.64	6
1910	1		1034	59	0.0	0.0			4.65	1.31	6
1911	1		1008	49	0.0	0.0			19.3	7.58	6
1917	1		1022	58	0.0	0.0			20.9	12.9	6
1921	1		1037	57	0.0	0.0			2.33	1.11	6
1922	1		1038	57	0.0	0.0			10.5	3.44	6
1927	1		997	33	0.0	0.0			9.91	2.53	6
1931	1		971	35	0.0	0.0			18.3	9.40	6
1932	1		972	34	0.0	0.0			13.2	4.85	6
1933	1		991	33	0.0	0.0			14.9	6.37	6
1935	1		1009	34	0.0	0.0			0.30	0.0	6
1936	0		993	29	0.0	0.0			36.6	15.8	6
1937	1		1022	32	0.0	0.0			13.5	5.36	6
1945	1		992	37	0.0	0.0			0.0	0.0	6
1947	1		1004	37	0.0	0.0			13.2	4.35	6
1949	1		1002	37	0.0	0.0			4.45	0.91	6
1951	1		976	32	0.0	0.0			7.58	4.14	6
1952	1		978	34	0.0	0.0			8.19	1.21	6
1954	1		995	29	0.0	0.0			1.01	0.91	6
1958	0		983	33	0.0	0.0			59.7	14.9	6
1960	1		1004	31	0.0	0.0			0.81	0.51	6
1961	1		976	33	0.0	0.0			11.0	5.66	6
1962	1		1009	34	0.0	0.0			2.12	1.01	6
1964	1		1003	31	0.0	0.0			33.8	18.2	6
1969	1		979	34	0.0	0.0			4.25	2.02	6
1972	1		1023	30	0.0	0.0			4.95	2.22	6

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh
1979	1		971	35	0.0	0.0			21.1	8.39	6
1980	1		1001	34	0.0	0.0			7.68	4.14	6
1981	1		988	34	0.0	0.0			25.3	12.9	6
1982	1		980	33	0.0	0.0			23.4	11.9	6
1984	1		1006	31	0.0	0.0			18.0	9.50	6
1987	1		976	36	0.0	0.0			14.6	7.48	6
1988	1		988	37	0.0	0.0			4.55	2.33	6
1989	1		993	37	0.0	0.0			7.68	2.63	6
1992	1		1023	32	0.0	0.0			24.8	13.3	6
1993	1		971	35	0.0	0.0			36.5	19.7	6
1994	1		977	32	0.0	0.0			37.1	13.3	6
1995	1		1002	35	0.0	0.0			26.3	9.10	6
1999	1		978	30	0.0	0.0			17.4	10.0	6
2000	1		973	30	0.0	0.0			15.7	7.89	6
2001	1		1008	34	0.0	0.0			23.4	5.86	6
2002	1		1023	38	0.0	0.0			18.1	3.64	6
2003	1		986	37	0.0	0.0			16.3	5.76	6
2004	0		1002	35	0.0	0.0			36.3	15.5	6
2009	1		1009	35	0.0	0.0			11.9	4.75	6
2011	1		1007	30	0.0	0.0			3.34	1.82	6
2012	1		1011	31	0.0	0.0			0.20	0.10	6
2013	1		997	30	0.0	0.0			11.0	3.23	6
2014	1		997	30	0.0	0.0			25.4	12.3	6
2015	1		997	30	0.0	0.0			15.4	8.29	6
2016	1		997	30	0.0	0.0			7.58	4.45	6
2017	1		966	26	0.0	0.0			11.3	6.98	6
2022	1		963	26	0.0	0.0			10.5	5.36	6
2023	1		997	30	0.0	0.0			5.56	2.22	6
2024	1		1034	32	0.0	0.0			2.33	1.11	6
2026	1		1008	34	0.0	0.0			0.20	0.10	6
2027	1		997	30	0.0	0.0			3.03	0.61	6
2028	1		1044	35	0.0	0.0			10.6	4.55	6
2029	0		1019	32	0.0	0.0			15.9	8.59	6
2030	1		1011	30	0.0	0.0			5.46	1.62	6
2032	1		1002	32	0.0	0.0			7.38	2.43	6
2034	1		1001	32	0.0	0.0			9.10	2.22	6
2037	1		1031	36	0.0	0.0			0.71	0.40	6
2039	1		1034	38	0.0	0.0			18.6	6.77	6
2040	1		1029	38	0.0	0.0			0.10	0.10	6
2041	0		994	30	0.0	0.0			12.7	6.17	6
2042	1		999	31	0.0	0.0			5.46	2.53	6
2043	1		1055	35	0.0	0.0			0.51	0.30	6
2044	1		985	32	0.0	0.0			23.0	11.8	6
2045	1		1036	39	0.0	0.0			15.7	4.04	6
2046	1		1024	32	0.0	0.0			1.01	0.30	6
2047	1		1054	37	0.0	0.0			4.95	2.22	6
2048	1		1029	38	0.0	0.0			6.07	2.93	6
2049	1		1034	39	0.0	0.0			3.94	1.72	6
77	0		1142	-39	1286	-46					
100	0		1080	-18	-561	-98					
104	0		1119	-46	-1163	-243					
170	0		1097	-41	86	131					
370	0		1101	-11	209	-5					

