

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

VIVIANE BERRI COELHO

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS
CRÍTICOS DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM
ESTUDOS DE MÁXIMO CARREGAMENTO**

Florianópolis

2012

VIVIANE BERRI COELHO

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS
CRÍTICOS DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM
ESTUDOS DE MÁXIMO CARREGAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
para a obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Roberto de Souza
Salgado, Ph.D.

Florianópolis

2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Coelho, Viviane Berri

Identificação e classificação de pontos críticos de geração de potência reativa em estudos de máximo carregamento [dissertação] / Viviane Berri Coelho ; orientador, Roberto de Souza Salgado - Florianópolis, SC, 2012.

152 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Inclui referências

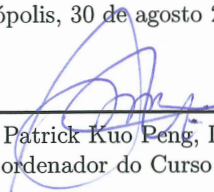
1. Engenharia Elétrica. 2. Estabilidade de tensão. 3. Máximo carregamento. 4. Bifurcação sela-nó. 5. Bifurcação induzida por limites. I. Salgado, Roberto de Souza. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

VIVIANE BERRI COELHO

**IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS
CRÍTICOS DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM
ESTUDOS DE MÁXIMO CARREGAMENTO**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Elétrica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 30 de agosto 2012.

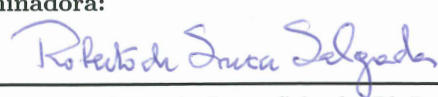


Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.
Coordenador do Curso

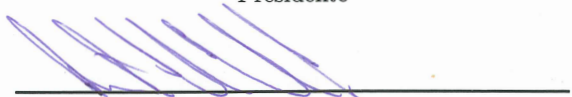


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Orientador

Banca Examinadora:



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Presidente



Prof. Antonio Carlos Zambrom de Souza, Ph.D.



Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais que proporcionaram minha chegada até aqui, e que me apoiaram e incentivaram em todos momentos.

Agradeço ao meu noivo Giuliano pelo carinho, compreensão, sempre me apoiando e incentivando nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador Prof. Roberto de Souza Salgado pela paciência, motivação e auxílio proporcionados durante este período.

Agradeço aos meus colegas de trabalho no ONS pela compreensão e apoio.

Agradeço aos meus colegas do LABSPOT pelo companherismo e auxílio nos estudos, em especial minha amiga Annelise, que me acompanhou desde a graduação.

Agradeço aos professores do LABSPOT não somente pelo conhecimento que transmitiram, mas também pelo auxílio, apoio e incentivo.

Plante seu jardim e decore sua alma, ao invés de esperar que alguém lhe traga flores. E você aprende que realmente pode suportar, que realmente é forte, e que pode ir muito mais longe depois de pensar que não se pode mais. E que realmente a vida tem valor e que você tem valor diante da vida!

William Shakespeare

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS DE GERAÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA EM ESTUDOS DE MÁXIMO CARREGAMENTO

Viviane Berri Coelho

Agosto/2012

Orientador: Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D..

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Palavras-chave: estabilidade de tensão, máximo carregamento, Método da Continuação, esquema preditor-corretor, bifurcação sela-nó, bifurcação induzida por limites, índices de estabilidade.

Número de Páginas: 152

Esta dissertação apresenta uma metodologia para identificar e classificar os pontos de carregamento crítico em sistemas de potência. Duas estratégias são utilizadas como base desta metodologia. A primeira visa encontrar o ponto de máximo carregamento da rede elétrica e a correspondente solução do fluxo de potência. Esta abordagem assume que a curva PV é uma forma quadrática, com esta característica se tornando mais acentuada conforme o nível de carregamento do sistema se aproxima do ponto crítico. As principais motivações para o uso deste método são a rapidez da obtenção da solução e a robustez numérica do processo iterativo nas proximidades do ponto de máximo carregamento. A segunda estratégia utiliza um esquema preditor-corretor para identificar os pontos críticos de geração de potência reativa na rede elétrica, mediante o aumento do seu nível de carregamento. Assim, as barras que atingem o limite de geração de potência reativa são identificadas e os valores dos fatores de carregamento correspondentes são calculados simultaneamente. Na etapa de correção, as equações do fluxo de potência correspondentes a cada barra que atinge o limite de potência reativa incluem a representação da magnitude da tensão de referência e do balanço de potência reativa da referida barra PV, ajustadas respectivamente nos valores de referência e no limite atingido. A classificação dos pontos críticos é baseada em conceitos oriundos da Teoria da Bifurcação e em índices calculados com auxílio das relações de sensibilidade da geração de potência reativa com a magnitude das tensões nodais. Os resultados obtidos para dois sistemas testes, onde o primeiro é o sistema IEEE de 24 Barras, enquanto o segundo é um sistema equivalente da Região Sul do país, composto por 82 barras, ilustram as características principais dos métodos apresentados.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

IDENTIFICATION AND CLASSIFICATION OF CRITICAL POINTS OF REACTIVE POWER GENERATION OF MAXIMUM LOADABILITY STUDIES

Viviane Berri Coelho

August/2012

Advisor: Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D..

Area of Concentration: Electric Energy Systems.

voltage stability, maximum loadability, continuation method, predictor-corrector scheme, saddle-node bifurcation, limit induced bifurcation, stability indexes.

Number of Pages: 152

This dissertation presents a methodology to identify and to classify the critical loadability points in power systems. Two strategies are used as the basis of this methodology. The first aims to find the maximum loadability of the electrical network and its corresponding power flow solution. This approach assumes that the PV curve is a quadratic form, this feature becoming more accentuated as the loadability level is closer to the critical point. The main motivation to use this method are the fast way the critical solution is obtained and the numerical robustness of the iterative process around the maximum loadability point. The second strategy uses a predictor-corrector scheme to identify the loadability points related to critical levels of reactive power generation, as the loadability level increases. Thus, the buses whose limits of reactive power generation are reached are identified and the corresponding loadability factor is computed simultaneously. In corrector step, the equations of the power flow corresponding to the bus which has reached the reactive power generation limit include the modeling of both the reference voltage magnitude and the reactive power balance of the PV bus whose limit has been reached. The classification of these critical points is based on both some concepts from the Bifurcation Theory and indexes computed with the aid of sensitivity relationships between the reactive power generation and the bus voltage magnitude. The numerical results obtained with two test-systems, the IEEE 24 Buses and a reduced network equivalent to the power system of the Southern Region of Brazil, illustrate the main features of the methodology presented.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curva PV	30
Figura 2.2	Curva PV para Diferentes Fatores de Potência.....	31
Figura 2.3	Curva QV.....	31
Figura 2.4	Curva QV para Diferentes Fatores de Potência	32
Figura 2.5	Diagramas de Bifurcação (a) Tensão Terminal do Gerador (b) Tensão na Barra de Carga.....	37
Figura 2.6	Ponto de Bifurcação Sela-Nó	38
Figura 2.7	Ponto de Bifurcação Induzida por Limites (a) Bifurcação Dinâmica Induzida por Limites e (b) Bifurcação Estática Induzida por Limites.....	39
Figura 3.1	Ponto de Intercâmbio de Restrições QV	50
Figura 3.2	Diagrama Unifilar do Sistema Teste de 5 Barras	63
Figura 3.3	Sistema Teste de 5 Barras: $\rho \times V$ - BSN.....	65
Figura 3.4	Sistema Teste de 5 Barras: $\rho \times Q_G$ - BSN.....	66
Figura 3.5	Sistema teste de 5 barras: $\rho \times V$ - BIL.....	68
Figura 3.6	Sistema teste de 5 barras: $\rho \times Q_G$ - BIL.....	68
Figura 4.1	Diagrama Unifilar do Sistema Teste IEEE 24 Barras ..	73
Figura 4.2	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$	77
Figura 4.3	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$	77
Figura 4.4	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ via Anarede.....	79
Figura 4.5	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $Q \times V$ via Anarede.....	79
Figura 4.6	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ via Anarede	79
Figura 4.7	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ via Anarede para as Barras de Carga.....	80
Figura 4.8	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 2	85
Figura 4.9	Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 2.....	86
Figura 4.10	Diagrama Unifilar do Sistema Equivalente da Região Sul de 82 Barras	90
Figura 4.11	Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 1.....	95

Figura 4.12 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 1.....	95
Figura 4.13 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede - Caso 1.....	98
Figura 4.14 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $Q_G \times V$ - via Anarede - Caso 1.....	98
Figura 4.15 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - via Anarede - Caso 1.....	99
Figura 4.16 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede para as Barras de Carga - Caso 1	99
Figura 4.17 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 2.....	105
Figura 4.18 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 2.....	105
Figura 4.19 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede - Caso 2.....	108
Figura 4.20 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $Q_G \times V$ - via Anarede - Caso 2.....	109
Figura 4.21 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - via Anarede - Caso 2.....	109
Figura 4.22 Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede para as Barras de Carga - Caso 2	109
Figura B.1 Esquema Predição Correção.....	139
Figura B.2 Fluxograma do Processo Iterativo do Método da Conti- nuação.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras para o Caso Base.	63
Tabela 3.2	Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras - BSN.	64
Tabela 3.3	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Teste de 5 Barras - BSN.	64
Tabela 3.4	Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras - BIL.	67
Tabela 3.5	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Teste de 5 Barras - BIL.	67
Tabela 4.1	Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 1.	74
Tabela 4.2	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 1.	75
Tabela 4.3	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras - Caso 1.	75
Tabela 4.4	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Anarede - Caso 1.	78
Tabela 4.5	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Anarede - Caso 1.	81
Tabela 4.6	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Flupot - Caso 1.	82
Tabela 4.7	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 1.	83
Tabela 4.8	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 2.	84
Tabela 4.9	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras - Caso 2.	84
Tabela 4.10	Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 2.	86
Tabela 4.11	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Flupot - Caso 2.	87
Tabela 4.12	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 2.	88

Tabela 4.13	Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Ob- tidos através dos Diferentes Métodos - Caso 1	92
Tabela 4.14	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo - Caso 1	92
Tabela 4.15	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente do Sul 82 Barras - Caso 1	94
Tabela 4.16	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente Sul de 82 Barras via Anarede - Caso 1	96
Tabela 4.17	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo via Anarede - Caso 1	96
Tabela 4.18	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente Sul de 82 Barras via Flupot - Caso 1	100
Tabela 4.19	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo via Flupot - Caso 1	100
Tabela 4.20	Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Ob- tidos através dos Diferentes Métodos - Caso 2	102
Tabela 4.21	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo - Caso 2	103
Tabela 4.22	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente do Sul 82 Barras - Caso 2	104
Tabela 4.23	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente Sul de 82 Barras via Anarede - Caso 2	106
Tabela 4.24	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo via Anarede- Caso 2	106
Tabela 4.25	Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equi- valente Sul de 82 Barras via Flupot - Caso 2	110
Tabela 4.26	Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carrega- mento Máximo via Flupot - Caso 2	110
Tabela 4.27	Resultados obtidos via Método da Aproximação Quadrática - Variação de ρ_0	113
Tabela 4.28	Resumo dos Resultados obtidos via Método da Aproximação Quadrática com Variação de $\Delta\rho$	114
Tabela C.1	Sistema de 82 Barras - Dados das linhas de transmissão	147
Tabela C.2	Sistema de 82 Barras - Dados das barras	149
Tabela C.3	Limites Operacionais do Sistema Teste Equivalente Sul 82 Barras	150

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

BIL Bifurcação Induzida por Limites

BSN Bifurcação Sela-Nó

CEPEL Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

FACTS *Flexible AC Transmission Systems*

FPO Fluxo de Potência Ótimo

HVDC *High Voltage Direct Current*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

MET Margem de Estabilidade de Tensão

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

PoC Método do Ponto de Colapso de Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Estabilidade de Tensão	24
1.2 Motivação e Objetivos do Trabalho.....	26
1.3 Organização do Documento	26
2 ESTABILIDADE DE TENSÃO	29
2.1 Conceitos Básicos	29
2.2 Caracterização do Problema	32
2.3 Pontos de Bifurcação	36
2.3.1 Bifurcação Sela-Nó (BSN)	36
2.3.2 Bifurcação Induzida por Limites (BIL)	38
2.4 Condições de Transversalidade	41
2.4.1 Condições de Transversalidade para BSN	41
2.4.2 Condições de Transversalidade para BIL.....	42
2.5 Conclusões	43
3 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS	45
3.1 Considerações Iniciais	45
3.2 Formulação Analítica	47
3.3 Pontos de Intercâmbio de Restrições QV	49
3.3.1 Relações de Sensibilidade no Ponto Crítico	51
3.4 Estimativa do Ponto de Máximo Carregamento	54
3.4.1 Determinação dos Coeficientes a_i , b_i e c_i	55
3.4.2 Cálculo das Derivadas de Segunda Ordem	56
3.4.3 Algoritmo	58
3.5 Identificação dos Pontos Críticos	59
3.5.1 Estágio de Predição	59
3.5.2 Cálculo do Fator de Passo	60
3.5.3 Estágio de Correção	61
3.6 Algoritmo	62
3.7 Exemplo	62
3.7.1 Caso 1	64
3.7.2 Caso 2	66

3.8	Conclusões	69
4	RESULTADOS NUMÉRICOS	71
4.1	Considerações Iniciais	72
4.2	Sistema Teste de IEEE 24 Barras	73
4.2.1	Resultados das Simulações - Caso 1	73
4.2.2	Resultados das Simulações via Anarede - Caso 1.....	78
4.2.3	Resultados das Simulações via Flupot - Caso 1	80
4.2.4	Resultados das Simulações - Caso 2	82
4.2.5	Resultados das Simulações via Anarede - Caso 2.....	87
4.2.6	Resultados das Simulações via Flupot - Caso 2	87
4.3	Sistema Equivalente da Região Sul de 82 Barras	89
4.3.1	Descrição do Sistema	89
4.3.2	Resultados das Simulações - Caso 1	91
4.3.3	Resultados das Simulações via Anarede - Caso 1.....	96
4.3.4	Resultados das Simulações via Flupot - Caso 1	99
4.3.5	Resultados das Simulações - Caso 2	102
4.3.6	Resultados das Simulações via Anarede - Caso 2.....	106
4.3.7	Resultados das Simulações via Flupot - Caso 2	110
4.4	Método da Aproximação Quadrática	112
4.4.1	Fator de Carregamento Inicial.....	112
4.4.2	Fator de Variação da Demanda.....	113
4.5	Conclusões	114
5	CONCLUSÕES.....	117
5.1	Considerações Finais	118
5.1.1	Método da Aproximação Quadrática	118
5.1.2	Algoritmo Preditor Corretor	119
5.1.3	Índices de Estabilidade	119
5.2	Contribuições da Dissertação	119
5.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	120
	REFERÊNCIAS	123
	APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA ..	129
	APÊNDICE B - MÉTODO DA CONTINUAÇÃO	139
	APÊNDICE C - DADOS DOS SISTEMAS TESTES	147

1 INTRODUÇÃO

A segurança e a economia são requisitos fundamentais para a operação de sistemas elétricos de potência. Assim, a manutenção da confiabilidade do sistema de potência, enquanto os custos de operação são mantidos, é de vital importância [1]. Para este fim, uma avaliação da estabilidade de tensão é indispensável [1].

Após a ocorrência de diversas interrupções de considerável gravidade, a instabilidade de tensão se tornou uma séria preocupação para as empresas do setor elétrico. Algumas destas interrupções significativas relacionadas a este problema são os *blackout's* ocorridos no Chile em 1996, em Atenas em 2004, em agosto de 2003 afetando parte do Canadá e dos Estados Unidos, e até mesmo no Brasil em 1986 e 1997, entre outros [2] [3] [4] [5] [6] [7]. O evento de 24 de abril de 1997 ocorrido no Brasil foi decorrência de uma demanda recorde no Sistema Interligado Nacional, aliada à manutenção de equipamentos importantes para controle de tensão, originando um corte de carga de aproximadamente 7600 MW nas regiões Sul e Sudeste/Centro-Oeste do país [7].

No Brasil, um problema recorrente relacionado à estabilidade de tensão ocorre no estado do Rio Grande do Sul atualmente. Nesta região, cortes de carga resultam da necessidade de operar um número mínimo de unidades geradoras sincronizadas à usina térmica localizada naquela região. Dado que a disponibilidade desta geração é baixa, dependendo do nível de carga a ser atendido, o risco de corte de carga e até mesmo colapso de tensão é elevado.

A ocorrência do colapso de tensão nestes casos se deve principalmente a estes sistemas operarem muito próximos dos seus limites de segurança e ao elevado crescimento da carga. Esta característica é ainda mais significativa em países em desenvolvimento como o Brasil, devido ao maior crescimento anual da economia desses países. A falta de investimentos na expansão e na manutenção do setor de transmissão, além do atraso na entrada de obras desse setor, tem elevado o uso dessas redes, além de aumentar a dificuldade de atendimento da demanda, fazendo com que o sistema opere mais próximo dos limites de carregamento [8]. Por esta razão, a predição, a identificação e a prevenção de pontos de instabilidade de tensão desempenham um papel significativo no planejamento e na operação de sistemas elétricos de potência [4].

Adicionalmente, a preocupação com o meio ambiente tem se tornado cada vez maior, aumentando as restrições ambientais impostas para construção de grandes empreendimentos. Com isso, a dificuldade

de construção de empreendimentos, tais como linhas de transmissão longas e usinas hidroelétricas de armazenamento, tem sido maior, o que também contribui para deixar o sistema elétrico mais sobrecarregado. Devido a estes fatores, pouco se tem verificado construções de usinas de regularização, tendo-se investido cada vez mais em energias com menores impactos ambientais, tais como as pequenas centrais hidroelétricas e os parques eólicos. Porém, estas fontes possuem uma produção de energia muito variável, reduzindo-se a controlabilidade do sistema elétrico, sendo necessária uma reserva de potência adicional no sistema, de forma a suprir o déficit de geração originado de desvios da previsão de geração destas unidades. A entrada dos parques eólicos na matriz energética do país, introduziu uma preocupação adicional no que diz respeito ao controle de tensão. Grande parte dos parques eólicos instalados não possuem dispositivos para controle de tensão. Somente aqueles construídos mais recentemente, de forma a atender aos requisitos dos Procedimentos de Rede vigentes, possuem estes dispositivos, auxiliando no controle de tensão da rede elétrica a qual estão conectados, fornecendo ou absorvendo potência reativa, conforme solicitado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Cabe mencionar que os Procedimentos de Rede são documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS, com a participação dos agentes do setor elétrico, [9]. Estes documentos são aprovados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e definem os requisitos e os procedimentos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real, [9].

A referência [6] faz um estudo sobre a estabilidade de tensão do sistema brasileiro em regime permanente e sob contingência. Os resultados obtidos mostram que a margem de estabilidade de tensão (MET), a qual é definida como a diferença entre o máximo carregamento e o carregamento inicial, é muito baixa, sendo influenciada principalmente pela MET da região Sudeste/Centro-Oeste (área de 440kV).

1.1 Estabilidade de Tensão

O estudo da estabilidade de tensão é um dos fatores essenciais quando se trata da operação de sistemas elétricos sob o ponto de vista de segurança. Ela está relacionada à capacidade do sistema de sustentar um nível de tensão aceitável quando este sofre um distúrbio [10] [4] [5].

Devido ao carregamento excessivo do sistema, ocasionado pelas

razões anteriormente expostas, é necessário um monitoramento preciso e medidas de controle adequadas, de forma a evitar o colapso de tensão, o qual pode conduzir à um *blackout*. Os limites de geração e transmissão de potência reativa exercem os maiores efeitos sobre a estabilidade de tensão [11] [4] [12] e [13]. Estes sistemas se tornam mais vulneráveis ao colapso de tensão quando os limites de potência reativa são encontrados [11] e [13]. Por esta razão, a capacidade de geração de potência reativa é um fator muito importante na análise da segurança do sistema de potência [14].