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh
410	0		1108	-40	-718	321					
412	0		1077	-40	-299	-141					
413	0		1063	-45	-250	-9					
415	0		1063	-40	-410	-16					
454	0		1057	-45	348	122					
455	0		1035	-49	-313	-14					
456	0		1065	-46	-166	0					
458	0		975	-49	-158	-143					
463	0		1124	-38	-238	179					
476	0		1123	-39	-323	-83					
477	0		1121	-38	-174	-120					
487	0		1147	-37	0	376					
583	0		1123	-42	-7	6					
677	0		1078	-45	-8	-4					
710	0		1107	-44	-14	0					
711	0		1079	-46	-3	-1					
713	0		1033	-48	-17	-4					
717	0		1025	-49	-9	-5					
726	0		1097	-45	-2	0					
729	0		1022	-49	-11	-1					
730	0		1077	-46	-15	0					
734	0		1076	-46	-17	2					
742	0		1121	-42	-15	-11					
865	0		1006	-43	-120	14					
876	0		1031	-39	-27	-8					
884	0		1024	-45	-160	6					
889	0		1026	-39	-90	-22					
1031	0		1022	-46	-99	-1					
1095	0		970	-34	-182	13					
1096	0		997	-44	-68	8					
1934	0		1094	-44	2	3					
2100	0		1000	-39	-22	-29					
2103	0		1000	-43	34	-34					
2110	0		1025	-38	-11	-4					
2122	0		1064	-41	-16	-3					
2123	0		1032	-39	-6	-3					
2125	0		1010	-38	-64	-31					
2132	0		1043	-34	-97	-24					
2133	0		1000	-39	-18	-7					
2135	0		1008	-36	-80	-42					
2136	0		1040	-35	-40	-8					
2142	0		1047	-34	-65	-12					
2147	0		1035	-26	-61	-17					
2150	0		1034	-42	-40	-2					
2162	0		1008	-21	-123	-3					
2174	0		1030	-27	-59	-17					
2185	0		1063	-41	-12	-2					
2191	0		1061	-41	-142	-37					
2212	0		1062	-41	-11	1					
2215	0		1067	-41	-33	-12					
2219	0		1062	-42	-206	-80					
2220	0		1061	-42	-37	-10					
2224	0		1051	-42	-94	-29					

NB	Tipo	Área	V	Ang	Pg	Qg	Qgmin	Qgmax	Pc	Qc	Bsh
2234	0		1054	-42	-26	-6					
2263	0		1035	-36	-29	4					
2268	0		1028	-36	-48	-30					
2274	0		1028	-36	-19	-10					
2277	0		1027	-36	-67	-37					
2296	0		988	-21	-43	-18					
2298	0		1022	-19	-9	0					
2311	0		995	-20	-12	2					
2319	0		1002	-23	-7	-3					
2323	0		1000	-25	-27	-7					
2330	0		1000	-20	-47	-12					
2331	0		1002	-20	-64	-15					
2336	0		1027	-47	-41	15					
2337	0		1035	-41	-10	4					
2338	0		1020	-39	-5	1					
2339	0		1004	-40	-3	3					
2341	0		1036	-20	-18	-2					
2342	0		993	-20	-9	3					
2343	0		1030	-38	7	-7					
2344	0		1014	-45	-18	-2					
2345	0		1030	-17	-10	4					
2346	0		1004	-39	-11	11					
2347	0		1004	-22	-1	1					
2348	0		1012	-20	-6	2					
9999											