A geração e a demanda do sistema possuem características dinâmicas, o que dificulta o controle da tensão quando a carga solicita uma potência superior à capacidade de transmissão da rede elétrica. Dessa forma, linhas de transmissão muito carregadas, normalmente, operam com seu perfil de tensão degradado, necessitando neste caso, a adoção de medidas corretivas [15].

De acordo com o Módulo 10.21 dos Procedimentos de Rede, os recursos utilizados para controle de tensão são [16]:

- Tensão de geração das usinas;
- Comutadores sob carga de transformadores;
- Banco de capacitores;
- Reatores;
- Compensadores síncronos;
- Absorção ou fornecimento de potência reativa através de usinas Eólicas;
- Capacitores de subtransmissão/distribuição;
- Desligamento de linhas de transmissão.

O desligamento de linhas de transmissão para controle de tensão é feito somente quando os demais recursos estão esgotados, ou seja, é a última opção, de forma a não reduzir a confiabilidade do sistema. Em cada área do sistema existem recursos específicos que devem ser utilizados. Na região sul, apenas no estado do Rio Grande do Sul se utiliza as usinas Eólicas como recurso para controle de tensão (Subáreas Sul e Metropolitana 230kV). Especificamente na subárea fronteira oeste do Rio Grande do Sul, solicita-se fornecimento alternativo de potência reativa através da conversora de Rivera (divisa Brasil - Uruguai), ou

até mesmo a suspensão da exportação de energia para o Uruguai via conversora de Rivera.

Em termos matemáticos, o problema de estabilidade de tensão está associado aos pontos de bifurcação, particularmente, sela-nó e induzida por limites [17]. Os casos mais comuns de carregamento crítico correspondem aos pontos de bifurcação sela-nó. Os pontos de bifurcação induzida por limites, também são recorrentes e ocorrem devido à exaustão repentina das fontes de potência reativa [18].

1.2 Motivação e Objetivos do Trabalho

O alcance dos limites de geração de potência reativa das unidades geradoras é um sinal de vulnerabilidade da rede elétrica, sendo importante, portanto, a disponibilidade de um método para determinar de forma direta os pontos onde os limites de geração de potência reativa são encontrados [13]. A identificação das barras *fracas* (críticas) do sistema, nas etapas de planejamento ou até mesmo durante a operação, é importante. O conjunto de barras críticas permite analisar a possibilidade de reforço (medidas preventivas) frente ao colapso de tensão, tais como a expansão da transmissão, a inserção de bancos de capacitores ou até mesmo de dispositivos FACTS. O estudo de novas formas de se avaliar, identificar e classificar os pontos críticos de potência reativa também é importante para auxiliar no planejamento da operação em modo seguro.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para se obter uma forma eficaz de identificar e classificar os pontos críticos de geração de potência reativa da rede elétrica. Neste trabalho, isto foi realizado utilizando-se uma modelagem semelhante àquela do método da continuação, identificando os pontos críticos e analisando o tipo de bifurcação correspondentes nestes pontos.

1.3 Organização do Documento

Além deste capítulo de introdução e contextualização do tema, esta dissertação é composta por mais 4 capítulos e 3 apêndices, os quais são sumarizados a seguir.

O **Capítulo 2** descreve a base teórica do tema abordado neste trabalho. São apresentados os aspectos gerais relacionados ao problema de estabilidade de tensão, alguns conceitos importantes e a descrição

das curvas PV e QV. São ainda mostrados nesta seção os tipos de bifurcação mais frequentes em termos de estabilidade de tensão, as condições para a classificação destes tipos e as correspondentes condições de transversalidade.

O **Capítulo 3** aborda a metodologia utilizada para estimar o fator de máximo carregamento e para identificação dos pontos críticos de geração de potência reativa, além dos índices usados para classificar os pontos de intercâmbio de restrições QV. São apresentados os fundamentos teóricos, a formulação utilizada e os métodos propostos. Um exemplo com um sistema teste de pequeno porte também é mostrado nesta seção para auxiliar no entendimento da teoria abordada.

O **Capítulo 4** apresenta os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas com um sistema-teste disponível na literatura e com um sistema equivalente da região sul do país. Em cada caso, são mostradas as análises do ponto de máximo carregamento e dos pontos críticos obtidos com auxílio dos programas computacionais desenvolvidos em ambiente Matlab, e através dos programas comerciais Anarede e Flupot.

O **Capítulo 5** descreve as principais conclusões deste trabalho referentes aos métodos apresentados e aos resultados obtidos através das simulações numéricas realizadas, assim como algumas propostas para o desenvolvimento de novos trabalhos relacionados a este assunto.

O **Apêndice A** mostra a formulação do fluxo de potência em coordenadas retangulares, enquanto o **Apêndice B** sumariza a formulação geral do Método da Continuação. O **Apêndice C** apresenta os limites operacionais e os dados das barras e linhas de transmissão dos sistemas testes.

2 ESTABILIDADE DE TENSÃO

Este capítulo apresenta a caracterização e os aspectos gerais relacionados ao problema de estabilidade de tensão. São descritos alguns conceitos e definições básicos para a compreensão do referido problema, tais como o tipo de estabilidade em análise e a descrição das curvas PV e QV. Adicionalmente, os diferentes pontos de bifurcação, as características fundamentais para a classificação destes pontos e as condições de transversalidade para cada tipo de bifurcação são apresentados.

2.1 Conceitos Básicos

A estabilidade de tensão é definida como a capacidade do sistema em manter um nível de tensão aceitável em todas as barras sob condições normais de operação ou após a ocorrência de um distúrbio [19]. Se o sistema é estável, quando a injeção de potência reativa em uma barra é incrementada, a magnitude da tensão nesta mesma barra aumenta, caso contrário, ou seja, se a tensão decai com o aumento da potência reativa na barra, o sistema é instável [19]. A instabilidade de tensão resulta da tendência do sistema de potência em restaurar o consumo de potência reativa em uma condição operativa além da capacidade do sistema de transmissão. A principal característica da instabilidade de tensão é a queda da magnitude da tensão de forma progressiva.

O colapso de tensão é, normalmente, uma sequência de eventos acompanhados de instabilidade de tensão levando a um perfil de tensão inaceitável em uma determinada parte da rede elétrica [19].

A ocorrência de uma contingência na rede pode ocasionar uma súbita elevação da demanda de potência reativa, cujo adicional é suprido pela reserva de potência reativa dos geradores e/ou compensadores [19]. Normalmente, esta reserva é suficiente e o sistema de potência consegue se manter com um nível de tensão aceitável. No entanto, dependendo da combinação de eventos e das condições da rede, a solicitação de uma quantidade adicional de potência reativa pode resultar no colapso de tensão.

Diversas informações úteis para a análise da estabilidade de tensão podem ser obtidas através das curvas PV e QV. A curva PV representa a variação da tensão em uma barra em relação ao aumento do carregamento do sistema de potência. Cada ponto desta curva é um

ponto de operação da rede para um dado nível de carregamento [7]. O ponto crítico de carregamento é o chamado *nariz* da curva PV. Além deste ponto, não existe solução para as equações da rede elétrica em regime permanente. Através desta curva se pode analisar a margem de carregamento do sistema, a qual é definida como a diferença entre o nível de carga no ponto de operação base e o nível de carga máximo. A

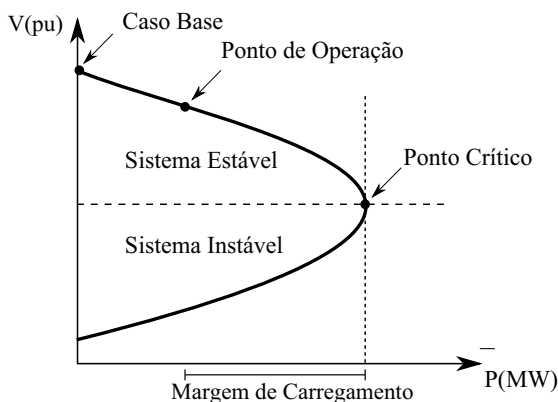


Figura 2.1 – Curva PV

margem de carregamento e o ponto crítico podem ser visualizados na curva PV da Figura 2.1. Na parte superior da curva estão os pontos de operação estáveis, enquanto a parte inferior é considerada uma região de operação instável [20].

A Figura 2.2 mostra a curva PV para diferentes fatores de potência. Pode-se observar que quando o fator de potência é capacitivo, a margem de carregamento aumenta, porém, o colapso de tensão pode ocorrer para níveis normais de tensão [7].

A Figura 2.3 mostra uma curva QV, apresentada na referência [7], a qual representa a sensibilidade da tensão na barra com a variação da potência reativa. O ponto crítico de operação da curva QV é onde a derivada $\frac{dQ}{dV}$ é nula. Assim, o lado direito da curva é a parte estável, enquanto o lado esquerdo é a parte instável. Ou seja, para uma taxa de variação $\frac{dQ}{dV}$ positiva o sistema é estável, caso contrário é instável [19]. No ponto de máximo carregamento da rede elétrica, a margem de potência reativa na barra crítica é praticamente nula [7]. Portanto, através da margem de carga reativa pode-se obter a capacidade de

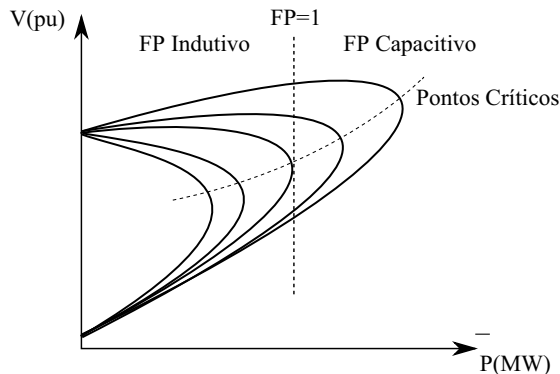


Figura 2.2 – Curva PV para Diferentes Fatores de Potência

potência reativa de uma barra do sistema frente ao colapso de tensão [7]. Se a potência reativa de uma barra varia de forma acentuada com a queda da tensão e, se esta potência estiver próxima de zero, esta barra contribui para a perda da estabilidade de tensão do sistema de potência [7]. A Figura 2.4 mostra o comportamento da curva QV para diferentes fatores de potências [7].

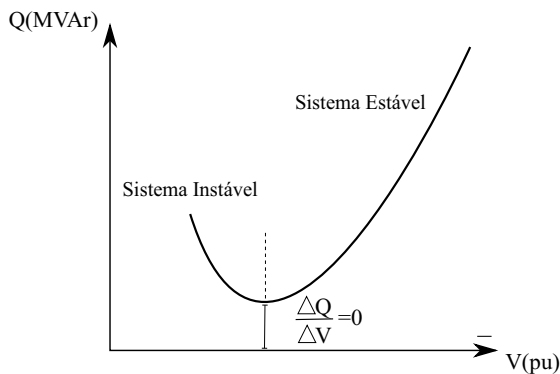


Figura 2.3 – Curva QV

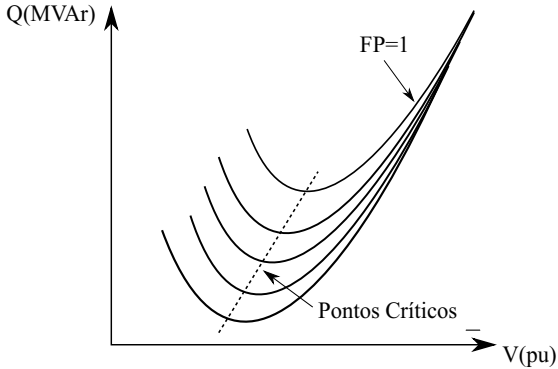


Figura 2.4 – Curva QV para Diferentes Fatores de Potência

2.2 Caracterização do Problema

O problema da estabilidade de tensão está relacionado ao carregamento crítico do sistema de potência, e portanto, à máxima transferência de potência. A geração e a demanda do sistema possuem características dinâmicas, o que dificulta o controle da tensão quando a carga solicita uma potência superior à capacidade de transmissão da rede elétrica.

Apesar das simulações no domínio do tempo modelarem mais detalhadamente os eventos e a cronologia dos acontecimentos que levam à instabilidade, elas consomem um tempo computacional elevado e não disponibilizam de forma direta as informações sobre as relações de sensibilidade e o grau de estabilidade [19]. Por esta razão, muitos aspectos do problema de estabilidade de tensão podem ser efetivamente analisados com o uso de modelos estáticos [19]. De acordo com a referência [21], para entender-se adequadamente o fenômeno do colapso de tensão, modelos dinâmicos do sistema de potência são necessários. No entanto, a margem de carregamento e a sensibilidade no ponto de bifurcação dependem somente da parte estática das equações dinâmicas. Modelos dinâmicos podem ser reduzidos em equações estáticas e simplificados sem afetar as margens de carregamento e as suas sensibilidades. No referido artigo, mostra-se que para o cálculo computacional do ponto crítico o modelo estático pode ser utilizado sem perda de precisão. Portanto, a análise da estabilidade através de modelos dinâmicos é necessária para um estudo detalhado de um evento de colapso de

tensão específico, para ajustes de proteção e controle e para testes de medidas corretivas [19].

Problemas de estabilidade de tensão estão associados aos pontos de bifurcação, particularmente, sela-nó e induzida por limites, as quais são detalhadas nas seções seguintes. Outros tipos de bifurcação tem tido atenção nos estudos de sistemas de potência, tais como as bifurcações de Hopf, as quais estão associadas com instabilidades oscilatórias, razão pela qual elas não serão tratadas neste trabalho.

Existem várias formas de se realizar estudos de estabilidade de tensão. Uma estratégia para encontrar o limite de estabilidade através do Fluxo de Potência convencional consiste em incrementar o carregamento da rede gradualmente até que a convergência do processo iterativo da solução do fluxo de potência não seja mais alcançada [22]. Esta abordagem frequentemente sofre de problemas de convergência e, dessa forma, a determinação do limite de carregamento não é precisa [22].

Os métodos mais utilizados para o estudo da margem de estabilidade de tensão são os Métodos Diretos e o Método da Continuação. Os Métodos Diretos consistem em maximizar o fator de carregamento, satisfazendo as equações do fluxo de potência, os limites de tensão de barra, os limites de geração de potência reativa, e os demais limites de operação de interesse [17]. O Método da Continuação determina o ponto crítico de um sistema de equações não lineares parametrizadas, fornecendo uma seqüência de soluções, desde um ponto inicial (caso base), até um ponto de carregamento máximo, o qual pode ser caracterizado como um ponto de bifurcação.

As referências [2] [3] [23] [14] [4] e [22] utilizam o Método da Continuação nos estudos de estabilidade de tensão. A referência [2] aborda os conceitos básicos relacionados ao Método da Continuação e apresenta a formulação padrão. A abordagem utilizada na referência [3] faz uso de uma parametrização local na etapa de correção para incluir uma equação extra no conjunto de equações não lineares. A desvantagem deste método é que o valor de uma das variáveis, denominada *variável da continuação*, deve ser especificado a priori, o que pode causar problemas de convergência na etapa de correção. O artigo da referência [23] apresenta a modelagem do Método da Continuação, utilizando as equações da rede elétrica em coordenadas retangulares, para análise de pontos críticos de carregamento do sistema de potência. De acordo com os autores, a modelagem utilizando coordenadas retangulares permite estimar de forma mais precisa as injeções de potência reativa originadas das variações da tensão complexa. Neste artigo também é tratado o redespacho de geração de potência ativa. Apresenta-se uma

estratégia de redespacho baseada na solução de um problema de otimização, cuja solução é baseada nos resultados intermediários obtidos durante a aplicação do Método da Continuação. Através do uso das equações em coordenadas cartesianas também é possível utilizar diferentes modelos analíticos de carga. De acordo com a referência [3] uma característica importante do processo iterativo do Fluxo de Potência Continuado é que o mesmo permanece numericamente bem condicionado tanto no ponto crítico quanto ao redor dele. Pode-se utilizar resultados obtidos em etapas intermediárias do processo para desenvolver índices de estabilidade e identificar as áreas do sistema de potência que são mais propícias à colapsos de tensão.

Os artigos [4] e [24] propõem índices de estabilidade de tensão, os quais são utilizados na prática para prever a proximidade da bifurcação sela-nó e induzida por limites. No artigo [24] é feito um estudo do perfil dos índices de bifurcação. De acordo com [24], os valores singulares da matriz Jacobiana das equações do fluxo de potência convencional podem ser usados para detectar a proximidade do ponto de bifurcação sela-nó. Para bifurcações induzidas por limites os índices que se baseiam na singularidade do Jacobiano não podem ser usados, visto que este tipo de bifurcação não está associado com singularidades. Assim, para este tipo de bifurcação a distância associada diretamente com os limites máximos de potência reativa dos geradores pode ser usada para determinar o ponto de bifurcação induzida por limites. O índice de potência reativa, em aplicações práticas, se baseia na pré identificação dos geradores críticos cujo limite de potência reativa conduz a uma bifurcação induzida por limites. Na referência [4] é mostrado um índice que indica se a mudança de um sistema de geração de potência reativa ilimitada para um sistema de potência reativa limitada irá resultar em uma deterioração da estabilidade apenas, ou se irá provocar um colapso de tensão imediato.

A referência [24] utiliza o Método do Ponto de Colapso de Tensão, o qual tem por objetivo o cálculo direto do ponto crítico de carregamento. No trabalho da referência [14], os autores combinaram o método do Ponto de Colapso de Tensão (PoC) com um algoritmo preditor-corretor, visando calcular o ponto de bifurcação sela-nó e identificar o gerador para o próximo ponto de intercâmbio de restrições QV. Adicionalmente, calcula-se a solução do fluxo de potência no ponto de intercâmbio de restrições QV correspondente. A referência [22] descreve a implementação do Método do Ponto de Colapso de Tensão (PoC), além do Método da Continuação, em grandes sistemas ac/dc. Este artigo trata dos desafios encontrados na implementação destes dois

métodos devido à presença de transmissão de alta tensão em corrente contínua (HVDC), áreas de controle de intercâmbio de potência, transformações de regulação, e limites de tensão e potência reativa. Além disso, apresenta-se as características dos métodos e suas aplicações em problemas de estabilidade de tensão. Os autores mencionam também que o Método do Ponto de Colapso de Tensão realiza um cálculo direto destes limites e tem se mostrado viável computacionalmente e adequado para determinar a proximidade ao colapso de tensão em redes ac/dc. O PoC e os Métodos Diretos produzem informações tanto do autovetor à direita quanto à esquerda. Segundo [22], o autovetor à direita identifica áreas na rede de operação inclinadas ao colapso de tensão, enquanto os autovetores à esquerda podem ser usados para calcular uma estratégia de controle ótima para evitar a bifurcação sela-nó.

As referências [17] e [25] propõem métodos de Otimização para calcular os pontos de máximo carregamento de modelos de fluxo de potência, os quais estão diretamente associados com pontos de bifurcação sela-nó e bifurcação induzida por limites. De acordo com [17], com a utilização do Fluxo de Potência Ótimo, permite-se que tanto a tensão, quanto a geração de potência reativa variem permitindo encontrar condições ótimas de operação. Um dos objetivos dos estudos realizados neste trabalho é provar que as condições de otimalidade dos pontos de solução fornecem condições de transversalidade dos pontos de bifurcação correspondentes. O artigo [25] faz uso do método Primal Dual de Pontos Interiores para este tipo de estudo.

Através de sistemas exemplos, os autores de [11] demonstraram que quando o limite de potência reativa é encontrado em sistemas com carregamentos menores, a estabilidade deste sistema diminui, porém não é perdida. Já para carregamentos suficientemente altos, o sistema pode ser imediatamente desestabilizado quando o limite de potência reativa for atingido, com risco de ocorrer o colapso de tensão ao longo da trajetória.

Os autores da referência [26] apresentam um método que utiliza a aproximação quadrática da curva PV para estimar o ponto crítico. A curva PV é aproximadamente uma função quadrática e tende a se tornar mais acentuadamente quadrática nas proximidades do ponto de carregamento crítico. Este método usa sensibilidades de primeira e segunda ordem para aumentar a precisão do ponto crítico. Segundo os autores, este método é rápido e é mais robusto perto do ponto de colapso do que outros métodos existentes. Ao invés de traçar as curvas PV do ponto de operação para o colapso de tensão, o que requer várias soluções do fluxo de potência, curvas aproximadas são obtidas utilizando-se o

último dado de carga/geração programada para calcular os coeficientes da curva quadrática.

2.3 Pontos de Bifurcação

A Teoria da Bifurcação permite obter informações qualitativas e quantitativas sobre o comportamento de um sistema não linear próximo ao ponto de equilíbrio e/ou de bifurcação [17].

No ponto de bifurcação das equações do fluxo de potência a carga atinge um valor crítico, a partir do qual não existe solução real. Isto pode ser atribuído ao aumento da demanda além de um determinado limite ou a falta de suporte de potência reativa, a qual pode ser causada por limitações na capacidade de geração e/ou transmissão.

As Figuras 2.5(a) e 2.5(b), transcritas da referência [14], retratam as curvas PV na barra de geração e na barra de carga, respectivamente. Nessas figuras, a curva sólida da parte superior é estável, enquanto a curva tracejada da parte inferior é instável. O ponto inicial de operação no caso base é o ponto O, onde a geração de potência reativa do gerador não está no limite e a tensão na barra terminal é regulada. Incrementando-se a carga, o ponto de operação se move de O para A até o gerador atingir seu limite de potência reativa Q_A . O ponto A é denominado *ponto de intercâmbio de restrições QV*. O ponto de operação irá se mover continuamente ao longo do traçado $Q = Q_A$ de A para B, onde ocorre a bifurcação sela-nó. É possível elevar o carregamento máximo adicionando-se potência reativa no nó do gerador, onde o limite Q_A se torna Q_C . Neste caso, o gerador mantém a tensão até atingir o ponto C, o qual é uma região instável. Este ponto é denominado de *ponto de instabilidade imediata*.

Os pontos de bifurcação sela-nó e induzida por limites, descritos a seguir, são fenômenos associados diretamente aos problemas de instabilidade de tensão.

2.3.1 Bifurcação Sela-Nó (BSN)

Os casos mais comuns de carregamento crítico correspondem a bifurcação sela-nó. Os pontos deste tipo ocorrem quando duas trajetórias caracterizando os pontos de equilíbrio, normalmente aos pares (um estável e outro instável), se fundem e desaparecem como consequência da variação lenta de certos parâmetros, tipicamente o parâmetro de

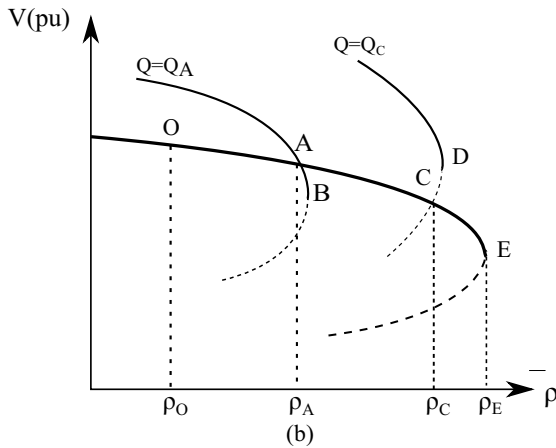
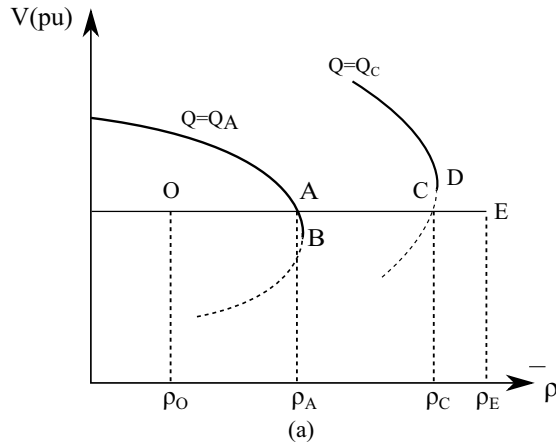


Figura 2.5 – Diagramas de Bifurcação (a) Tensão Terminal do Gerador (b) Tensão na Barra de Carga

carga, como mostrado na Figura 2.6, a qual mostra a curva PV do sistema de potência e é baseada na referência [17].

Quando o ponto de bifurcação sela nó é encontrado pelo sistema de potência, na barra do gerador, a tensão é igual a tensão de referência, $V_G = V_{ref}$, e a potência reativa gerada é inferior ao limite máximo, $Q_G < Q_G^{max}$.

O conjunto de equações algébricas não lineares parametrizadas que descreve um sistema de potência em regime permanente é expresso

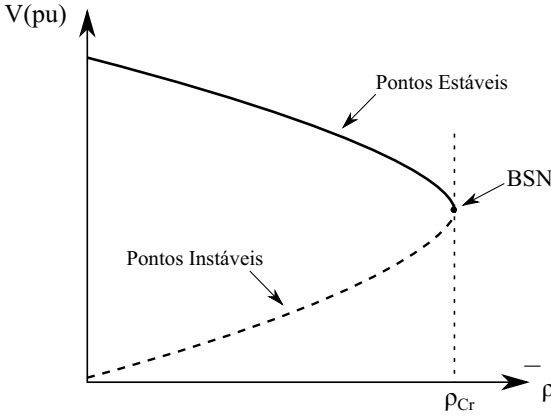


Figura 2.6 – Ponto de Bifurcação Sela-Nó

por:

$$g(x, \rho) = 0 \quad (2.1)$$

onde $g(\cdot)$ representa as equações do fluxo de potência, x é o vetor das variáveis de estado e ρ é o parâmetro associado à variação da demanda.

Em termos matemáticos, o ponto de bifurcação sela-nó ocorre no ponto onde o Jacobiano do fluxo de potência, $\nabla g(x^*, \rho^*)$, possui um único autovalor zero, com autovetores à direita e à esquerda não nulos, v e w , respectivamente [24] [17], ou seja,

$$\begin{aligned} g(x^*, \rho^*) &= 0 \\ w^t \nabla g|_* &= \nabla g|_* v = 0 \\ \|v\|, \|w\| &> 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

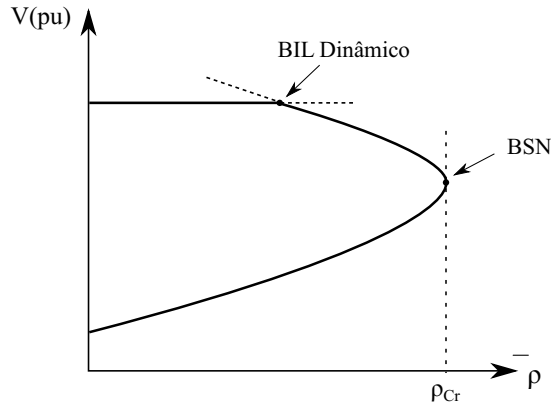
Onde o sobrescrito * indica o ponto crítico.

Estas e as demais condições de transversalidade apresentadas neste capítulo garantem que dois pontos de equilíbrio se aproximam um do outro quando o parâmetro de carga $\rho \rightarrow \rho^*$, e então desaparece quando ρ continua aumentando.

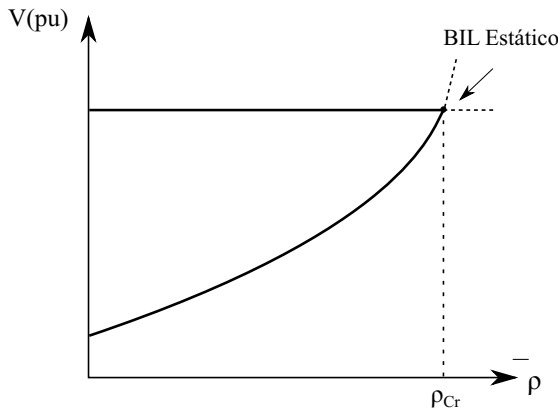
2.3.2 Bifurcação Induzida por Limites (BIL)

A bifurcação induzida por limites é tipicamente encontrada em sistemas de potência, e em geral ocorre devido à exaustão repentina

das fontes de potência reativa [18]. Com a elevação da demanda de potência reativa os limites de potência reativa das unidades geradoras, ou de outro dispositivo regulador de tensão, são atingidos [17]. Neste caso, as margens de estabilidade de tensão para este tipo de bifurcação são geralmente reduzidas, conduzindo eventualmente a rede ao colapso de tensão. A caracterização deste tipo de bifurcação pode ser vista na curva PV da Figura 2.7.



(a)



(b)

Figura 2.7 – Ponto de Bifurcação Induzida por Limites (a) Bifurcação Dinâmica Induzida por Limites e (b) Bifurcação Estática Induzida por Limites

Há dois tipos de bifurcação induzida por limites, denominados

bifurcação dinâmica e *bifurcação estática*. O primeiro tipo não está associado aos pontos limite de carregamento, pois o sistema ainda admite pontos de equilíbrio para valores do parâmetro de carga além do ponto de bifurcação induzida por limite, como pode ser visto na Figura 2.7 (a) [17], [24]. O caso da bifurcação estática induzida por limites é semelhante à bifurcação sela-nó, pois corresponde a um ponto onde duas soluções (de níveis inferior e superior de magnitude da tensão) se fundem e desaparecem com a variação do parâmetro de carga ρ [17]. Portanto, o carregamento do sistema não pode ser aumentado além deste ponto por limitação dos recursos de geração de potência reativa. A Figura 2.7 (b) mostra a curva PV para bifurcação estática induzida por limites. Neste ponto tanto a magnitude da tensão na barra do gerador quanto a geração de potência reativa estão fixas, a primeira no valor de referência do caso base, enquanto a segunda no limite superior, ou seja,

$$\begin{aligned} V_G &= V_{ref} \\ Q_G &= Q_{G_{Max}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

No ponto de bifurcação sela-nó, que ocorre na sequência de um ponto de bifurcação dinâmica induzida por limites, como na Figura 2.7 (a), a magnitude da tensão na barra do gerador que atingiu o limite de geração de potência reativa é inferior à magnitude da tensão de referência e a potência reativa gerada está fixa no seu limite superior, ou seja,

$$\begin{aligned} V_G &< V_{ref} \\ Q_G &= Q_{G_{Max}} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Os tipos de limites que podem originar BIL's são os denominados limites de atuação, limites de estado e limites de comutação [17]. Os limites de atuação são funções das variáveis de estado do sistema, e estão relacionados à bifurcação induzida por limites. Os limites de estado estão associados às variáveis de estado. Se uma destas atinge o limite, isto resulta na redução do sistema em uma dimensão, pois a variável de estado se torna constante [17]. Os limites de comutação estão relacionados às ações de relés ou esquemas de proteção da rede elétrica, os quais podem resultar em mudanças em todo o sistema, e consequentemente, nas variáveis de estado [17].

2.4 Condições de Transversalidade

As condições de transversalidade garantem que dois pontos de equilíbrio se aproximam um do outro quando o parâmetro da carga ρ tende ao valor crítico, ρ^* , mesclam-se em ρ^* , e desaparecem quando ρ continua aumentando. Essas condições mudam de acordo com o tipo de bifurcação em análise, como descrito nas seções a seguir.

2.4.1 Condições de Transversalidade para BSN

A bifurcação sela nó do conjunto de equações do fluxo de potência, descrita da seção 2.3.1, é onde os pontos de equilíbrio se fundem, como consequência do parâmetro da carga atingir seu valor crítico. As seguintes condições de transversalidade são satisfeitas neste ponto e podem ser utilizadas para caracterizar e detectar BSN's [17] [27]:

$$\begin{aligned}
 g(x^*, \rho^*) &= 0 \\
 w^t \nabla_x g(x^*, \rho^*) &= \nabla_x g(x^*, \rho^*) v = 0 \\
 \nabla_\rho g(x^*, \rho^*) v &\neq 0 \\
 w^t \nabla_\rho g(x^*, \rho^*) &\neq 0 \\
 w^t (\nabla_x^2 g(x^*, \rho^*) v) v &\neq 0 \\
 \|v\|, \|w\| &> 0
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

onde v e w são os autovetores à direita e à esquerda, respectivamente, correspondentes ao menor autovalor da matriz $\nabla_x g(x^*, \rho^*)$, a qual é a matriz de primeiras derivadas de $g(x, \rho)$ em relação às variáveis de estado x , já $\nabla_\rho g(x^*, \rho^*)$ é a matriz de primeiras derivadas de $g(x, \rho)$ em relação à ρ , ambas calculadas no ponto (x^*, ρ^*) , e $\nabla_x^2 g(x^*, \rho^*)$ representa a segunda derivada de $g(x, \rho)$ com relação a x no ponto (x^*, ρ^*) .

A segunda condição implica que a matriz do Jacobiano ($\nabla_x g(x^*, \rho^*)$) é singular. O autovetor à direita, correspondente ao autovalor nulo, indica a direção de deslocamento do ponto de equilíbrio com relação ao ponto de bifurcação. Este autovetor fornece informações sobre a variação das tensões nodais em torno da solução crítica. O autovetor à esquerda indica a sensibilidade deste carregamento com relação as injeções de potência, além de permitir selecionar os controles mais adequados para maximizar a distância ao ponto de bifurcação [28]. A terceira e quarta equações garantem que não há pontos de equilíbrio na região de ρ^* quando $\rho > \rho^*$ [17].

Estas condições também podem ser decompostas em dois siste-

mas de equações equivalentes, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} g(x^*, \rho^*) &= 0 \\ w^t \nabla_x g(x^*, \rho^*) &= 0 \\ \|w\|_\infty &= 1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} g(x^*, \rho^*) &= 0 \\ \nabla_x g(x^*, \rho^*) v &= 0 \\ \|v\|_\infty &= 1 \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde $\|\cdot\|_\infty$ representa a norma infinita, e portanto, $\|w\|_\infty = \max(|w_i|)$ e $\|v\|_\infty = \max(|v_i|)$.

2.4.2 Condições de Transversalidade para BIL

Quando um limite de potência reativa numa barra i é atingido, no ponto de intercâmbio de restrições, as seguintes condições de transversalidade, as quais são utilizadas para modelar e detectar este tipo de bifurcação, são satisfeitas [17]:

$$\begin{aligned} g(x^*, \rho^*) &= 0 \\ h_i(x^*, \rho^*) &= h_i^{\text{lim}} \\ h_j(x^*, \rho^*) &< h_j^{\text{lim}}, \quad \text{para } j \neq i \\ \det(J_v(x^*, \rho^*)) &\neq 0 \\ \det(J_q(x^*, \rho^*)) &\neq 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

onde $h_i(x^*, \rho^*)$ e h_i^{lim} representam a injeção e o limite de potência reativa em uma determinada barra i , a qual atinge o seu limite de potência reativa, e J_v e J_q são as matrizes Jacobianas das equações $h_0(x)$ com a barra i modelada como PV (antes do limite ser atingido) e como PQ (após o limite ter sido atingido), respectivamente.

O ponto de intercâmbio de restrições QV é a intersecção das componentes das curvas PV, uma para o qual o gerador em questão está atuando no modo PV e outra onde o gerador está atuando no modo PQ [1].

Adicionalmente, o índice α , definido abaixo, é utilizado para definir o tipo de bifurcação induzida por limites.

$$\alpha = \frac{\det(J_v(x^*, \rho^*))}{\det(J_q(x^*, \rho^*))} \neq 0 \quad (2.9)$$

Se $\alpha > 0$ o ponto de intercâmbio de restrições é um ponto de

bifurcação estática induzida por limites, enquanto que se $\alpha < 0$ este ponto é um ponto de bifurcação dinâmica induzida por limites [17].

Outra forma de se obter o tipo da bifurcação induzida por limites é utilizando as seguintes relações de sensibilidade [1]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial V_i} > 0 \quad \text{e} \quad \frac{\partial \rho}{\partial Q_{g_i}} > 0 \quad (2.10)$$

As relações de sensibilidade acima indicam que se um aumento em Q_g resulta em um aumento em ρ e se um aumento em V também resulta em um aumento em ρ , o ponto de intercâmbio de restrições é um ponto de bifurcação estática induzida por limites [1].

As referências [22] [17] [14] [1] [24] e [18] mostram detalhes sobre os principais aspectos relacionados às bifurcações sela nó e induzidas por limites.

2.5 Conclusões

A estabilidade de tensão é a capacidade do sistema em manter um nível de tensão aceitável, tanto para condições normais de operação, quanto em caso de contingência, conforme mencionado anteriormente. A disponibilidade de geração de potência reativa da rede está diretamente associada a esta capacidade. Grande parte das interrupções originadas de problemas de estabilidade de tensão ocorre devido à exaustão repentina das fontes de potência reativa, originando um ponto de bifurcação induzida por limites.

Este capítulo apresentou a base teórica do estudo realizado, introduzindo o problema e dando o embasamento necessário para os próximos capítulos deste trabalho. Foram descritos os principais conceitos relacionados ao problema de estabilidade de tensão, como as definições de estabilidade e colapso de tensão, além de mostrar os conceitos relativos às curvas PV e QV, os quais são muito utilizados neste trabalho. Uma breve revisão bibliográfica abordando, principalmente, os métodos encontrados na literatura também foi apresentada.

Na seção que trata da teoria da Bifurcação, foram apresentadas as características gerais dos pontos de bifurcação, os conceitos teóricos e matemáticos, e as condições de transversalidade para cada tipo de bifurcação (Sela-Nó e Induzida por Limites), as quais são condições que garantem que dois pontos de equilíbrio se aproximam um do outro quando o parâmetro da carga tende ao valor crítico, se mesclam no ponto crítico e desaparecem com a continuação da mudança deste

parâmetro, além de dois índices utilizados para fazer a classificação do tipo do ponto de bifurcação encontrado.

No próximo capítulo serão apresentados os métodos propostos para encontrar o ponto de máximo carregamento do sistema e para identificação dos pontos críticos de geração de potência reativa, assim como mais um índice, o qual é baseado nas relações de sensibilidade da geração de potência reativa em relação à magnitude da tensão na barra, e é utilizado para identificar se o atingimento dos limites de geração de potência reativa irá resultar em uma deterioração da estabilidade ou em um colapso de tensão.

3 IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS CRÍTICOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para estimar o fator de máximo carregamento e para identificação dos pontos críticos de geração de potência reativa. Inicialmente apresenta-se o embasamento teórico, e nas seções posteriores mostra-se a formulação analítica utilizada e os métodos computacionais utilizados no presente trabalho. Um exemplo com um sistema de 5 barras ilustra os aspectos teóricos abordados.

3.1 Considerações Iniciais

Quando os limites de geração de potência reativa das unidades geradoras são alcançados, a rede elétrica se torna mais vulnerável. Por esta razão, é importante dispor um método para determinar de forma direta estes pontos onde os limites de geração de potência reativa são encontrados [13]. Assim, a identificação das barras críticas do sistema, nas etapas de planejamento ou até mesmo durante a operação, é essencial para o controle da malha potência reativa-magnitude da tensão. Estas barras são candidatas naturais as medidas preventivas com relação ao colapso de tensão.