Dados das Linhas de Transmissão

Sistema Real Brasileiro de 309 barras											
NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3				
77	104	0.17	2.59	216.18							
77	598	0.11	1.46	136.43							
100	535	0.13	1.96	164.74							
104	598	0.08	1.25	92.15							
170	705	2.20	8.07	2.18							
170	705	2.20	8.07	2.18							
370	535	0.08	1.36	112.77							
410	590	0.30	2.20	7.98							
410	590	0.30	2.20	7.98							
410	590	0.30	2.20	7.98							
410	590	0.30	2.20	7.98							
410	625	2.13	12.22	39.78							
412	590	0.43	2.39	8.47							
412	590	0.43	2.39	8.47							
415	578	F 0.0	2.4300		1000	1000	1000	415	0	0	

NOI	NOF		R	X	Ysh	T1	T2	T3	
454	600		0.90	4.77	8.43				
455	727		1.18	3.04	0.14				
455	728		1.18	3.04	0.14				
456	601		0.00	0.01	0.00				
458	600		0.66	3.48	6.15				
463	594		0.04	0.41	7.20				
463	594		0.04	0.41	7.20				
476	582		0.13	1.24	21.36				
477	582		0.13	1.24	21.36				
487	582		0.07	0.70	12.84				
487	582		0.07	0.70	12.84				
536	500	F	0.0	0.6600		1000	1000	1000	53615001500
538	501	F	0.0	0.3800		1000	1000	1000	53834003400
539	502	F	0.0	0.8800		1000	1000	1000	53913441344
547	513	F	0.0	11.160		1000	1000	1000	547 0 0
634	516	F	0.0	6.8000		1000	1000	1000	634 0 0
542	520	F	0.0	6.5800		1000	1000	1000	542 0 0
720	525	F	0.0	30.090		1000	1000	1000	720 34 34
724	526	F	0.0	8.9500		1000	1000	1000	724 100 120
581	532	F	0.0	3.7600		1000	1000	1000	581 0 0
593	533	F	0.0	3.7600		1000	1000	1000	593 0 0
536	538		0.18	2.41	130.09				
536	559		0.40	5.39	290.91				
536	563		0.42	5.68	306.37				
537	649		5.12	13.50	3.46				
537	649		5.12	13.50	3.46				
537	674		4.34	20.60	5.84				
537	1901		2.96	14.06	3.98				
538	542		0.05	0.62	38.36				
538	559		0.49	6.09	392.86				
538	559		0.49	6.09	392.86				
538	561		0.41	5.16	332.44				
538	561		0.41	5.16	332.44				
539	542		0.07	0.92	56.39				
539	561		0.40	4.96	319.53				
539	561		0.40	4.96	319.53				
541	647		6.57	17.24	4.45				
541	673		9.33	24.48	6.33				
541	1095		21.01	52.87	14.03				
541	1095		21.16	52.94	13.96				
541	1095		21.01	52.87	14.03				
541	1095		21.01	52.87	14.03				
541	1907		0.19	0.51	0.13				
541	1922		5.89	15.47	3.99				
546	548		7.24	28.81	8.00				
546	648		0.76	3.61	1.02				
546	657		0.76	3.61	1.02				
546	659		8.28	39.23	11.12				
546	865		1.91	6.16	5.49				
547	549		0.09	1.18	66.37				
548	659		6.24	24.08	6.66				
549	552		0.14	1.82	102.19				
550	659		4.98	13.06	3.38				