O nível de estabilidade de tensão de um sistema de potência sofre uma deterioração quando um limite de potência reativa é atingido. Entretanto, na maioria dos casos, a estabilidade é mantida quando uma unidade atinge seu limite [4]. Porém, se a carga da rede está muito elevada, quando um gerador atinge seu limite de geração de potência reativa o ponto de equilíbrio pode estar situado no ramo inferior da curva PV. Assim, o sistema se torna imediatamente instável devido a qualquer pequena perturbação. A referência [11] demonstrou através de sistemas-teste que quando o sistema está operando sob carregamentos menores, como em períodos de carga leve, quando um limite de potência reativa é encontrado, pode haver uma modificação na trajetória das variáveis do sistema, porém, geralmente, a estabilidade de tensão é mantida. No entanto, para carregamentos mais elevados, como por exemplo, nos períodos de carga pesada, quando este limite é atingido o sistema pode se tornar instável imediatamente, implicando que a trajetória de algumas variáveis de estado se situará na parte inferior da curva PV. Neste contexto, a barra mais *fraca* da rede é a mais próxima do colapso de tensão. Ou seja, de acordo com a curva PV, a barra *fraca*

é a mais próxima do *nariz* da referida curva [3]. Assim, pode-se definir esta barra como aquela que possui uma elevada taxa de variação na magnitude da tensão quando há uma variação na carga $\left(\frac{\partial V_i}{\partial P}\right)$. Esta variação no carregamento (P) pode se referir à variação da demanda da própria barra (P_i) ou do sistema de potência como um todo [3].

Se o limite de geração de potência reativa de uma unidade geradora é atingido, as equações de estado do sistema de potência podem ser modificadas de forma a ajustar a geração de potência reativa para este limite, [4]. Em termos de modelagem do problema de fluxo de potência, o tipo da barra do gerador é alterado de PV para PQ e, portanto, uma nova equação de balanço de potência é adicionada ao sistema. Conforme mencionado anteriormente, esta mudança de modelagem analítica é denominada de intercâmbio de restrições QV, a qual é a intersecção de duas componentes da curva PV, um gerador no modo PV e outro no modo PQ [1], conforme será explicado na seção apresentada a seguir.

O artigo [4] propõe um índice que indica se a mudança de um sistema ilimitado para um sistema limitado de geração de potência reativa irá resultar em uma deterioração da estabilidade apenas ou se irá degenerar em um colapso de tensão imediato. Segundo [4], a principal aplicação do índice proposto é a detecção da instabilidade de tensão imediata devido à saturação dos limites de potência reativa na convergência do fluxo de potência continuado aplicado ao cálculo da margem de carregamento. Este índice utiliza uma análise de sensibilidade da geração de potência reativa em relação a tensão da unidade geradora.

As referências [3] [14] [26] e [13] abordam a identificação dos pontos críticos. Em [3], a identificação das barras *fracas* é feita através de relações de sensibilidade entre a tensão da barra e a variação do carregamento da rede elétrica. Nos estudos realizados em [14] e [13] são utilizados algoritmos baseados num esquema de predição-correção, semelhantes ao do Método da Continuação. O artigo [14] propõe um algoritmo preditor-corretor, identificando os pontos de intercâmbio de restrições QV, e combinando o Método do Ponto de Colapso de Tensão para calcular o ponto de bifurcação sela-nó. Em [18] o foco do algoritmo preditor-corretor proposto é o traçado da parte superior da curva PV com o auxílio dos métodos desacoplados.

No algoritmo proposto em [13], o preditor se baseia nas relações de sensibilidade e fornece valores aproximados dos pontos de intercâmbio de restrições e de colapso de tensão sem necessitar rodar um programa

de fluxo de potência. Entretanto, devido a esta técnica ser baseada na linearização, a precisão da metodologia é muito dependente de quão próximo o ponto inicial está do ponto de interesse. A etapa de correção utiliza a informação de que a potência reativa e a tensão são fixadas, a primeira no seu valor limite, enquanto a segunda é fixada no seu valor de referência.

O artigo [26], faz o cálculo do ponto de colapso de tensão baseado na aproximação quadrática das curvas PV, modelagem que é estudada neste texto e apresentada em seção posterior deste capítulo.

3.2 Formulação Analítica

Um parâmetro de carga, neste texto denotado ρ , deve ser inserido nas equações de fluxo de potência, de forma a se obter as equações parametrizadas. Este parâmetro é um escalar que indica o crescimento da demanda e pode ser utilizado para o traçado da curva PV [2]. Assim, o parâmetro de carga é tal que [3],

$$0 \leq \rho \leq \rho^* \quad (3.1)$$

onde $\rho = 0$ corresponde à carga base e $\rho = \rho^*$ corresponde à demanda crítica. Dessa forma, o cenário de carregamento/geração de uma carga base para uma carga crítica é definida como segue [2]:

$$Y(\rho) = Y_0 + \rho Y_D \quad (3.2)$$

onde Y_0 é o valor especificado da carga base e

$$Y_D = [\Delta P_G \quad \Delta P_L \quad \Delta Q_L]^t$$

sendo ΔP_G , ΔP_L e ΔQ_L , respectivamente, as taxas de variação da geração de potência ativa, e das potências ativa e reativa da carga.

Substituindo a equação (3.2) pela equação do fluxo de potência obtém-se:

$$g(x, \rho) = Y(x) - Y_0 - \rho Y_D \quad (3.3)$$

Assim a formulação do fluxo de potência é dada por (3.4), as

quais estão expressas em coordenadas retangulares [28]:

$$\begin{aligned}
 P_{G_i} - (P_{D_i}^0 + \rho \Delta P_{D_i}) - P_i(e, f) &= 0 \\
 Q_{G_i} - (Q_{D_i}^0 + \rho \Delta Q_{D_i}) - Q_i(e, f) &= 0 \\
 V_i^{esp^2} - e_i^2 - f_i^2 &= 0 \\
 Q_{G_i}^{\min} \leq Q_{G_i} \leq Q_{G_i}^{Max}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

onde e e f são as componentes real e imaginária, respectivamente, da tensão complexa expressa em coordenadas retangulares, P_{G_i} e Q_{G_i} correspondem às potências ativa e reativa, respectivamente, geradas na barra i , $P_{D_i}^0$ é a demanda de potência ativa e $Q_{D_i}^0$ é a demanda de potência reativa, ambas para o caso base, ΔP_{D_i} e ΔQ_{D_i} são as taxas de variação das demandas de potência ativa e reativa, respectivamente, $P_i(e, f)$ é a injeção nodal de potência ativa e $Q_i(e, f)$ é a injeção nodal de potência reativa, ambas expressas em função das componentes real e imaginária da tensão complexa, e ρ é o parâmetro de carga. A primeira equação do conjunto descrito acima é dada para barras PV e PQ, a segunda equação para barras PQ e a terceira e a quarta equações estão relacionadas às barras PV do sistema de potência.

O conjunto de equações (3.4) pode ser escrito na forma compacta como mostrado em (3.5):

$$\begin{aligned}
 g(x, \rho) &= y_0 + \rho r - g_0(x) = 0 \\
 h(x, \rho) &= y_{q0} + \rho r_{q0} - h_0(x) \leq h^{\lim}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

onde os vetores y_0 e y_{q0} estão relacionados às injeções de potência do caso base e r e r_{q0} são relativos às taxas de variação de carga, $g_0(x)$ e $h_0(x)$ representam as injeções de potência e a magnitude da tensão expressa em função das partes real e imaginária da tensão. O termo *lim* indica o limite de geração de potência reativa. Quando as equações do fluxo de potência estão expressas em coordenadas retangulares, as injeções nodais de potência são dadas pela equação (3.6) mostrada a seguir:

$$\begin{aligned}
 g_0(x) &= \frac{1}{2} x^t T_0 x \\
 h_0(x) &= \frac{1}{2} x^t T_1 x
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

onde T_0 e T_1 são arranjos tridimensionais, os quais são definidos no Apêndice A.

A expansão de segunda ordem em série de Taylor das equações (3.5), no ponto (x_e, ρ_e) , na direção $(\Delta x, \Delta \rho)$ é dada por:

$$\begin{aligned}
 g(x_e + \Delta x, \rho_e + \Delta \rho) &= g(x_e, \rho_e) - J(x_e) \Delta x + r \Delta \rho - g_0(\Delta x) \\
 h(x_e + \Delta x, \rho_e + \Delta \rho) &= h(x_e, \rho_e) - H_0(x_e) \Delta x + r_{q0} \Delta \rho - h_0(\Delta x)
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

onde $J(x) = T_0x$ e $H_0 = T_1x$ são as matrizes Jacobianas das equações $g_0(x)$ e $h_0(x)$, com relação às variáveis x , $g_0(\Delta x)$ e $h_0(\Delta x)$ são mostradas pela equação (3.8).

$$\begin{aligned} g_0(\Delta x) &= \frac{1}{2}\Delta x^t T_0 \Delta x \\ h_0(\Delta x) &= \frac{1}{2}\Delta x^t T_1 \Delta x \end{aligned} \quad (3.8)$$

O lado direito das equações em (3.7) pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned} g(x_e + \Delta x, \rho_e + \Delta \rho) &= g(x_e, \rho_e) + \Delta g(\Delta x, \Delta \rho) \\ h(x_e + \Delta x, \rho_e + \Delta \rho) &= h(x_e, \rho_e) + \Delta h(\Delta x, \Delta \rho) \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde $\Delta g(\Delta x, \Delta \rho)$ e $\Delta h(\Delta x, \Delta \rho)$ são dados por (3.10) e representam a variação das funções $g(x, \rho)$ e $h(x, \rho)$ em função do incremento $(\Delta x, \Delta \rho)$.

$$\begin{aligned} \Delta g(\Delta x, \Delta \rho) &= r\Delta \rho - J(x_e)\Delta x - g_0(\Delta x) \\ \Delta h(\Delta x, \Delta \rho) &= r_{q_0}\Delta \rho - H_0(x_e)\Delta x - h_0(\Delta x) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Pode-se observar que a expansão em série de Taylor, dada pela equação (3.7), não possui termos de terceira ordem ou superiores a este e, portanto, a variação estimada $\Delta g(\Delta x, \Delta \rho)$ é mais precisa.

A modelagem das equações do fluxo de potência em coordenadas retangulares permite estimar de forma mais precisa as injeções de potência reativa originadas das variações da tensão complexa durante o processo iterativo [28]. Quando a tensão complexa é modelada na forma retangular, pode-se escrever as equações das injeções de potência na forma quadrática, o que permite controlar a magnitude dos incrementos durante o processo iterativo, evitando a divergência e monitorando os limites de geração. Além disso, pode-se utilizar os resultados intermediários obtidos do fluxo de potência para se fazer um redespacho de potência ativa, permitindo aumentar a margem de carregamento do sistema.

3.3 Pontos de Intercâmbio de Restrições QV

A intersecção de duas componentes da curva PV, obtida com auxílio da modelagem de uma barra de geração nos modos PV e PQ, é denominada de *ponto de intercâmbio de restrições QV*. Quando este intercâmbio ocorre, no período em que o ponto de operação se move na direção de aumento do carregamento, a tensão terminal do gerador em questão subsequentemente é reduzida em relação ao valor da tensão

de referência. Portanto, o intercâmbio de restrições, geralmente, piora a estabilidade de tensão, o que é indicado pela inclinação da tangente a curva PV [1]. Dependendo das condições do sistema, a demanda máxima pode ser atingida como resultado de um intercâmbio de restrições QV. Neste caso, o limite de carregamento do sistema corresponde a um ponto de bifurcação estática induzida por limites.

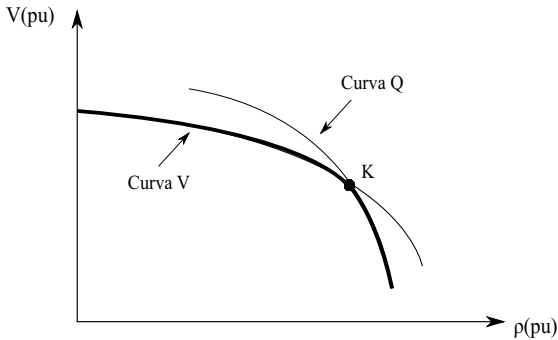


Figura 3.1 – Ponto de Intercâmbio de Restrições QV

A Figura 3.1 apresenta a curva PV considerando as restrições de geração de potência reativa dos geradores. O intercâmbio de restrições QV ocorre no ponto K , o qual é a intersecção referida anteriormente. Se o sinal do gradiente da tensão da barra de geração com relação a demanda do sistema $\left(\frac{\partial V_i}{\partial P}\right)$, for alterado quando um limite de potência reativa é atingido, então a tensão da barra está em um ramo instável da curva PV [4]. A instabilidade imediata devido à mudança de um sistema ilimitado para um sistema limitado, ocorre somente quando a sensibilidade da geração de potência reativa com relação a tensão da barra do gerador limitado é menor do que zero [4].

O ponto onde ocorre o intercâmbio de restrições é simultaneamente sujeito às condições impostas pela formulação analítica das equações correspondentes a barra de geração (PV e PQ). A referência [1] define esta condição como condição PQV, visto que este ponto é obtido especificando-se os valores das potências ativa (P) e reativa (Q), além da tensão (V) do gerador.

As seções posteriores apresentam a modelagem proposta neste trabalho para encontrar o ponto de carregamento máximo do sistema sob análise, além da identificação dos pontos críticos de potência reativa da rede elétrica.

3.3.1 Relações de Sensibilidade no Ponto Crítico

Além das condições de transversalidade, apresentadas no capítulo anterior, alguns índices específicos podem ser utilizados para classificar os pontos de bifurcação, assim como aqueles mostrados pelas equações (2.9) e (2.10) no Capítulo 2. A referência [4], propõe o uso de relações de sensibilidade para fazer a classificação do ponto de intercâmbio de restrições QV, tanto sob o aspecto de estabilidade de tensão como sobre o tipo de bifurcação induzida por limites. Para esta finalidade, considera-se as equações que modelam a rede elétrica com a inclusão da tensão da barra do gerador, denominada z (equação (3.11)). Cabe ressaltar que para a condição normal de operação, o valor desta variável é mantido fixo e a potência reativa está livre para variar. No momento em que o limite de potência reativa do gerador em questão é atingido, ambas estão no limite. Após este ponto, a geração de potência reativa da barra é fixada no valor limite e a tensão da barra varia. Este processo é modelado, portanto, por:

$$\begin{aligned} g(x, z_i, \rho) &= 0 \\ (1 - \mu)(z_i - z_i^r) + \mu [h_i(\mathbf{x}, z_i, \rho) - h_i^{lim}] &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

onde $g(x, z_i, \rho) = 0$ representa as equações não lineares parametrizadas do fluxo de potência, conforme a equação (3.4). As variáveis z_i e z_i^r referem-se a tensão da barra da unidade geradora, onde a primeira representa a magnitude da tensão corrente (V_{g_i}) e a segunda é o valor de referência na barra cujo limite foi atingido ($V_{g_i}^r$); e $h_i(x, z_i, \rho)$ e h_i^{lim} representam a geração corrente (Q_{g_i}) de potência reativa e o correspondente limite atingido ($Q_{g_i}^{lim}$). O escalar μ é um parâmetro cujos valores variam entre 0 e 1 e indicam a restrição correntemente ativa. Portanto, observa-se através da equação (3.11), que quando μ é igual a 0, tem-se somente a tensão no seu valor de referência. De outra forma, se μ igual a 1, somente a potência reativa está fixa, ou seja, o limite de geração de potência reativa desta barra foi atingido e seu valor fixado neste valor limite. Valores intermediários de μ representam a mudança gradual do sistema ilimitado para o sistema limitado [4], e através desse processo se pode fazer uma avaliação da estabilidade de tensão do sistema.

A variação incremental na equação (3.11) resultante da expansão de primeira ordem em série de Taylor, no ponto (x_e, z_i^r, ρ_e) , na direção

$(\Delta x, \Delta z_i, \Delta \rho)$ é dada por:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) \Delta z_i + \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) \Delta \rho = 0 \\ \left[(1 - \mu) \left(\frac{\partial z_i}{\partial x} \right) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right) \right]^t \Delta x + & \left[(1 - \mu) \left(\frac{\partial z_i}{\partial z_i} \right) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) \right] \Delta z_i \\ & + \left[(1 - \mu) \left(\frac{\partial z_i}{\partial \rho} \right) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) \right] \Delta \rho = 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

onde por simplificação os argumentos foram omitidos, e $\frac{\partial g}{\partial x}$, $\frac{\partial g}{\partial z_i}$ e $\frac{\partial g}{\partial \rho}$ são as matrizes Jacobianas das equações $g(x, z_i, \rho)$ com relação as variáveis x , z_i e ρ , calculadas no ponto (x_e, z_i^t, ρ_e) .

Da primeira equação (3.12),

$$\Delta x = - \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) \Delta z_i + \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) \Delta \rho \right] \quad (3.13)$$

Desde que $\frac{\partial z_i}{\partial x} = \frac{\partial z_i}{\partial \rho} = 0$ e $\frac{\partial z_i}{\partial z_i} = 1$, a segunda equação (3.12) pode ser re-escrita como:

$$\mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \Delta x + \left[(1 - \mu) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) \right] \Delta z_i + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) \Delta \rho = 0 \quad (3.14)$$

A substituição da equação (3.13) na equação (3.14) fornece:

$$\begin{aligned} & -\mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left[\left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) \Delta z_i + \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) \Delta \rho \right] \\ & + \left[(1 - \mu) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) \right] \Delta z_i + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) \Delta \rho = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

tal que dividindo-se todos os termos da equação (3.15) por $\Delta \rho$ e re agrupando-se a expressão resultante obtém-se:

$$\begin{aligned} & \left\{ -\mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) + \left[(1 - \mu) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) \right] \right\} \frac{\Delta z_i}{\Delta \rho} \\ & - \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

De onde se conclui que:

$$\frac{\Delta z_i}{\Delta \rho} = \frac{\mu \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) \right]}{(1 - \mu) + \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) - \mu \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right)} \quad (3.17)$$

ou alternativamente,

$$\frac{\Delta z_i}{\Delta \rho} = \frac{\mu \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial \rho} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial \rho} \right) \right]}{1 + \mu \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) - 1 \right]} \quad (3.18)$$

A equação (3.18) representa a sensibilidade da variável z_i com relação ao parâmetro da carga ρ , a qual no ponto de carregamento crítico tende a infinito. Analiticamente isto é representado pela equação $\frac{\Delta z_i}{\Delta \rho} \rightarrow \infty$, o que implica em:

$$1 + \mu_{crit} \left[\left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) - 1 \right] = 0 \quad (3.19)$$

e portanto,

$$\mu_{crit} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right)} \quad (3.20)$$

De acordo com a definição das componentes da equação (3.20) em termos das variáveis e funções do sistema de potência, a segunda parcela do denominador representa a relação de sensibilidade da geração de potência reativa na barra i com relação a magnitude da tensão na barra i , isto é,

$$\frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta V_{g_i}} = \left(\frac{\partial h_i}{\partial z_i} \right) - \left(\frac{\partial h_i}{\partial x} \right)^t \left(\frac{\partial g}{\partial x} \right)^{-1} \left(\frac{\partial g}{\partial z_i} \right) \quad (3.21)$$

E portanto,

$$\mu_{crit} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta V_{g_i}} \right)} \quad (3.22)$$

Assim, a análise da equação (3.22) mostra que [4]:

- se $1 > \frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta V_{g_i}} > 0$, então $\mu_{crit} > 1$:

A barra PV é convertida em barra PQ (o parâmetro μ varia de 0 a 1) sem passar por um ponto crítico, no qual $\frac{\Delta V_{g_i}}{\Delta \rho} \rightarrow \infty$. Isto indica que o ponto de intercâmbio de restrições é estável. Portanto,

- se $\frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta V_{g_i}} > 1$, então $\mu_{crit} < 0$:

Assim como no caso anterior, a barra PV é convertida em barra PQ sem passar por um ponto crítico, o que indica que o ponto de intercâmbio de restrições é estável. Porém,

- se $\frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta V_{g_i}} < 0$, então $0 < \mu_{crit} < 1$:

A conversão de barra PV em barra PQ (a variação do parâmetro μ de 0 a 1) não ocorre sem a passagem por um ponto crítico, o que indica que o ponto de intercâmbio de restrições é instável.