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3
550	1911	3.38	8.86	2.29			
551	553	0.00	0.01	0.00			
551	611	0.63	3.61	11.75			
551	889	1.36	7.59	24.53			
552	561	0.18	2.36	132.16			
553	1031	3.77	19.34	33.90			
554	555	2.90	5.54	0.25			
554	613	3.06	26.45	1.21			
555	2040	0.18	0.36	0.02			
559	561	0.13	1.72	103.43			
559	567	0.18	2.36	133.84			
559	593	0.37	4.65	299.87			
559	593	0.37	4.65	299.87			
560	703	4.76	12.53	3.21			
560	703	4.76	12.53	3.21			
560	2132	0.85	2.91	0.82			
560	2135	2.16	7.52	2.03			
560	2136	2.68	9.45	2.31			
560	2142	1.04	3.80	0.94			
561	577	0.26	3.25	209.54			
561	581	0.34	4.85	312.57			
561	584	0.30	3.76	242.21			
561	584	0.30	3.76	242.21			
562	632	3.62	9.49	2.45			
562	632	3.62	9.49	2.45			
562	2147	0.14	0.71	0.21			
562	2174	1.39	3.59	0.88			
562	2174	1.39	3.59	0.88			
563	567	0.23	3.06	164.97			
564	699	7.82	20.61	5.28			
564	2003	6.50	17.11	4.39			
564	2263	1.87	4.76	1.20			
564	2268	1.02	5.48	1.69			
564	2268	1.02	5.48	1.69			
564	2274	0.58	3.14	0.97			
564	2277	0.69	3.69	1.14			
567	571	0.03	0.34	19.21			
568	692	1.61	7.63	2.15			
568	1981	0.87	4.13	1.17			
568	1995	0.76	2.78	0.75			
568	2004	0.88	3.23	0.87			
568	2122	0.22	1.21	0.36			
568	2185	0.25	0.86	0.24			
568	2191	0.39	2.12	0.65			
568	2191	0.39	2.12	0.65			
568	2191	0.85	2.13	0.57			
568	2212	0.61	1.52	0.40			
568	2220	0.56	3.06	0.92			
568	2224	2.77	6.86	1.83			
568	2224	2.77	6.86	1.83			
568	2234	2.73	8.59	2.39			
571	584	0.09	1.22	74.91			
572	2215	0.70	2.46	0.67			

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3	
572	2219	0.44	2.44	0.72				
572	2219	0.44	2.44	0.72				
572	2219	0.69	3.82	1.12				
574	593	0.15	1.98	118.73				
574	599	0.19	2.44	144.65				
575	681	2.63	12.48	3.54				
575	1972	1.28	6.06	1.72				
577	578	0.01	0.09	0.00				
577	581	0.13	1.60	103.03				
581	584	T 0.09001	1.2100	72740				15241829
581	593	0.09	1.24	74.74				
583	742	0.19	0.51	0.13				
583	746	8.06	23.62	5.39				
584	586	F 0.0	0.8350		1000	1000	1000	584 750 796
584	587	F 0.0	0.8350		1000	1000	1000	584 750 796
588	586	F 0.0	2.0200		1000	1000	1000	588 250 250
589	587	F 0.0	2.0200		1000	1000	1000	589 250 250
591	694	5.60	14.76	3.77				
591	1984	3.47	9.16	2.34				
595	694	5.42	14.28	3.66				
595	709	3.40	8.95	2.29				
595	710	0.72	1.91	0.49				
595	725	6.17	16.27	4.16				
595	726	1.70	4.47	1.15				
595	1992	1.13	2.97	0.76				
600	599	F 0.0	4.7700		1000	1000	1000	600 300 33
611	612	0.12	0.71	2.31				
611	615	0.43	2.49	8.10				
613	876	8.58	17.42	0.73				
613	876	8.58	17.42	0.73				
613	2039	5.76	11.67	0.55				
613	2045	4.74	9.60	0.44				
613	2049	3.43	6.95	0.32				
615	618	0.68	3.91	12.72				
615	625	2.52	13.44	23.01				
615	884	2.01	10.29	17.82				
616	2037	9.81	19.88	0.90				
616	2039	8.64	17.51	0.80				
616	2045	9.66	19.58	0.91				
616	2047	0.81	19.88	0.90				
618	625	1.08	6.23	20.31				
619	2024	9.53	25.14	6.42				
619	2028	2.60	6.86	1.75				
623	625	2.18	11.64	19.93				
624	740	5.26	13.88	3.55				
624	740	5.26	13.88	3.55				
624	747	9.41	24.81	6.34				
624	747	9.41	24.81	6.34				
624	2024	3.06	8.06	2.06				
624	2028	9.99	26.34	6.73				
625	628	0.00	0.01	0.00				
626	631	0.67	1.72	0.47				
626	634	4.81	12.32	3.34				