3.4 Estimativa do Ponto de Máximo Carregamento

A modelagem proposta para obtenção da estimativa do ponto de máximo carregamento é semelhante aquela apresentada na referência [26]. Utiliza-se uma aproximação quadrática para o traçado da curva PV. Dessa forma, não é necessário determinar uma sequência de soluções do fluxo de potência. Assim, considera-se que a relação entre a magnitude da tensão e o parâmetro da carga, para cada barra i , é representada por uma função quadrática, conforme equação (3.23):

$$\rho = a_i V_i^2 + b_i V_i + c_i \quad (3.23)$$

A utilização da equação apresentada acima é justificada pela curva PV mostrada na Figura (2.1) do capítulo 2.

3.4.1 Determinação dos Coeficientes a_i , b_i e c_i

O cálculo dos coeficientes a_i , b_i e c_i é feito utilizando-se uma solução do fluxo de potência já disponível. A referência [26] cita como opção o uso do resultado do fluxo de potência obtido com os últimos valores de carga/geração programados em tempo real, visto que os autores propõem esta metodologia para o uso em tempo real.

A primeira derivada com relação a magnitude da tensão e ao fator de carga são, respectivamente:

$$\frac{d\rho}{dV_i} = 2a_i V_i + b_i \quad (3.24)$$

$$1 = 2a_i V_i \frac{dV_i}{d\rho} + b_i \frac{dV_i}{d\rho} \quad (3.25)$$

Resultando em,

$$\frac{dV_i}{d\rho} = \frac{1}{2a_i V_i + b_i} \quad (3.26)$$

Derivando-se novamente os dois lados da equação (3.26) obtém-se:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_i}{d\rho^2} &= \frac{d}{d\rho} \left(\frac{dV_i}{d\rho} \right) = \frac{\partial \left(\frac{dV_i}{d\rho} \right)}{\partial V_i} \cdot \frac{dV_i}{d\rho} + \frac{\partial \left(\frac{dV_i}{d\rho} \right)}{\partial \rho} \\ &= -\frac{2a_i}{(2a_i V_i + b_i)^2} \cdot \frac{dV_i}{d\rho} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Portanto, a derivada de segunda ordem da magnitude da tensão com relação ao fator de carga é dada por:

$$\frac{d^2 V_i}{d\rho^2} = -2a_i \left(\frac{dV_i}{d\rho} \right)^3 \quad (3.28)$$

Através da combinação das equações (3.23), (3.26) e (3.28), os coeficientes a_i , b_i e c_i são dados por:

$$a_i = -\frac{\left(\frac{d^2 V_i}{d\rho^2} \right)}{2 \left(\frac{dV_i}{d\rho} \right)^3} \quad b_i = \frac{1}{\left(\frac{dV_i}{d\rho} \right)} - 2a_i V_i^0 \quad c_i = \rho - a_i V_i^{0^2} - b_i V_i^0 \quad (3.29)$$

onde V_i^0 representa a magnitude da tensão na barra i correspondente a solução do fluxo de potência disponível, conforme mencionado anteriormente.

No ponto de carregamento crítico, uma pequena variação no fator de carregamento resulta em variações consideravelmente grandes na magnitude da tensão. Ou seja,

$$-\frac{dV_i}{d\rho} \rightarrow \infty \quad (3.30)$$

ou alternativamente,

$$\frac{d\rho}{dV_i} \rightarrow 0 \quad (3.31)$$

Considerando-se as relações apresentadas acima, é possível estimar o valor da magnitude da tensão no ponto crítico, conforme mostra a equação (3.32),

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dV_i^{cr}} &= 2a_i V_i^{cr} + b_i \\ 0 &= 2a_i V_i^{cr} + b_i \end{aligned} \quad (3.32)$$

$$V_i^{cr} = -\frac{b_i}{2a_i}$$

O fator de carregamento correspondente pode ser obtido através da equação (3.23), calculada com o valor crítico da tensão em cada barra. A barra associada com o menor fator de carregamento é a barra mais crítica com relação à estabilidade de tensão, ou seja, a mais propícia ao colapso de tensão entre todas as barras do sistema de potência [26]. Portanto, as barras podem ser classificadas de acordo com o seu correspondente fator de carregamento. Assume-se que o fator de carregamento crítico de todo o sistema é o fator de carregamento da barra mais crítica.

3.4.2 Cálculo das Derivadas de Segunda Ordem

Para encontrar os coeficientes a_i , b_i e c_i é necessário o cálculo das derivadas contidas na equação (3.29). Para este fim, supõe-se que se tem disponível uma solução do fluxo de potência x , para um correspondente nível de carregamento ρ_e , ou seja,

$$g(x_e, \rho_e) = 0 \quad (3.33)$$

Segundo a equação 3.5:

$$y_0 + \rho_e r = g_0(x) \quad (3.34)$$

Tal que, derivando-se os dois lados da equação, mostrada acima, com relação a ρ , é obtida a seguinte relação:

$$r = \left(\frac{\partial g_0(x)}{\partial x} \right) \cdot \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) \quad (3.35)$$

onde $\left(\frac{\partial g_0(x)}{\partial x} \right) = J(x)$, a qual é matriz Jacobiana das equações do fluxo de potência e $\left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)$ é o vetor tangente de predição. Assim, a sensibilidade de primeira ordem, da magnitude da tensão com relação ao parâmetro de carga, é obtida resolvendo-se o seguinte sistema linear:

$$J(x) \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) = r \quad (3.36)$$

Derivando-se os dois lados da equação (3.36) com relação a ρ , obtém-se a relação de sensibilidade de segunda ordem, denotada por $\left(\frac{\partial^2 x}{\partial \rho^2} \right)$, conforme (3.37):

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(x)}{\partial \rho} \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) + J(x) \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) &= 0 \\ \left[\frac{\partial J(x)}{\partial x} \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) \right] \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) + J(x) \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \rho^2} \right) &= 0 \\ \left[\frac{\partial^2 g_0(x)}{\partial x^2} \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) \right] \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) + J(x) \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \rho^2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3.37)$$

onde $\frac{\partial^2 g_0(x)}{\partial x^2}$ é o arranjo tridimensional mencionado anteriormente, e dessa forma:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)^t T_0 \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) + J(x) \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \rho^2} \right) = 0 \quad (3.38)$$

Considerando a equação (3.6), chega-se à:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)^t T_0 \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) = 2g_0 \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) \quad (3.39)$$

Portanto, a segunda derivada da magnitude da tensão em relação ao parâmetro de carga é obtida resolvendo-se o seguinte sistema linear:

$$J(x) \left(\frac{\partial^2 x}{\partial \rho^2} \right) = -2g_0 \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right) \quad (3.40)$$

Cabe lembrar que as relações de sensibilidade mencionadas anteriormente são expressas em coordenadas retangulares. Então, para utilizar efetivamente estes componentes é necessário convertê-los em variações da magnitude da tensão nas barras. Para tal finalidade, a equação (3.41), mostrada a seguir, é utilizada.

$$\Delta V_i = \frac{e_i^* \Delta e_i + f_i^* \Delta f_i}{V_i^*} \quad (3.41)$$

onde V_i^* , e_i^* e f_i^* representam a magnitude da tensão nodal e suas partes real e imaginária, respectivamente, no ponto crítico, sendo ΔV_i , Δe_i e Δf_i os incrementos correspondentes.

3.4.3 Algoritmo

O algoritmo utilizado para estimar o fator de carregamento crítico pode ser sumarizado nos seguintes passos:

1. Determinar a solução do fluxo de potência para o caso base;
2. Calcular $\left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)$ resolvendo o sistema linear da equação (3.36);
3. Determinar o vetor $b = -2g_0 \left(\frac{\partial x}{\partial \rho} \right)$ e resolver o sistema linear da equação (3.40);
4. Calcular os coeficientes a_i , b_i e c_i utilizando a equação (3.29);
5. Calcular a magnitude de tensão crítica e o fator de carregamento crítico correspondente de cada barra utilizando as equações (3.32) e (3.23). O mínimo valor do fator de carregamento corresponde ao nível de máxima demanda de potência.

Este procedimento conduz a um valor aproximado do fator de carregamento crítico, sendo, portanto, necessário repetir o procedimento se mais precisão for exigida. Dessa forma, um processo iterativo é requerido. Repete-se o procedimento acima, a partir de cada valor

estimado do fator de carregamento, fazendo-se o fator de carregamento igual ao fator de carregamento crítico (ρ_{cr}) da barra mais crítica da iteração anterior. O processo é finalizado quando a diferença entre dois valores consecutivos seja muito pequena, ou seja, esteja dentro de uma tolerância pré definida. Observa-se através deste processo iterativo, que este procedimento é semelhante àquele adotado no Método da Continuação, porém, na abordagem utilizada se faz uso de informações das derivadas de segunda ordem durante os cálculos requeridos.

3.5 Identificação dos Pontos Críticos

A abordagem proposta neste estudo, para identificação dos pontos críticos de geração de potência reativa, é um esquema predictor-corrector. O objetivo, portanto, é determinar o menor aumento de carga que leva uma barra PV a atingir o limite de potência reativa gerada, mantendo a tensão de referência do caso base. A descrição detalhada da metodologia utilizada é apresentada nas próximas seções deste capítulo.

3.5.1 Estágio de Predição

Uma solução (x_e, ρ_e) da equação (3.5) é suposta estar disponível. As variações Δx são estimadas com base na expansão em série de Taylor dada pela equação (3.7), resolvendo-se dois sistemas lineares. Estes dois sistemas possuem a mesma matriz de coeficientes, e o primeiro a ser resolvido é baseado na aproximação linear de $g(x_e, \rho_e) = 0$, o qual é dado pela equação (3.42), enquanto que o segundo sistema linear utiliza o termo de segunda ordem da equação (3.7), o qual é mostrado na equação (3.43). Neste estágio são resolvidos os dois sistemas lineares mencionados para aumentar a precisão, visto que, conforme mencionado na seção 3.3, na formulação em coordenadas retangulares, a expansão em série de Taylor dada pela equação (3.7) não possui termos superiores ao de segunda ordem, sendo, portanto, exato o processo.

$$J(x_e) \Delta x_1 - r \Delta \rho = 0 \quad (3.42)$$

onde o vetor Δx_1 é calculado em função de uma variação pré determinada do parâmetro de carga $\Delta \rho$. O segundo sistema linear é, então, expresso por:

$$J(x_e) \Delta x_2 = -g_0(\Delta x_1) \quad (3.43)$$

A solução predita da equação (3.5) na direção $(\Delta x, \Delta \rho)$ é apresentada na equação (3.44):

$$\begin{bmatrix} x^p \\ \rho^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e \\ \rho_e \end{bmatrix} + \alpha^* \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \rho \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

onde $\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2$ e α^* é o fator de passo utilizado para controlar os incrementos nas variáveis do fluxo de potência e no parâmetro da carga.

3.5.2 Cálculo do Fator de Passo

A determinação do fator de passo é um problema comum nas metodologias que utilizam estágios de predição e correção, visto que a escolha deste fator pode melhorar ou piorar o desempenho computacional do método utilizado. O fator de passo é utilizado para ajustar o vetor predito. Quando estes fatores são muito pequenos exigem um tempo computacional elevado, enquanto que quando se tem valores elevados para α a convergência do processo iterativo se torna mais difícil. A referência [8] aborda este tema, visto que esta dissertação faz o estudo de uma técnica de controle do tamanho do passo para o método da Continuação aplicado na detecção do ponto de máximo carregamento.

O cálculo do fator de passo, para a metodologia proposta, deve considerar que é desejável que apenas a barra mais crítica alcance o limite de geração de reativo, em cada etapa de correção. Conforme já mencionado, na barra onde o limite de geração de potência reativa foi atingido, a potência reativa está fixa no seu valor máximo ou mínimo, ou seja, está especificada, e a tensão está fixa no seu valor de referência (caso base). Portanto, a solução obtida na etapa de correção deve satisfazer estas condições de potência reativa especificada no seu limite e a tensão no valor de referência, além de satisfazer o conjunto de restrições de desigualdade nos demais dispositivos de geração de potência reativa. Conforme equação (3.7), a expansão de segunda ordem em série de Taylor das equações (3.5), no ponto (x_e, ρ_e) , na direção $(\Delta x, \Delta \rho)$ é dada por:

$$h(x_e + \alpha \Delta x, \rho_e + \alpha \Delta \rho) = h(x_e, \rho_e) - \alpha H(x_e) \Delta x + \alpha r_{q_0} \Delta \rho - \alpha^2 h_0(\Delta x) \quad (3.45)$$

onde α é o escalar utilizado como fator de passo. Combinando-se as equações (3.5) e (3.45) obtém-se:

$$a_q + \alpha b_q + \alpha^2 c_q \leq 0 \quad (3.46)$$

onde,

$$\begin{aligned} a_q &= h(x_e, \rho_e) - h^{\text{lim}} \\ b_q &= -H(x_e) \Delta x + r_{q_0} \Delta \rho \\ c_q &= h_0(\Delta x) \end{aligned} \quad (3.47)$$

Para cada dispositivo de geração de potência reativa, existe a equação (3.48) abaixo, a qual é uma componente da equação (3.46).

$$a_{q_i} + \alpha b_{q_i} + \alpha^2 c_{q_i} \leq 0 \quad (3.48)$$

O fator de passo adotado e, portanto, utilizado na atualização das variáveis, conforme equação (3.44), é a menor raiz não negativa encontrada através da solução de (3.46), a qual é denotada α^* . Dessa forma, assegura-se que apenas a barra mais *fraca* atinge seu limite de geração de potência reativa em cada etapa de correção. Quando este ponto é atingido, o valor da potência reativa da barra em questão é fixado no valor limite no decorrer do processo iterativo, ou seja, $Q_{G_i} = Q_{G_i}^{\text{lim}}$, evitando-se que este limite seja violado na ocorrência de uma variação de carga.

3.5.3 Estágio de Correção

Nesta etapa é obtida a solução exata da equação (3.5). Sabe-se que para valores mais baixos do parâmetro de carga a tensão é restrita, enquanto para valores superiores deste parâmetro a potência reativa é restrita [13]. Porém, no ponto limite, a tensão está no seu valor de referência e a potência reativa está no seu valor limite, este fato é, então, utilizado nesta etapa. Assim, o objetivo é determinar uma solução do fluxo de potência na qual tanto a potência reativa quanto a tensão estejam em um valor especificado em uma barra PV da rede, e, portanto, é necessário incluir uma equação extra no sistema de equações não lineares a ser resolvido. As equações que definem o ponto limite são:

$$\begin{aligned} g(x, \rho) &= 0 \\ h_i(x, \rho) - h_i^{\text{lim}} &= 0 \end{aligned} \quad (3.49)$$

Ou seja, as equações do fluxo de potência original adicionada da equação de restrição de potência reativa na barra em questão. Onde $h_i(x, \rho)$ e h_i^{lim} representam a injeção e o limite de potência reativa em uma determinada barra i , respectivamente, conforme definido na seção 3.3. A barra i é uma barra que teve seu limite alcançado como consequência do fator de passo (α^*), o qual foi descrito na seção an-

terior. Cabe mencionar que a solução predita é utilizada nesta etapa como estimativa inicial, visto que isto facilita o processo iterativo.

3.6 Algoritmo

Conforme exposto nas seções 3.2, 3.3 e 3.4, o procedimento utilizado para aplicação da metodologia proposta, para identificação dos pontos críticos de geração de potência reativa, pode ser sumarizado nos seguintes passos:

1. Determinar a solução do fluxo de potência para o caso base;
2. Incrementar fator de carga;
3. Estimar a solução predita através da solução dos sistemas lineares das equações (3.42) e (3.43);
4. Calcular o mínimo fator de passo para o qual uma barra PV atinge seu limite, conforme seção 3.4.2. Para este cálculo utiliza-se a equação (3.46);
5. Obter a solução corrigida conforme seção 3.5.3. Se o fluxo de potência não é convergente, então o nível de carga considerado não corresponde a um ponto de intercâmbio de restrições QV. Neste caso, apenas a geração de potência reativa é fixada para a determinação da solução do fluxo de potência e, então, o processo iterativo é encerrado;
6. Classificar o ponto de bifurcação induzida por limites utilizando as equações (2.9), (2.10) e (3.22) e retornar ao segundo passo deste processo iterativo.

3.7 Exemplo

Para ilustrar o procedimento proposto, utilizou-se um sistema teste de 5 barras, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 3.2.

Os dados deste sistema teste são apresentados a seguir:

- Reatância série das LT's é 0,1 pu;
- Magnitude da tensão terminal dos geradores é 1,2 pu;
- Taxa de variação da carga da barra 4 é 0,5 pu(MW) e 0,15 pu(Mvar);

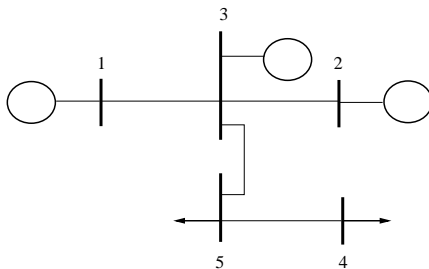


Figura 3.2 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste de 5 Barras

- Carga da barra 5 é mantida fixa;
- Limite de geração de potência reativa da barra 2 é 110 Mvar;
- Limite de geração de potência reativa da barra 3 é 90 Mvar.

A resistência série e a admitância shunt são desprezadas. A barra 1 é classificada como barra de folga e é considerada ilimitada. Dessa forma, os limites de potência da barra de folga não serão critérios de parada e soluções mais interessantes, sob o ponto de vista dos conceitos abordados neste trabalho, são alcançadas. A solução do fluxo de potência para o caso base é mostrado na Tabela 3.1 abaixo.

Tabela 3.1 – Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras para o Caso Base.

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)
1	Folga	1,200	0,00	5,00	0,22	30,00	0,00
2	PV	1,200	2,98	50,00	0,87	0,00	0,00
3	PV	1,200	0,99	50,00	20,58	0,00	0,00
4	PQ	1,173	-2,65	0,00	0,00	15,00	15,00
5	PQ	1,185	-2,03	0,00	0,00	60,00	0,00
Total				105,0	21,67	105,0	15,00

É importante mencionar que este exemplo é baseado no exemplo mostrado em [29].

3.7.1 Caso 1

O carregamento do sistema é elevado até o parâmetro de carga atingir 3,89; ou seja, este é o fator de carregamento máximo que o sistema de potência suporta sem perder a estabilidade. Este ponto de máximo carregamento corresponde a uma bifurcação sela-nó. A solução obtida para o fator de carregamento crítico ($\rho = 3,89$) é apresentada na Tabela 3.2. Nesta tabela a primeira e a segunda colunas se referem ao número e ao tipo da barra e a terceira e a quarta mostram a magnitude e o ângulo das tensões. Enquanto as demais colunas, de 5 a 10, se referem as potências ativa e reativa geradas, demandas de potência ativa e reativa do caso base e demandas de potência ativa e reativa máximas encontradas, respectivamente.

Tabela 3.2 – Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras - BSN.