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3
626	2026	1.28	6.06	1.72			
626	2032	3.12	14.78	4.19			
626	2150	0.91	2.40	0.56			
629	2043	30.32	45.90	1.84			
629	2046	7.58	11.47	0.46			
630	646	0.44	1.16	0.30			
630	673	3.87	10.15	2.62			
630	2296	0.33	0.82	0.22			
631	634	4.14	10.60	2.87			
631	2337	0.03	0.07	0.02			
632	645	5.39	14.15	3.66	1000	1000	1000
632	2341	4.91	12.88	3.33	1000	1000	1000
633	634	4.85	12.73	3.29			
633	650	2.99	7.85	2.03			
634	650	1.86	4.88	1.26			
634	687	2.09	5.49	1.42			
634	701	11.16	29.28	7.57			
634	2110	0.42	1.33	0.35			
635	2123	4.77	7.39	0.11			
636	645	6.90	17.86	4.73			
636	661	4.50	21.32	6.05			
636	665	4.72	12.21	3.23			
636	671	3.53	16.72	4.74			
636	675	2.00	5.17	1.36			
636	1905	0.05	0.12	0.03			
638	659	6.48	16.78	4.45			
638	660	5.80	15.01	3.98			
638	673	5.26	13.79	3.57			
638	673	5.26	13.79	3.57			
645	1905	6.85	17.73	4.70			
645	2341	0.48	1.27	0.33			
646	2311	0.23	0.60	0.15			
646	2342	0.08	0.20	0.05			
6470	1909	3.80	10.02	2.56			
647	1910	8.10	21.36	5.46			
647	1921	0.10	0.25	0.07			
648	1096	4.04	10.47	2.55			
649	674	7.07	18.55	4.79			
649	1906	2.95	7.75	2.00			
649	1909	6.90	18.20	4.65			
649	1910	2.60	6.86	1.75			
650	2125	0.14	0.35	0.09			
653	654	1.91	9.09	2.58			
653	661	4.06	19.22	5.46			
653	665	3.83	18.18	5.15			
653	665	3.83	18.18	5.15			
653	673	8.63	22.65	5.85			
653	2311	4.09	10.74	2.78			
654	661	2.15	10.13	2.88			
654	2345	0.23	0.60	0.14			
655	2298	1.98	4.89	0.08			
659	660	0.68	1.77	0.47			
659	1911	1.60	4.20	1.09			