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	2	1,200	0,00	200,09	86,07	30	0	30,58	0,00
2	1	1,226	-5,08	50,00	110,00	0	0	0,00	0,00
3	1	1,137	-7,14	50,00	90,00	0	0	0,00	0,00
4	0	0,822	-37,26	0,00	0,00	15	15	209,50	73,35
5	0	0,946	-21,64	0,00	0,00	60	0	60,00	0,00
Total				300,09	286,07	105,0	15,00	300,09	73,35

As barras 3 e 2 atingem, respectivamente, seus limites de potência reativa. A barra 3 atinge seu limite para um fator de carregamento igual a 2,069, enquanto a barra 2 atinge sua geração máxima de potência reativa para $\rho=3,84$. A Tabela 3.3 apresenta um resumo dos principais dados referentes aos pontos de intercâmbio de restrições. As Figuras 3.3 e 3.4 mostram o comportamento da magnitude da tensão, para todas as barras, e da geração de potência reativa, para as barras PV e de carga, frente à variação do carregamento do sistema de potência.

Tabela 3.3 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Teste de 5 Barras - BSN.

Barra	V	V^*	Q_G	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
3	1.2	1,137	0.9	2.0688	-0.0432	-48.1280	2.0812	23.125	-0.0452
2	1.2	1,226	1.1	3.8399	-0.0105	3.8707	-0.0408	94.929	-0.0106

Na Tabela 3.3, a segunda coluna mostra o valor de referência (caso base) da magnitude da tensão da barra em questão, a qual é mencionada na primeira coluna desta tabela. Enquanto a terceira coluna, V^* , mostra o valor da tensão no ponto de máximo de carregamento. Na coluna seguinte, Q_G , é apresentada a geração de potência reativa no ponto de intercâmbio de restrições, a qual é o valor limite. O valor do parâmetro de carga, para o qual ocorre o correspondente ponto de intercâmbio de restrições, é apresentado na quarta coluna. Enquanto nas colunas 5 a 9 são mostrados os valores obtidos para as figuras de mérito utilizadas para classificar os pontos de bifurcação, conforme apresentado nas equações (2.9) e (2.10), do Capítulo 2 e (3.22). Assim, conforme descrito na seção 2.4.2, os pontos de intercâmbio de restrições obtidos são pontos de bifurcação dinâmica induzida por limites, ou seja, é possível elevar o carregamento do sistema além deste valor, de acordo com o resultado obtido ($\rho = 3,890$). Observa-se também que, para ambas as barras, $\mu_{crit} < 0$, portanto, a conversão destas barras de PV para PQ ocorre sem a passagem por um ponto crítico, conforme descrito na seção 3.3.1. Dessa forma, o ponto de intercâmbio de restrições é estável.

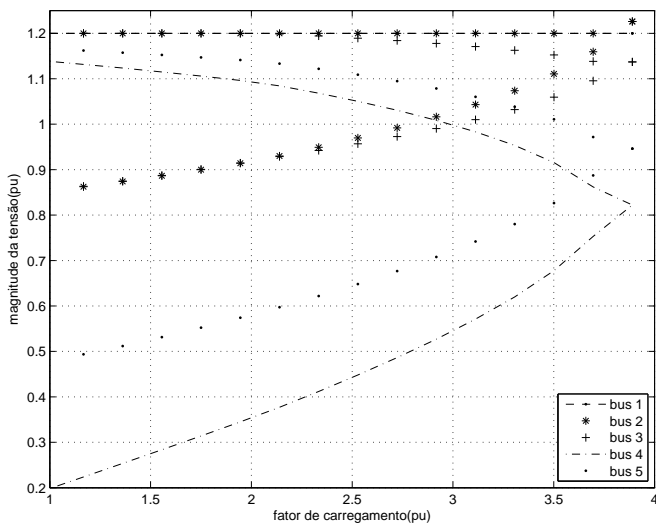


Figura 3.3 – Sistema Teste de 5 Barras: $\rho \times V$ - BSN.

Pode-se observar através da Figura 3.3 que a tensão da barra

2 não está mais no valor de referência quando o limite de geração de potência reativa desta barra é atingido.

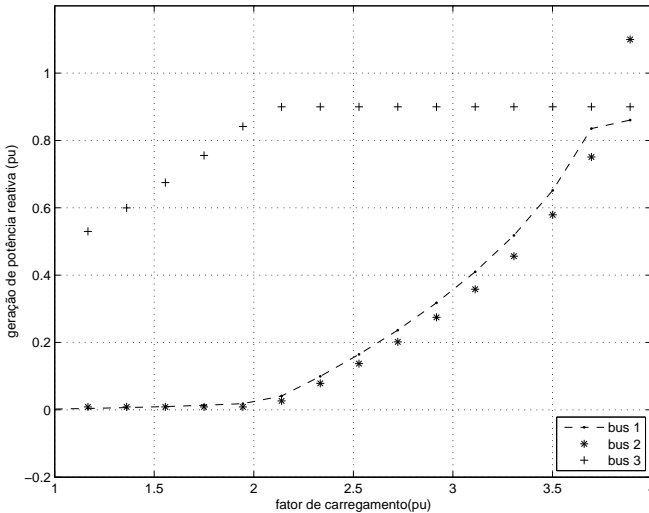


Figura 3.4 – Sistema Teste de 5 Barras: $\rho \times Q_G$ - BSN.

3.7.2 Caso 2

Para este caso foi considerada uma redução do limite máximo de geração de potência reativa de 110 Mvar para 90 Mvar na barra 2, a qual atinge seu limite, no caso anterior, para um fator de carregamento muito próximo do ponto de máximo carregamento do sistema. Neste estudo, o ponto de carregamento máximo é obtido para $\rho = 3,796$. A Tabela 3.4 apresenta os resultados do fluxo de potência obtidos no ponto de máximo carregamento. Enquanto a Tabela 3.5 mostra as principais características dos pontos de intercâmbio de restrições. A descrição das colunas feita na seção anterior se repete para esta seção. Análise semelhante a realizada na seção 3.7.1 é feita nesta seção para classificar o tipo de bifurcação das barras que atingem o limite de geração de potência reativa, através da qual se verifica que na barra 3 o ponto ainda é de bifurcação dinâmica induzida por limites, já na barra 2, tem-se um ponto de bifurcação estática induzida por limites. Não sendo

possível, portanto, elevar-se o parâmetro de carga além deste ponto e, por isso, este é o ponto de máximo carregamento do sistema.

Tabela 3.4 – Solução do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo do Sistema de 5 Barras - BIL.

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	2	1,200	0,00	195,95	99,16	30	0	31,14	0,00
2	1	1,200	-4,89	50,00	90,00	0	0	0,00	0,00
3	1	1,126	-7,01	50,00	90,00	0	0	0,00	0,00
4	0	0,814	-37,11	0,00	0,00	15	15	204,81	71,94
5	0	0,937	-21,54	0,00	0,00	60	0	60,00	0,00
Total				295,95	279,16	105,0	15,00	295,95	71,94

Tabela 3.5 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Teste de 5 Barras - BIL.

Barra	V	V^*	Q_G	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
3	1.2	0.9	1,126	2.0688	-0.0432	-48.128	2.0812	23.125	-0.0452
2	1.2	0.9	1,200	3.7963	842.14	0.0006	0.4757	-0.0012	0.9988

As Figuras 3.5 e 3.6 mostram, para este caso, o comportamento da magnitude da tensão, para todas as barras, e da geração de potência reativa, para as barras PV e de folga, frente à variação do carregamento do sistema de potência. Na parte superior destas curvas se tem, $Q_{G_2} = 0,87$ e $Q_{G_3} = 20,58$ Mvar, valores do caso base, conforme Tabela 3.1. Um ponto de intercâmbio de restrições é encontrado para $\rho = 2,0688$. Neste ponto a barra 3 tem a tensão no valor de referência e a potência reativa no limite máximo (90 Mvar), o qual é um ponto de bifurcação dinâmica induzida por limites, conforme mencionado anteriormente, visto que ainda há uma região estável (parte superior da curva PV) quando o fator de carga continua em elevação. Assim, com a elevação da carga, a magnitude da tensão desta barra decai até 1,126 pu (Tabela 3.5), quando o máximo carregamento é atingido.

No ponto de máximo carregamento do sistema, a barra 2 atinge seu limite máximo de geração de potência reativa (90 Mvar). Através da Figura 3.5, pode-se observar que não há como elevar o carregamento, visto que se o processo iterativo fosse continuado, atingiria-se a parte inferior da curva PV, estando-se, portanto, em um ponto de operação instável. Isto comprova que não é possível elevar a carga, pois o sistema se torna instável, comprovando que o referido ponto está associado com

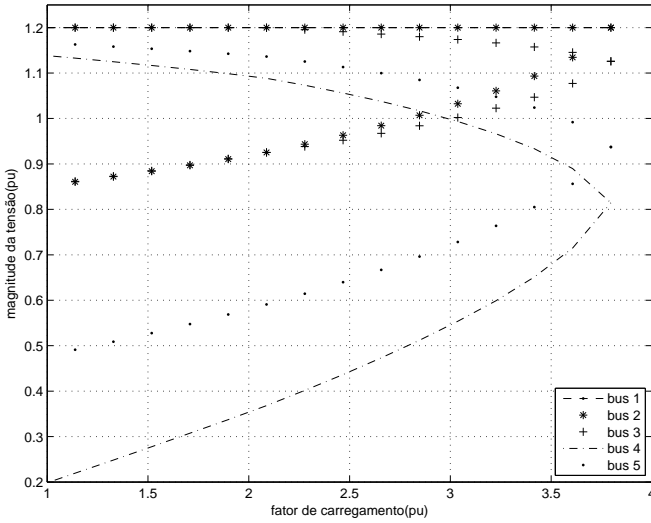


Figura 3.5 – Sistema teste de 5 barras: $\rho \times V$ - BIL.

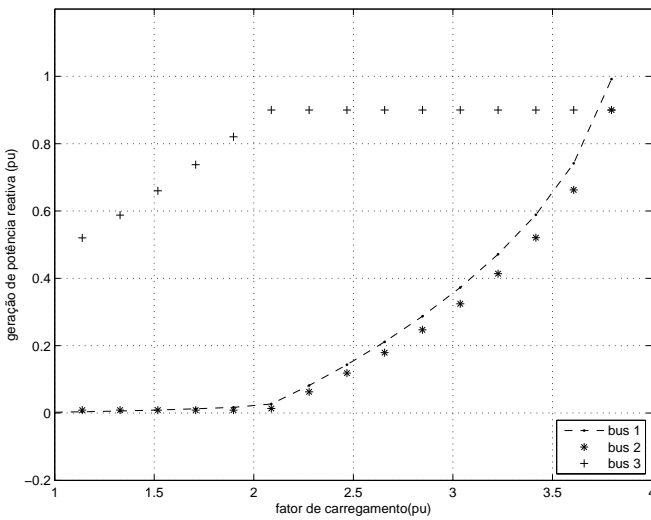


Figura 3.6 – Sistema teste de 5 barras: $\rho \times Q_G$ - BIL.

a bifurcação estática induzida por limites. Assim, em tal ponto, as soluções de magnitude de tensão de nível inferior e superior se unem, não existindo soluções reais do fluxo de potência além deste ponto.

3.8 Conclusões

A literatura apresenta diversos métodos para encontrar o ponto de máximo carregamento, dentre os quais está o método da aproximação quadrática. Para estimar o ponto crítico, este método se baseia na aproximação quadrática da curva PV, visto que esta curva representa uma função quadrática e se torna mais acentuadamente quadrática na vizinhança do ponto de bifurcação sela-nó. A principal característica deste método é o rápido encontro da solução.

Neste capítulo também foi apresentado um método específico para se obter os pontos críticos de geração de potência reativa. Obter de forma rápida e com precisão estes pontos é importante, visto que estas barras são *fracas* sob o ponto de vista da estabilidade de tensão, e por esta razão candidatas ao reforço. Este método utiliza um esquema preditor-corretor, baseado nas equações do fluxo de potência expressas em coordenadas retangulares. Dois sistemas lineares são resolvidos na etapa de predição, utilizando respectivamente os termos de primeira e segunda ordem. Isto aumenta o nível de precisão desta etapa, já que a expansão em série de Taylor não possui termos superiores aos de segunda ordem na formulação em coordenadas retangulares. O tamanho do passo do processo iterativo é calculado de forma a assegurar que apenas a barra mais crítica tenha seu limite de geração de potência reativa atingido na etapa de correção.

Além dos métodos citados, apresentou-se também um índice baseado nas relações de sensibilidade do ponto de intercâmbio de restrições QV, cujo valor indica se tal ponto é ou não estável. No capítulo seguinte são apresentados os resultados das simulações realizadas com dois sistemas testes, um didático e o outro baseado na rede real da região sul do país, através dos métodos citados.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

A abordagem proposta foi implementada em ambiente Matlab. As simulações foram realizadas com o objetivo de encontrar uma estimativa do ponto de máximo carregamento da rede; identificar, na etapa de predição, a barra e o respectivo fator de carga no qual o limite de potência reativa foi atingido; obter a solução do fluxo de potência neste ponto, com a geração de potência reativa especificada no seu valor limite e a magnitude da tensão no seu valor de referência. Posteriormente, classificou-se o tipo de bifurcação encontrado conforme descrito na seção 2.4. Visando verificar a consistência da classificação da bifurcação e ilustrar geometricamente algumas características dos resultados obtidos, foi feita a análise das curvas PV, QV e PQ. Foram feitas ainda simulações com programas comerciais utilizados pelas empresas do setor elétrico, tais como o Anarede e o Flupot, ambos desenvolvidos pelo CEPEL. Os resultados obtidos com o programa Anarede, versão V08, particularmente aqueles referentes ao Fluxo de Potência Continuado, foram utilizados como referência para o estudo do máximo carregamento da rede. A estratégia utilizada neste programa consiste em aplicar sucessivos incrementos de carga em áreas ou barras especificadas do sistema, e obter, para cada patamar de carregamento, a solução do fluxo de potência [30]. O Anarede permite também traçar as curvas PV, QV e PQ das barras da rede elétrica. Para efeito de comparação, o fator de máximo carregamento foi obtido tanto via método da continuação convencional quanto através de um método direto, além daqueles encontrados através da estratégia de aproximação quadrática e do algoritmo preditor-corretor descritos neste trabalho. No caso do método direto, foi utilizado o programa Flupot, versão V6.1, para determinar o máximo carregamento e as barras críticas correspondentes. O Flupot resolve o problema de FPO através do Método Primal Dual de Pontos Interiores, o qual é um dos mais utilizados na solução de programação não linear de grande porte. Detalhes adicionais sobre este modelo podem ser encontrados nas referências [31–33].

Os resultados numéricos foram obtidos com um sistema-teste IEEE 24 Barras (seção 4.2) e com um sistema equivalente da região sul do país (seção 4.3). Para cada uma destas redes analisou-se os aspectos mais relevantes da solução do fluxo de potência correspondente ao ponto de máximo carregamento e dos pontos críticos de geração de potência reativa obtidos com os programas computacionais citados anteriormente.

4.1 Considerações Iniciais

O objetivo principal do algoritmo de predição correção proposto neste trabalho é a identificação das barras críticas do sistema e análise da estabilidade através dos tipos de bifurcação encontrados. Desta forma, o processo iterativo do algoritmo mencionado é encerrado quando não é mais possível obter nenhuma solução do fluxo de potência com a magnitude da tensão de uma barra de geração ajustada no valor de referência e a geração de potência reativa no limite superior, conforme descrito na seção 3.5. Portanto, não é em todos os casos que a solução do fluxo de potência corresponde ao carregamento máximo do sistema. Os limites de geração de potência da barra de folga dos sistemas-teste utilizados foram liberados, assim como os limites de magnitude de tensão das barras de carga. Observe-se que uma das metas principais da estratégia proposta é encontrar um ponto de máximo carregamento que seja limitado apenas pelas restrições de potência reativa, e não em virtude dos limites de geração de potência ativa ou de magnitude da tensão nas barras de carga. Essa condição é importante para se analisar os tipos de bifurcação relativos aos pontos de intercâmbio de restrições QV, objeto principal deste estudo.

É importante mencionar que, para se obter resultados através de condições semelhantes, os arquivos do Anarede e do Flupot foram elaborados de forma a se respeitar estas considerações. Assim, além de liberar os limites de geração de potência na barra de folga em ambos os arquivos, utilizou-se o comando QLIM no Anarede e COLT no Flupot. O uso do comando QLIM no Anarede é importante porque dessa forma se mantém a tensão da barra de geração fixa até que o limite de geração de potência reativa seja encontrado. Após este ponto, a geração de potência reativa desta barra é mantida fixa no valor limite, a barra é convertida de PV para PQ, e a tensão da barra é liberada (deixa de ser controlada). O comando COLT do Flupot tem função semelhante, ele libera a tensão das barras PQ durante o processo de máximo carregamento. Outra consideração relevante é que a única opção de controle utilizada para os sistemas testes no Flupot foi o de geração de potência reativa, visto que no algoritmo proposto considerou-se todos os demais parâmetros de controle fixos (por exemplo, a geração de potência ativa, tensão das barras PV, tap's dos transformadores ou susceptâncias shunts referentes à capacitores e/ou reatores).

4.2 Sistema Teste de IEEE 24 Barras

O diagrama unifilar deste sistema teste é mostrado na Figura 4.1. Os dados de geração e transmissão podem ser encontrados na referência [34].

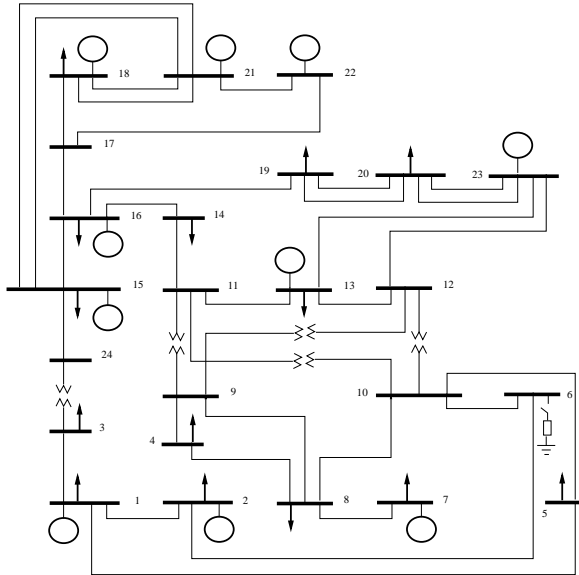


Figura 4.1 – Diagrama Unifilar do Sistema Teste IEEE 24 Barras

A demanda total desta rede elétrica no caso base é de 2850 MW e 580 MVar. Este sistema possui 10 barras de geração, as quais são as barras 1, 2, 7, 13, 15, 16, 18, 21, 22 e 23; 14 barras com carga conectada, 7 barras de transferência e a barra de folga é a barra número 13.

4.2.1 Resultados das Simulações - Caso 1

O valor do parâmetro de máximo carregamento encontrado, através do esquema preditor corretor proposto apresentado na seção 3.5, e considerando a configuração inicial apresentada na seção anterior, foi 58,82, para o qual a demanda máxima correspondente é 4526,57 MW e 921,2 MVar. A solução do fluxo de potência correspondente ao ponto de máximo de carregamento é apresentada na Tabela 4.2. O mesmo

fator de carregamento foi encontrado através do Flupot. Enquanto, através da formulação convencional do Método da Continuação e da metodologia da Aproximação Quadrática, os fatores de carregamento máximo encontrados são 58,67 e 57,85; respectivamente. Observa-se, portanto, que através destes métodos, o máximo carregamento atingido foi inferior aos encontrado através dos métodos diretos e da metodologia proposta. O valor obtido via programa Anarede foi 58,05, também um pouco inferior.

O fator do máximo carregamento atingido e o número de iterações necessárias para alcançar a convergência para cada método é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 1

Método	Fator de Carregamento (%)	Número de Iterações
Algoritmo Proposto	58,82	07
Método Direto (FLUPOT)	58,82	14
Fluxo de Potência Continuado (ANAREDE)	58,05	46
Método da Continuação Convencional	58,67	59
Aproximação Quadrática	57,85	27

Das 10 barras de geração deste sistema-teste, 7 atingem seu limite máximo de geração de potência reativa quando o máximo carregamento é encontrado. A barra 16 atinge o seu limite de potência reativa no caso base. A Tabela 4.3 sumariza as principais características dos pontos de intercâmbio de restrições QV. De forma semelhante a Tabela 3.3 mostrada na seção 3.7, a primeira coluna da Tabela 4.3 se refere a barra que teve seu limite de potência reativa alcançado, a segunda coluna mostra o valor de referência (caso base) da magnitude da tensão da barra citada. A terceira coluna, V^* , mostra o valor da magnitude da tensão no ponto de máximo de carregamento. Na coluna seguinte, Q_G , representa a geração de potência reativa no ponto de intercâmbio de restrições, a qual é o valor limite. Nas colunas 5 a 10 encontram-se, respectivamente, o parâmetro de carga, para o qual ocorre o correspondente ponto de intercâmbio de restrições QV, e os valores das figuras de mérito utilizadas para classificar os pontos de bifurcação induzida por limites, conforme apresentado nas equações (2.9) e (2.10), do Capítulo 2 e (3.22) do Capítulo 3.

Cabe lembrar que, nestes pontos as respectivas barras são modeladas como PV e PQ simultaneamente. Ou seja, antes do limite ser atingido a barra é tratada como uma barra PV, no ponto como PV e QV

Tabela 4.2 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	1	0.808	-49.28	176.00	80.00	108	22	171.53	34.94
2	1	0.809	-49.40	176.00	80.00	97	20	154.06	31.77
3	0	0.782	-44.24	0.00	0.00	180	37	285.89	58.77
4	0	0.752	-48.79	0.00	0.00	74	15	117.53	23.82
5	0	0.747	-49.63	0.00	0.00	71	14	112.77	22.24
6	0	0.735	-53.12	0.00	0.00	136	28	216.00	44.47
7	1	0.881	-50.92	300.00	180.00	125	25	198.53	39.71
8	0	0.766	-54.26	0.00	0.00	171	35	271.59	55.59
9	0	0.796	-37.06	0.00	0.00	175	36	277.95	57.18
10	0	0.754	-40.36	0.00	0.00	195	40	309.71	63.53
11	3	0.900	-19.61	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
12	3	0.894	-15.64	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
13	2	1.048	0.00	1858.17	739.45	265	54	420.89	85.77
14	1	0.977	-22.60	100.00	200.00	194	39	308.12	61.94
15	1	1.004	-19.99	215.00	110.00	317	64	503.48	101.65
16	1	1.014	-18.58	100.00	80.00	100	20	158.83	31.77
17	3	1.038	-16.32	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
18	1	1.050	-16.12	400.00	200.00	333	68	528.89	108.00
19	0	1.011	-16.39	0.00	0.00	181	37	287.48	58.77
20	0	1.029	-11.41	0.00	0.00	128	26	203.30	41.29
21	1	1.050	-14.97	400.00	153.60	0	0	0.00	0.00
22	1	1.050	-8.99	300.00	-30.75	0	0	0.00	0.00
23	1	1.050	-7.61	660.00	298.00	0	0	0.00	0.00
24	3	0.899	-27.61	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
Total:				4685.17	2090.31	2850.0	580.0	4526.56	921.20

Tabela 4.3 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras - Caso 1

Barra	V	V^*	Q_G	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
15	1.037	1.004	1.1	18.723	-0.0129	-4323.2	56.135	77.014	-0.0131
1	0.968	0.808	0.8	42.828	-0.0130	-2884.3	37.523	76.865	-0.0132
14	1.044	0.977	2	45.692	-0.0342	-579.59	19.844	29.207	-0.0354
2	0.968	0.809	0.8	48.603	-0.0990	-154.06	15.257	10.098	-0.1099
7	1.006	0.881	1.8	52.999	-0.1743	-86.136	15.015	5.7366	-0.2111
18	1.049	1.050	2	58.738	-0.0080	66.421	-0.534	124.33	-0.0081
23	1.05	1.050	2.98	58.827	1.5199	0.5968	0.907	-0.6579	0.6032

de forma simultânea e após este ponto a barra possui características de uma barra PQ apenas. Dessa forma, a tensão na barra, normalmente, apresenta uma queda em relação ao valor de referência.

Conforme mencionado na Seção 2.4.2, como $\alpha < 0$ para todas as barras que atingem seus limites (15, 01, 14, 02, 07 e 18), com exceção da barra 23, os pontos de bifurcação relativos a estas barras são classificados como pontos de bifurcação dinâmica induzida por limite. Portanto, é possível elevar o carregamento do sistema além do fator de carga encontrado para esta barra. O ponto correspondente ao limite alcançado na barra 23 é um ponto de bifurcação estática induzida por limites. Por esta razão, a estabilidade de tensão deste sistema pode ser perdida no caso de um aumento adicional do carregamento. Isto é confirmado pelo fator de carregamento máximo do sistema ($\rho = 58,82$), que por sua vez é igual ao carregamento relativo ao ponto de intercâmbio de restrições QV da barra 23. Outra forma de visualizar a classificação do tipo de bifurcação das barras é através das relações de sensibilidade. Neste caso, se um aumento em Q_g resulta em um aumento em ρ e se um aumento em V também resulta em um aumento em ρ , o ponto de intercâmbio de restrições é um ponto de bifurcação estática induzida por limites, o que ocorre com a barra 23 deste sistema, como pode ser observado na Tabela 4.3.

Observa-se que o valor do parâmetro μ_{crit} , o qual é um índice baseado na relação de sensibilidade da potência reativa gerada associada a magnitude da tensão, está situado no intervalo $(0, 1)$ para a barra 23, indicando que o ponto de intercâmbio de restrições QV é instável. Portanto, a conversão PV-PQ desta barra não ocorre sem que a trajetória das soluções do fluxo de potência passe por um ponto crítico, conforme descrito na seção 3.3.1. Para as demais barras este índice é menor do que zero, ou seja, o ponto de intercâmbio de restrições é estável, confirmando a classificação baseada nas demais figuras de mérito utilizadas para analisar estes pontos.

As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam as curvas PV e PQ, respectivamente, das últimas barras que alcançaram seus limites de geração de potência reativa. Pode-se observar, através da curva PV, que a magnitude da tensão das barras é constante enquanto a geração de potência reativa é igual ou inferior ao valor limite, e este perfil de tensão começa a se degradar com a elevação o carregamento após a barra atingir seu limite. Analisando a curva PV da barra 23, confirma-se a classificação do ponto de bifurcação descrito anteriormente. É possível visualizar que, se o processo iterativo continuasse, além do ponto onde $\rho = 58,82$, o sistema entraria em uma região de operação instável, visto que se

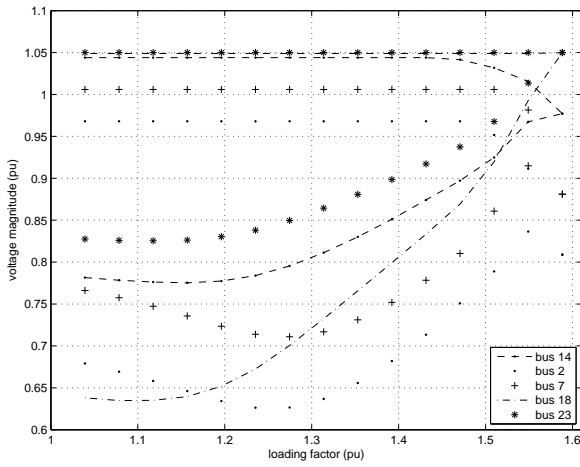


Figura 4.2 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$.

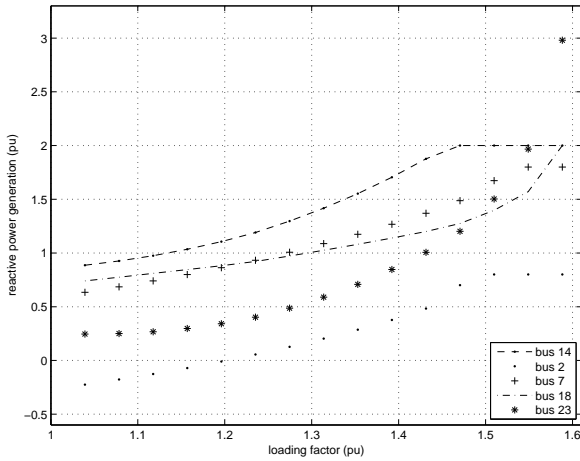


Figura 4.3 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$

estaria na parte inferior da curva PV.

4.2.2 Resultados das Simulações via Anarede - Caso 1

O fator de carregamento máximo determinado com o aplicativo computacional Anarede (Fluxo de Potência Continuado) é 58,05, correspondendo a uma demanda total de 4504,31MW e 916,67MVar. A Tabela 4.4 apresenta os principais dados associados aos pontos de intercâmbio de restrições QV encontrados pelo aplicativo Anarede.

Tabela 4.4 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Anarede - Caso 1

Barra	V	V^*	Q_G	ρ
15	1.037	1.010	110.0	18.43
1	0.968	0.847	80.0	43.08
14	1.044	0.991	200.0	45.95
2	0.968	0.848	80.0	48.89
7	1.006	0.919	180.0	53.40

Neste caso, a Tabela 4.4 indica que 5 barras atingem o limite de geração de potência reativa, as quais são as mesmas encontradas pela metodologia proposta, inclusive a sequência que os limites são atingidos. Os limites das barras 18 e 23 não chegam a ser alcançados, visto que o fator de máximo carregamento é inferior àquele encontrado pela metodologia proposta. A comparação entre os valores mostrados na coluna 5 da tabela 4.3 e na última coluna da tabela 4.4 revela algumas pequenas diferenças no valor do parâmetro de carga para o qual ocorre o intercâmbio de restrições QV (por exemplo, para a barra 7 $\rho = 52,999$ é obtido com a metodologia proposta enquanto que o aplicativo Anarede identifica o referido ponto para um fator de carga de 53,40). Esta diferença pode ser atribuída às naturezas distintas das soluções do fluxo de potência correspondentes a estes fatores de carregamento.

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram, respectivamente, as curvas PV, QV e PQ obtidas com o aplicativo Anarede, para as barras cujos limites de geração de potência reativa foram atingidos. Observa-se através da curva PV da Figura 4.4 que é possível se elevar o carregamento além daquele encontrado pela barra 7 (última a alcançar o limite de potência reativa gerada), com ρ igual a 53,4. Isto confirma a classificação do tipo bifurcação relativo ao ponto de intercâmbio de restrições QV destas barras. A curva QV da Figura 4.5 mostra que

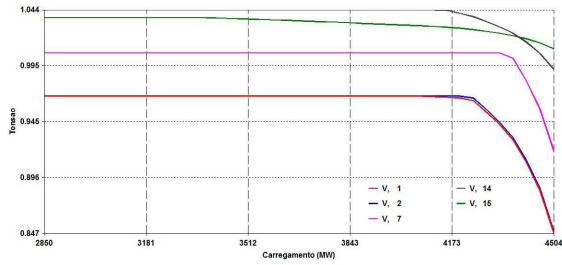


Figura 4.4 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ via Anarede.

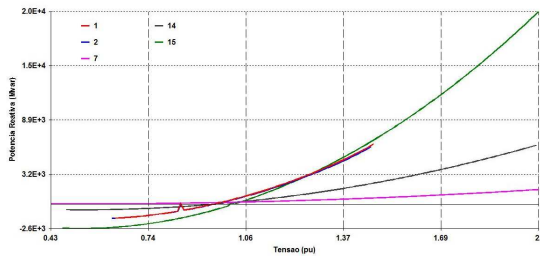


Figura 4.5 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $Q \times V$ via Anarede

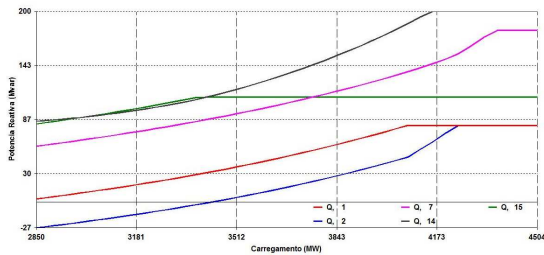


Figura 4.6 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ via Anarede

a magnitude da tensão da barra 7 possui uma maior sensibilidade em relação à variação da geração de potência reativa, assim como as barras 1 e 2.

A Figura 4.7 mostra a variação da magnitude da tensão das barras de carga em relação ao carregamento do sistema. Pode-se notar que as barras 8, 9 e 10 variam de forma mais acentuada com aumento do carregamento do sistema e portanto são consideradas mais *fracas* sob o ponto de vista de estabilidade de tensão.

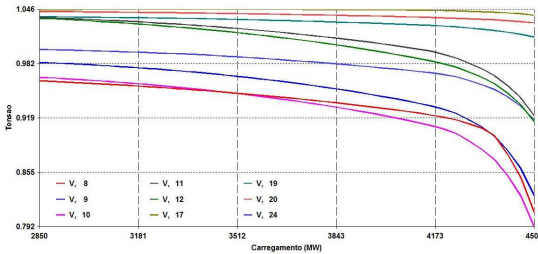


Figura 4.7 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ via Anarede para as Barras de Carga

A Tabela 4.5 apresenta o resultado do Fluxo de Potência no ponto de máximo carregamento obtido pelo aplicativo Anarede.

4.2.3 Resultados das Simulações via Flupot - Caso 1

Os resultados obtidos via método direto (programa computacional Flupot) são muito semelhantes àqueles encontrados pelo algoritmo proposto. O fator de carregamento máximo estimado foi 58,82. No entanto, há uma diferença no que diz respeito às barras que atingem os limites de potência reativa. A barra 18, indicada como barra crítica na seção anterior, não alcança seu limite de geração de potência reativa no processo iterativo correspondente ao uso do programa Flupot. As demais barras críticas são as mesmas identificadas através do esquema preditor-corretor. A barra 23 é a mais crítica, assim como na seção anterior, e a barra 16 tem o limite de geração de potência reativa atingido já no caso base. A Tabela 4.6 mostra algumas variáveis referentes aos pontos de intercâmbio de restrições QV encontrados pelo Flupot. Cabe mencionar que, neste caso, as barras na Tabela 4.6 não estão na

Tabela 4.5 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Anarede - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	1	0.847	-49.26	176	80	108	22	170.7	34.8
2	1	0.848	-49.38	176	80	97	20	153.3	31.6
3	0	0.813	-44.23	0	0	180	37	284.5	58.5
4	0	0.792	-48.77	0	0	74	15	117	23.7
5	0	0.788	-49.61	0	0	71	14	112.2	22.1
6	0	0.783	-53.10	0	0	136	28	214.9	44.3
7	1	0.919	-50.89	300	180	125	25	197.6	39.5
8	0	0.809	-54.23	0	0	171	35	270.3	55.3
9	0	0.829	-37.05	0	0	175	36	276.6	56.9
10	0	0.792	-40.35	0	0	195	40	308.2	63.2
11	3	0.922	-19.60	0	0	0	0	0	0
12	3	0.915	-15.64	0	0	0	0	0	0
13	2	1.048	0.00	1821.6	641.4	265	54	418.8	85.3
14	1	0.991	-22.60	100	200	194	39	306.6	61.6
15	1	1.010	-19.99	215	110	317	64	501	101.1
16	1	1.018	-18.58	100	80	100	20	158	31.6
17	3	1.039	-16.31	0	0	0	0	0	0
18	1	1.049	-16.11	400	180	333	68	526.3	107.5
19	0	1.014	-16.39	0	0	181	37	286.1	58.5
20	0	1.030	-11.40	0	0	128	26	202.3	41.1
21	1	1.050	-14.96	400	137.1	0	0	0	0
22	1	1.050	-8.98	300	-31.8	0	0	0	0
23	1	1.050	-7.61	660	261.6	0	0	0	0
24	3	0.917	-27.60	0	0	0	0	0	0

ordem em que atingem os seus limites. Na Tabela 4.7 é apresentado o resultado do fluxo de potência obtido pelo Flupot. Nota-se que no

Tabela 4.6 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Flupot - Caso 1

Barra	V	V^*	Q_G
1	0.968	0.807	80.0
2	0.968	0.808	80.0
7	1.006	0.880	180.0
14	1.044	0.977	200.0
15	1.037	1.004	110.0
23	1.050	1.050	298.0

ponto de carregamento crítico, o nível de tensão de todas as barras que atingem seu limite de geração de potência reativa em razão do aumento da carga, com exceção da barra 23, são inferiores às do caso base. A barra 23 mantém a magnitude da sua tensão de referência e a potência reativa fixa no limite máximo, comprovando que o processo iterativo é encerrado no instante em que esta barra atinge o limite de potência reativa gerada. Portanto, o ponto de intercâmbio de restrições QV da barra 23 corresponde a uma bifurcação estática induzida por limite. Isto impede qualquer aumento adicional de carregamento do sistema, pois este ponto de intercâmbio de restrições é instável.

4.2.4 Resultados das Simulações - Caso 2

Visando verificar a consistência dos resultados comentados nas seções anteriores com relação a classificação do ponto de intercâmbio de restrições QV da barra 23, aumentou-se o limite de geração de potência reativa desta barra de 298 para 320 MVar. Nesta condição, o fator de máximo carregamento é $\rho = 59,02$, o qual corresponde a um ponto de bifurcação sela-nó. A solução do fluxo de potência para este fator de carga é mostrada na Tabela 4.8. A Tabela 4.9 apresenta os pontos de intercâmbio de restrições encontrados para este ponto de operação.