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3			
661	671	0.97	4.60	1.32						
661	2162	3.24	11.02	3.12						
661	2162	3.24	11.02	3.12						
665	674	7.94	20.83	5.38						
665	675	2.72	7.04	1.87						
665	1917	7.78	20.40	5.27						
665	2330	0.88	2.29	0.56						
665	2331	0.79	1.97	0.51						
665	2331	0.79	1.97	0.51						
666	2323	6.67	16.82	0.27						
671	672	F 0.0	27.280		1000	1000	1000	671	0	0
671	672	F 0.0	27.280		1000	1000	1000	671	0	0
672	2319	8.51	12.82	0.18						
673	1908	2.61	6.86	1.77						
673	2347	0.01	0.01	0.01						
674	1901	1.38	6.54	1.86						
674	1906	4.12	10.81	2.79						
674	1917	0.16	0.43	0.11						
675	2348	0.33	0.83	0.22						
677	694	1.58	4.17	1.07						
677	1934	2.72	7.14	1.83						
678	681	0.96	2.53	0.65						
678	1999	3.97	10.43	2.70						
680	681	3.42	8.99	3.22						
680	2000	1.51	3.97	1.03						
680	2336	0.05	0.13	0.04						
681	694	4.04	10.61	2.74						
681	1954	1.00	2.63	0.68						
681	1972	1.35	6.42	1.82						
682	688	3.55	9.32	2.40						
682	2002	2.39	6.28	1.62						
683	703	0.67	1.75	0.45						
683	703	0.67	1.75	0.45						
683	2100	0.39	1.41	0.35						
683	2133	0.94	3.35	0.87						
686	699	1.52	4.00	1.03						
686	702	3.11	8.15	2.11						
686	2339	0.01	0.01	0.01						
687	1945	2.88	7.54	1.95						
687	2338	0.08	0.22	0.06						
688	691	4.92	12.91	3.33						
688	693	0.81	1.74	0.43						
688	693	0.81	1.74	0.43						
688	1935	5.37	11.50	2.83						
688	2002	1.16	3.04	0.78						
688	2009	3.66	7.84	1.93						
691	2343	0.01	0.01	0.01						
692	701	1.90	4.99	1.29						
692	1951	3.23	8.48	2.19						
692	1961	2.22	5.82	1.50						
692	1969	0.37	0.96	0.25						
692	1982	0.12	0.58	0.16						
693	699	6.22	16.33	4.22						

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3
693	1947	1.68	4.40	1.14			
694	1936	2.60	6.85	1.77			
694	1964	1.74	4.58	1.17			
695	697	0.24	0.63	0.16			
695	698	0.63	1.65	0.43			
695	698	0.63	1.65	0.43			
695	1951	1.74	4.56	1.18			
695	1961	2.75	7.22	1.87			
695	1994	0.28	0.74	0.19			
696	698	0.72	1.90	0.49			
696	1999	2.21	5.80	1.50			
697	700	2.63	6.92	1.79			
698	705	3.66	13.85	3.64			
698	1927	2.32	8.93	2.31			
698	1933	2.19	8.01	2.16			
698	2000	2.93	7.70	1.99			
698	2004	4.10	14.24	3.82			
698	2344	1.69	4.43	1.06			
699	703	5.79	15.19	3.92			
699	1979	3.69	9.67	2.50			
699	1987	1.66	4.35	1.15			
699	1988	1.31	3.44	0.89			
699	2003	1.33	3.51	0.90			
700	705	2.33	6.11	1.58			
700	2103	0.01	0.01	0.01			
701	703	5.59	14.72	3.76			
701	1931	2.65	6.69	1.80			
701	1932	1.86	4.88	1.26			
701	1945	6.19	16.25	4.20			
701	1952	0.97	2.56	0.66			
701	1993	1.02	2.70	0.69			
702	703	1.16	3.04	0.78			
702	2346	0.01	0.01	0.01			
703	1945	2.55	6.68	1.72			
703	1993	4.57	12.02	3.07			
705	1927	1.34	4.92	1.33			
705	1962	0.27	0.69	0.18			
705	1994	4.68	12.29	3.19			
705	2001	0.37	0.94	0.25			
709	726	1.70	4.47	1.15			
709	730	7.00	18.45	4.72			
709	734	4.10	10.80	2.77			
709	734	0.32	8.44	2.16			
709	2011	1.08	2.85	0.73			
709	2012	0.96	2.54	0.65			
709	2015	2.94	7.75	1.98			
710	725	5.45	14.36	3.67			
711	730	2.00	5.26	1.35			
711	2012	4.06	10.65	2.72			
712	730	2.12	5.59	1.43			
712	730	2.12	5.59	1.43			
713	724	7.84	20.15	0.90			
713	724	7.84	20.15	0.90			



NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3
717	724	5.83	15.00	0.68			
717	727	0.71	1.82	0.08			
720	727	5.35	14.06	0.60			
720	728	5.35	14.06	0.60			
720	2017	6.22	16.38	0.70			
720	2022	7.62	20.07	0.85			
721	729	7.83	20.63	0.87			
721	2017	12.55	33.07	1.39			
724	728	6.54	16.82	0.76			
725	730	2.70	7.12	1.82			
725	730	2.70	7.12	1.82			
729	2022	3.32	8.75	0.37	848	848	1198
734	2011	2.12	5.59	1.43	854	857	1078
734	2013	0.48	1.27	0.33	855	1025	1025
740	2023	3.37	8.85	2.29	858	1050	1050
740	2041	4.18	10.98	2.84	865	865	1045
742	743	3.30	8.70	2.21	865	865	1075
743	2029	2.03	6.42	1.36	865	1045	1045
746	747	9.26	25.72	6.20	872	1052	1052
746	2029	2.53	7.98	1.69	875	1055	1074
746	2030	5.07	14.69	3.38	875	1025	1075
747	2030	4.19	11.03	2.82	878	1050	1050
748	2027	1.56	4.10	1.06	878	1050	1050
748	2032	0.84	4.00	1.13	878	1058	1058
748	2034	0.62	2.93	0.83	878	1058	1058
748	2042	0.76	2.00	0.52	884	1058	1058
1900	1907	2.87	7.51	1.94	878	878	878
1900	1908	3.66	9.59	2.48	879	880	1140
1901	1902	1.28	6.06	1.72	879	880	1190
1921	1922	0.58	1.52	1.39	879	880	1190
1931	1987	3.02	7.38	1.93	880	880	1140
1932	1979	1.76	4.64	1.20	880	880	1100
1933	1980	1.18	4.32	1.17	880	880	1100
1934	1937	0.00	0.01	0.00	881	881	1100
1934	1992	0.17	0.46	0.12	881	887	1187
1935	1962	0.16	0.38	0.10	881	887	1187
1936	1954	0.43	1.13	0.29	882	882	1190
1947	1949	0.39	1.01	0.26	882	882	1180
1949	1989	1.65	4.33	1.12	882	882	1180
1952	1969	0.56	1.47	0.38	882	882	1180
1958	1981	0.24	1.16	0.33	882	882	1180
1958	1982	0.37	1.73	0.49	882	882	1180
1960	1964	0.19	0.51	0.13	882	882	1180
1960	1984	0.19	0.51	0.13	882	882	1180
1980	1995	0.12	0.45	0.12	882	882	1180
1988	1989	1.20	3.14	0.81	882	882	1190
2001	2009	1.77	3.79	0.93	882	882	1190
2013	2014	0.10	0.25	0.07	882	1030	1130
2014	2016	0.24	0.64	0.16	882	1030	1030
2015	2016	0.34	0.89	0.23	882	1030	1030
2023	2042	3.90	9.80	2.43	882	1030	1030
2026	2034	2.06	9.79	2.77	882	882	1080
2027	2041	2.12	5.57	1.44	882	882	1080

NOI	NOF		R	X	Ysh	T1	T2	T3			
2037	2044		25.58	38.70	1.55						
2040	2048		2.52	4.02	0.17						
2043	2047		10.81	30.00	1.20						
2044	2046		16.97	25.70	1.03						
2048	2049		4.56	9.24	0.42						
2122	2219		1.07	5.83	1.75						
2185	2224		2.10	6.19	1.71						
2191	2212		0.24	0.61	0.17						
2219	2220		0.73	3.98	1.20						
2274	2277		0.10	0.55	0.17						
2319	2323		25.54	38.46	0.52						
413	574	F 0.0	2.2800			980	860	1190	413	0	0
454	455	F 0.0	3.3600			996	837	1076	455	0	0
541	503	F 0.0	4.9700			1025	1025	1025	541	216	216
618	506	F 0.0	12.620			1050	1050	1050	618	114	114
549	507	F 0.0	2.1600			1045	1045	1045	549	680	680
546	511	F 0.0	6.6600			1025	1025	1025	546	0	0
613	512	F 0.0	11.720			1045	1045	1045	613	84	84
615	514	F 0.0	2.8200			1050	1050	1050	615	460	506
633	515	F 0.0	6.7300			1025	1025	1025	633	160	192
645	517	F 0.0	8.7500			1025	1025	1025	645	146	161
653	518	F 0.0	4.1700			1050	1050	1050	653	319	383
661	519	F 0.0	5.4000			1050	1050	1050	661	300	300
682	521	F 0.0	24.600			1028	1028	1028	682	100	110
688	522	F 0.0	7.5000			1004	1004	1004	688	136	136
693	523	F 0.0	20.100			1004	1004	1004	693	40	40
536	535	F 0.0	1.4000			979	979	979	536	750	906
537	536	F 0.0	4.6300			1019	860	1180	537	300	349
541	539	F 0.0	8.3300			1025	860	1190	541	150	164
548	547	F 0.0	4.6500			1030	860	1190	548	0	0
550	549	F 0.0	10.670			1042	860	1160	550	150	158
551	554	F 0.0	27.500			946	900	1100	554	0	0
551	554	F 0.0	27.500			946	900	1100	554	0	0
553	552	F 0.0	7.2400			1041	900	1100	553	300	336
560	559	F 0.0	4.7900			1048	857	1187	560	0	0
560	559	F 0.0	4.7900			1048	857	1187	560	0	0
562	561	F 0.0	8.3100			1052	860	1190	562	150	164
564	563	F 0.0	4.7100			1048	859	1180	564	0	0
568	567	F 0.0	4.6500			1095	890	1189	568	0	0
568	567	F 0.0	4.6100			1095	890	1189	568	0	0
568	567	F 0.0	4.4500			1095	890	1189	568	0	0
572	571	F 0.0	4.6600			1099	890	1187	572	0	0
575	574	F 0.0	9.6600			1103	860	1160	575	300	355
582	581	F 0.0	0.7200			1045	1045	1045	582	0	0
582	581	F 0.0	0.7200			1045	1045	1045	582	0	0
583	581	F 0.0	9.6600			1062	860	1190	583	150	166
591	584	F 0.0	8.2700			1094	860	1190	591	150	164
590	586	F 0.0	-0.085			1030	1030	1030	590	750	796
590	587	F 0.0	-0.085			1030	1030	1030	590	750	796
594	593	F 0.0	0.7200			1030	1030	1030	594	750	833
594	593	F 0.0	0.7200			1030	1030	1030	594	750	833
595	593	F 0.0	9.1900			1069	840	1160	595	0	0
595	593	F 0.0	9.7300			1069	840	1160	595	0	0

NOI	NOF	R	X	Ysh	T1	T2	T3			
599	598	F 0.0	1.0300		980	980	980	599	900	990
601	599	F 0.0	4.6500		980	980	980	601	300	359
601	599	F 0.0	4.6500		980	980	980	601	300	359
613	612	F 0.0	23.630		1072	900	1100	613	0	0
616	615	F 0.0	23.630		1022	900	1100	616	0	0
616	615	F 0.0	23.630		1022	900	1100	616	0	0
618	619	F 0.0	11.350		997	859	1189	619	0	0
618	619	F 0.0	11.350		997	859	1189	619	0	0
623	624	F 0.0	12.080		930	930	930	624	0	0
623	624	F 0.0	12.080		930	930	930	624	0	0
626	625	F 0.0	28.600		1050	1050	1050	626	0	0
628	626	F 0.0	12.300		985	985	985	626	0	0
628	626	F 0.0	12.300		985	985	985	626	0	0
629	626	F 0.0	54.500		1074	880	1190	629	0	0
629	626	F 0.0	54.500		1074	880	1190	629	0	0
634	635	F 0.0	34.300		983	850	1050	635	0	0
654	655	F 0.0	34.000		1002	850	1050	655	25	28
665	666	F 0.0	35.600		932	850	1050	666	0	0
694	721	F 0.0	25.470		990	940	1060	721	40	48
712	713	F 0.0	22.730		981	950	1120	713	40	48
9999										

Barra 563 Tranf. de PQ para PV
Barra 619 Tranf. de PQ para PV

Tipo 0 = PQ
Tipo 1 = PV
Tipo 2 = V0



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br