A comparação das Tabelas 4.2 e 4.8 indica que a magnitude das tensões de quase todas as barras aumentam, em concordância com as relações de sensibilidade $\frac{\partial \rho}{\partial V}$ e $\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$ do caso anterior. A análise das Tabelas 4.3 e 4.9 revela que as características principais dos pontos de intercâmbio de restrições para as barras 15, 01, 14, 02 e 07 praticamente

Tabela 4.7 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	1	0.807	-49.3	176.0	80.0	108	22	171.5	34.9
2	1	0.808	-49.4	176.0	80.0	97	20	154.1	31.8
3	0	0.782	-44.3	0.0	0.0	180	37	285.9	58.8
4	0	0.752	-48.8	0.0	0.0	74	15	117.5	23.8
5	0	0.747	-49.7	0.0	0.0	71	14	112.8	22.2
6	0	0.735	-53.2	0.0	0.0	136	28	216.0	44.5
7	1	0.880	-51.0	300.0	180.0	125	25	198.5	39.7
8	0	0.766	-54.3	0.0	0.0	171	35	271.6	55.6
9	0	0.795	-37.1	0.0	0.0	175	36	277.9	57.2
10	0	0.753	-40.4	0.0	0.0	195	40	309.7	63.5
11	3	0.900	-19.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
12	3	0.894	-15.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
13	2	1.048	0.0	1858.0	741.1	265	54	420.9	85.8
14	1	0.977	-22.6	100.0	200.0	194	39	308.1	61.9
15	1	1.004	-20.0	215.0	110.0	317	64	503.4	101.6
16	1	1.013	-18.6	100.0	80.0	100	20	158.8	31.8
17	3	1.038	-16.3	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
18	1	1.049	-16.1	400.0	192.7	333	68	528.9	108.0
19	0	1.010	-16.4	0.0	0.0	181	37	287.5	58.8
20	0	1.029	-11.4	0.0	0.0	128	26	203.3	41.3
21	1	1.050	-15.0	400.0	160.4	0	0	0.0	0.0
22	1	1.050	-9.0	300.0	-30.2	0	0	0.0	0.0
23	1	1.050	-7.6	660.0	298.0	0	0	0.0	0.0
24	3	0.899	-27.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0

Tabela 4.8 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 2

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	1	0.793	-0.88	176.0	80.00	108	22	171.74	34.98
2	1	0.793	-0.88	176.0	80.00	97	20	154.25	31.80
3	0	0.771	-0.79	0.0	0.00	180	37	286.24	58.84
4	0	0.737	-0.87	0.0	0.00	74	15	117.67	23.85
5	0	0.731	-0.89	0.0	0.00	71	14	112.90	22.26
6	0	0.717	-0.95	0.0	0.00	136	28	216.27	44.53
7	1	0.866	-0.91	300.0	180.00	125	25	198.78	39.76
8	0	0.750	-0.97	0.0	0.00	171	35	271.92	55.66
9	0	0.783	-0.66	0.0	0.00	175	36	278.29	57.25
10	0	0.739	-0.72	0.0	0.00	195	40	310.09	63.61
11	3	0.892	-0.35	0.0	0.00	0	0	0.00	0.00
12	3	0.886	-0.28	0.0	0.00	0	0	0.00	0.00
13	2	1.048	0.00	1869.1	777.04	265	54	421.40	85.87
14	1	0.971	-0.40	100.0	200.00	194	39	308.50	62.02
15	1	1.002	-0.35	215.0	110.00	317	64	504.09	101.77
16	1	1.012	-0.33	100.0	80.00	100	20	159.02	31.80
17	3	1.037	-0.29	0.0	0.00	0	0	0.00	0.00
18	1	1.049	-0.29	400.0	197.03	333	68	529.54	108.13
19	0	1.009	-0.29	0.0	0.00	181	37	287.83	58.84
20	0	1.028	-0.20	0.0	0.00	128	26	203.55	41.35
21	1	1.050	-0.27	400.0	168.80	0	0	0.00	0.00
22	1	1.050	-0.16	300.0	-29.67	0	0	0.00	0.00
23	1	1.050	-0.14	660.0	312.29	0	0	0.00	0.00
24	3	0.893	-0.49	0.0	0.00	0	0	0.00	0.00
Total:				4696.10	2155.49	2850.0	580.0	4532.07	922.32

Tabela 4.9 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras - Caso 2

Barra	V	V^*	Q_G	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
15	1.037	1.002	1.1	18.723	-0.0129	-4323.2	56.135	77.014	-0.0131
1	0.968	0.793	0.8	42.828	-0.0130	-2884.3	37.523	76.865	-0.0131
14	1.044	0.971	2.0	45.692	-0.0342	-579.59	19.844	29.207	-0.0354
2	0.968	0.793	0.8	48.603	-0.0990	-154.06	15.257	10.098	-0.1099
7	1.006	0.866	1.8	52.999	-0.1743	-86.136	15.015	5.7366	-0.2111
18	1.049	1.049	2.0	58.841	-0.0091	248.38	-2.2763	109.12	-0.0092
23	1.05	1.050	3.2	58.858	-0.0116	58.818	-0.68397	85.995	-0.0117

não se alteram, apesar das pequenas diferenças nas figuras de mérito da barra 18. No que diz respeito a barra 23, os sinais de α e $\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$ se alteram em relação ao caso 1, modificando o tipo de ponto de intercâmbio de restrições QV, o qual passa a corresponder a uma bifurcação dinâmica induzida por limites. O valor do parâmetro de carga pouco se altera (de 58,82 para 58,85), porém neste caso o carregamento do sistema pode ser incrementado até o valor 59,02. Isto confirma a consistência dos resultados encontrados no caso 1.

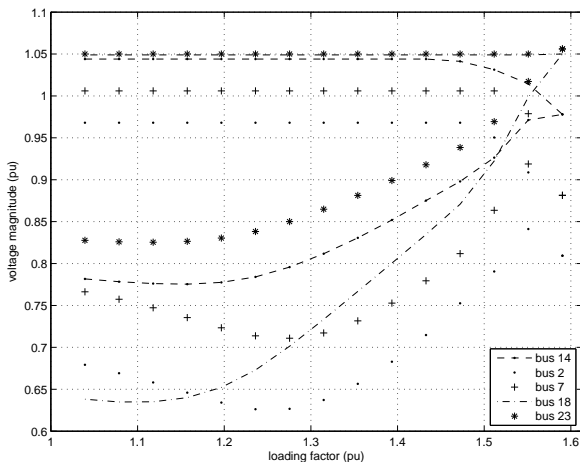


Figura 4.8 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 2

As Figuras 4.8 e 4.9 mostram as curvas PV e PQ para este caso. Nessas figuras, observa-se que após o ponto de intercâmbio de restrições QV da barra 23 ser atingido, o processo de aumento de carga continua, a potência reativa desta barra se mantém fixa e a correspondente magnitude da tensão liberada. Quando isto ocorre, a magnitude da tensão se eleva um pouco, o que pode ser atribuído ao aumento do limite de geração de potência reativa. É necessário lembrar que o processo iterativo correspondente a estratégia de identificação das barras críticas relativas a geração de potência reativa é finalizado quando não é mais possível determinar soluções com a magnitude da tensão no valor de referência e a geração de potência reativa no limite. O programa computacional Flupot obteve resultados muito semelhantes aqueles mostrados nesta seção, quando utilizado para encontrar a solução do fluxo de

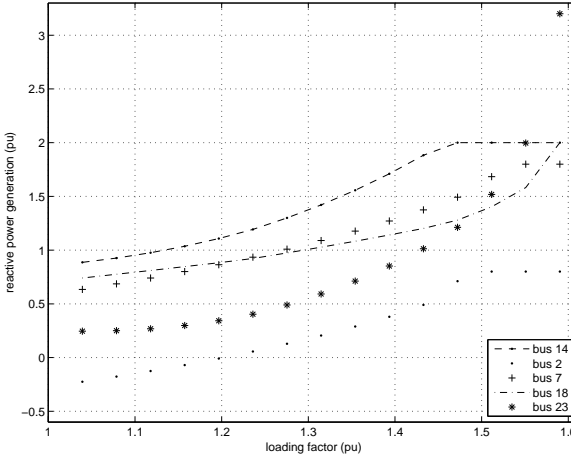


Figura 4.9 – Sistema Teste IEEE 24 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 2

potência relativa ao máximo carregamento do sistema.

O fator de carregamento crítico e o número de iterações necessárias para alcançar a convergência para cada método utilizado são mostrados na tabela 4.10. A análise desta tabela indica que o número

Tabela 4.10 – Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 2

Método	Fator de Carregamento (%)	Número de Iterações
Algoritmo Proposto	58,85	09
Método Direto (FLUPOT)	59,02	14
Fluxo de Potência Continuado (ANAREDE)	58,05	46
Método da Continuação Convencional	58,67	59
Aproximação Quadrática	57,86	27

de iterações necessárias para solução do problema praticamente não se altera. Apenas o algoritmo proposto aumenta levemente o número de iterações. Os resultados obtidos também pouco se modificam. Apenas o algoritmo proposto e o método do fluxo de potência ótimo alteram os valores dos fatores de máximo carregamento com a elevação do limite de geração de potência reativa da barra 23.

4.2.5 Resultados das Simulações via Anarede - Caso 2

Desde que na solução obtida com o programa Anarede a barra 23 não chega a atingir o seu limite de geração de potência reativa no caso 1, o aumento da capacidade de geração de potência reativa nesta barra não interfere nos resultados obtidos com o referido programa. Portanto, os resultados do caso 2 são os mesmos apresentados na seção 4.2.2.

4.2.6 Resultados das Simulações via Flupot - Caso 2

Com a flexibilização do limite de reativo da barra 23, um fator de carregamento mais elevado é encontrado. Como mencionado na seção 4.2.4, o fator de carregamento encontrado neste caso é de 59,02. As principais informações a respeito dos pontos de intercâmbio de restrições QV encontrado pelo Flupot são mostrados na Tabela 4.11. Enquanto o resultado do fluxo de potência obtido é apresentado na Tabela 4.12.

Tabela 4.11 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema IEEE 24 Barras via Flupot - Caso 2

Barra	V	V^*	Q_G
1	0.968	0.808	80.0
2	0.968	0.809	80.0
7	1.006	0.881	180.0
14	1.044	0.978	200.0
15	1.037	1.005	110.0
23	1.050	1.056	320.0

Pode-se notar que há uma pequena diferença no perfil das tensões e dos carregamentos das barras em relação aos resultados do caso 1. As tensões das barras se elevam um pouco em relação às tensões resultantes do caso 1. A diferença mais significativa ocorre na magnitude da tensão da barra 23, a qual não está mais fixa no seu valor de referência. A mesma observação com relação a liberação da magnitude da tensão desta barra, feita na seção 4.2.4, é válida no presente caso. O fato da tensão estar liberada do seu valor de referência, quando o máximo carregamento é atingido, reforça a conclusão de que o ponto de bifurcação desta barra não é mais um ponto de bifurcação estática induzida por

Tabela 4.12 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 2

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
1	1	0.808	-49.4	176.0	80.0	108	22	171.7	35.0
2	1	0.809	-49.5	176.0	80.0	97	20	154.2	31.8
3	0	0.783	-44.3	0.0	0.0	180	37	286.2	58.8
4	0	0.752	-48.9	0.0	0.0	74	15	117.7	23.9
5	0	0.747	-49.7	0.0	0.0	71	14	112.9	22.3
6	0	0.735	-53.2	0.0	0.0	136	28	216.3	44.5
7	1	0.881	-51.0	300.0	180.0	125	25	198.8	39.8
8	0	0.766	-54.4	0.0	0.0	171	35	271.9	55.7
9	0	0.796	-37.1	0.0	0.0	175	36	278.3	57.2
10	0	0.754	-40.4	0.0	0.0	195	40	310.1	63.6
11	3	0.900	-19.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
12	3	0.895	-15.7	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
13	2	1.048	0.0	1864.0	730.7	265	54	421.4	85.9
14	1	0.977	-22.6	100.0	200.0	194	39	308.5	62.0
15	1	1.005	-20.0	215.0	110.0	317	64	504.1	101.8
16	1	1.015	-18.6	100.0	80.0	100	20	159.0	31.8
17	3	1.038	-16.4	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
18	1	1.049	-16.2	400.0	189.4	333	68	529.5	108.1
19	0	1.014	-16.4	0.0	0.0	181	37	287.8	58.8
20	0	1.034	-11.5	0.0	0.0	128	26	203.5	41.3
21	1	1.050	-15.0	400.0	156.9	0	0	0.0	0.0
22	1	1.050	-9.0	300.0	-30.7	0	0	0.0	0.0
23	1	1.056	-7.7	660.0	320.0	0	0	0.0	0.0
24	3	0.900	-27.7	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0

limites.

4.3 Sistema Equivalente da Região Sul de 82 Barras

Esta seção apresenta os resultados obtidos via metodologia proposta e programa Anarede para o sistema equivalente da região Sul do Brasil, composto por 82 barras, o qual é baseado no sistema real desta região. Para o cálculo do ponto de máximo carregamento também foi feito uso da metodologia do Método da Continuação convencional e do Programa Flupot.

4.3.1 Descrição do Sistema

Este sistema equivalente possui 17 barras de geração, 48 barras com carga conectada, 28 barras de transferência e 143 circuitos. A barra de folga é a barra 65. A Figura 4.10 mostra o diagrama unifilar deste sistema. Os limites operacionais e os dados das barras e linhas de transmissão são apresentados no Apêndice C.2.

A demanda total no caso base é de 9119 MW e 2991 MVar. Cabe mencionar que os dados deste equivalente são referentes ao ano 2008. Os dados atuais de demanda e geração podem ser encontrados no site do Operador Nacional do Sistema [9]. As usinas consideradas neste equivalente de 2008, conforme diagrama unifilar, são:

- Barra 904: UHE Itá;
- Barra 925: UHE Salto Santiago;
- Barra 808: UHE Gov. José Richa (Salto Caxias);
- Barra 1152: UTE Sepé Tiaraju;
- Barra 917: UHE Passo Fundo;
- Barra 1159: UHE Monte Claro;
- Barra 919: UHE Salto Osório - UG's 1 a 4;
- Barra 921: UHE Salto Osório - UG's 5 e 6;
- Barra 915: UHE Machadinho;
- Barra 1157: UHE Campos Novos;

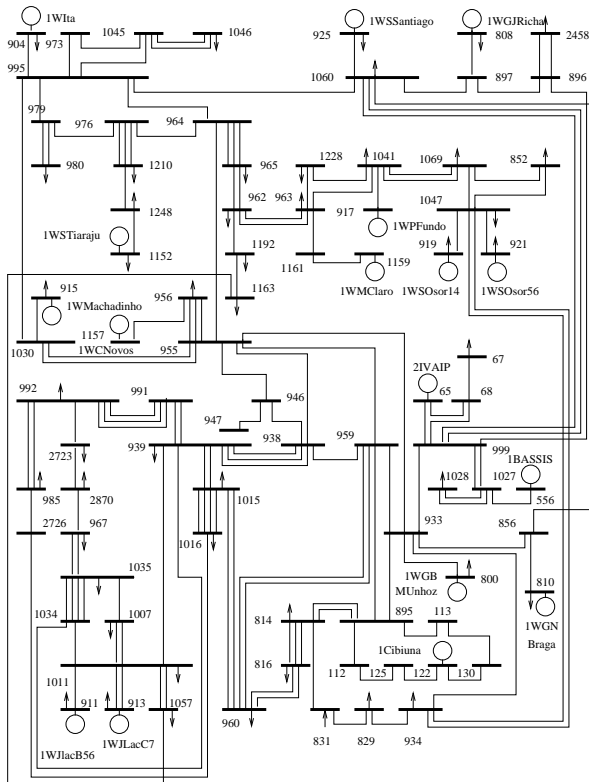


Figura 4.10 – Diagrama Unifilar do Sistema Equivalente da Região Sul de 82 Barras

- Barra 911: UTE J. Lacerda - UG's 5 e 6;
- Barra 913: UTE J. Lacerda - UG 7;
- Barra 800: UHE Gov. Bento Munhoz (Foz do Areia);
- Barra 810: UHE Gov. Ney Braga (Segredo);

Na descrição das usinas na Figura 4.10, entre parênteses é colocado o nome antigo da usina, o qual também é muito utilizado quando se refere à estas UHE's. Na época em que este sistema equivalente foi elaborado, as unidades geradoras da usina de S. Osório foram conectadas em barras segregadas, configuração que não é mais utilizada atualmente. As barras de geração 65, 556 e 122 não são reais, porém a injeção de potência destas barras representa as interligações sul/sudeste. Por esta razão, elas podem eventualmente assumir valores negativos, visto que a região sul pode estar enviando energia para região sudeste ou vice-versa. A usina de Itaipu é considerada na região sudeste, porém parte da geração desta usina é transmitida para a região sul, através dos pontos de conexão em Ivaiporã (65) e Ibiuna (122). A barra Assis (556) é uma barra localizada no estado de São Paulo, a qual faz fronteira com a região Sul. No ano de 2008, ano que este sistema foi equivalentado, o recorde de carga na região sul foi de 11867 MW, o qual foi atingido às 14h19 do dia 09/12. Enquanto o recorde de carga no país ocorreu no dia 11/09 às 18h52, atingindo um montante de 65586 MW.

4.3.2 Resultados das Simulações - Caso 1

Considerando a configuração inicial apresentada na seção anterior, o fator de máximo carregamento encontrado, através do algoritmo preditor-corretor para identificação de barras críticas proposto, foi de 8,45. A carga total do sistema para este ponto de operação foi de 9886,2MW e 3260,44MVar. Este valor é inferior ao recorde de carga desta região no ano em que este sistema foi equivalentado, conforme descrito na seção anterior. Como o sistema é um equivalente, não estão modelados todos os dados de carga e geração nas barras, e nem todos os recursos de compensação de potência reativa disponíveis na rede. Isto pode impedir a determinação de um carregamento máximo igual ou superior aquele valor real obtido em 2008.

Os parâmetros de máximo carregamento obtidos através dos Métodos da Continuação Convencional e da Aproximação Quadrática

e programas comerciais Anarede e Flupot foram 8,44; 8,31; 8,42 e 9,51; respectivamente. Estes resultados, assim como o número de iterações necessárias para encontrar a solução, são apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 1

Método	Fator de Carregamento (%)	Número de Iterações
Algoritmo Proposto	8,45	05
Método Direto (FLUPOT)	9,51	15
Fluxo de Potência Continuado (ANAREDE)	8,42	14
Método da Continuação Convencional	8,44	09
Aproximação Quadrática	8,31	04

Pode-se observar que o número de iterações dos métodos utilizados se reduziu em relação àqueles verificados para o sistema teste de 24 barras devido ao fator de carregamento máximo encontrado ser significativamente inferior. O programa Flupot foi o que necessitou um maior número de iterações para alcançar a solução. O método da aproximação quadrática foi o que encontrou a solução com o menor número de iterações.

No ponto de carregamento máximo, 5 das 17 barras de geração atingem o limite de geração de potência reativa, para as condições mencionadas. O resultado do fluxo de potência no ponto de máximo carregamento é mostrado na Tabela 4.14 e as principais características dos pontos de intercâmbio de restrições QV encontrados são apresentadas na Tabela 4.15.

Tabela 4.14 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.	1974.2	107.28	0	0	0	0
67	0	0.856	-2.65	0	0	0.2	0	0.217	0
68	0	0.965	-2.65	0	0	0	0	0	0
112	0	0.996	-28.17	0	0	0	0	0	0
113	0	0.996	-28.17	0	0	0	0	0	0
122	1	1.051	-26.28	378.4	-61.722	0	0	0	0
125	0	1.046	-24.25	0	0	0	0	0	0
130	0	1.046	-24.25	0	0	0	0	0	0
556	1	1.012	-1.92	314.3	-85.732	0	0	0	0
800	1	1.02	-7.86	844	334.18	0.9	0	0.976	0
808	1	1.000	4.21	1000	12.268	2.4	0	2.603	0
810	1	1.035	-2.58	900	155.17	2.4	0	2.603	0
814	0	1.002	-31.55	0	0	161	65.5	174.6	71.035
816	0	0.986	-33.47	0	0	573	173	621.42	187.62
829	0	0.927	-30.96	0	0	68.1	51.7	73.854	56.069
831	0	0.933	-31.96	0	0	79.5	38.3	86.218	41.536
852	0	0.884	-21.57	0	0	24.5	49.9	26.57	54.117
856	0	1.023	-7.68	0	0	0	0	0	0

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
895	0	0.948	-28.18	0	0	0	0	0	0
896	0	1.025	-3.34	0	0	0	0	0	0
897	0	1.028	-1.60	0	0	0	0	0	0
904	1	1.035	-15.75	1000	450	2.5	0	2.711	0
911	1	1.025	-46.79	160	159.25	16	8	17.352	8.676
913	1	1.025	-47.05	180	191.01	18	9	19.521	9.761
915	1	1.014	-14.58	1000	153.08	1.8	0	1.952	0
917	1	0.892	-26.22	220	76	0	0	0	0
919	1	1.019	-3.93	720	220	1.2	0	1.301	0
921	1	1.035	-5.97	130	74.38	0.3	0	0.325	0
925	1	1.000	2.60	900	48.938	1.8	0	1.952	0
933	0	1.011	-13.24	0	0	0	-54.3	0	-58.888
934	0	1.018	-15.75	0	0	304	13.7	329.69	14.858
938	0	0.949	-34.58	0	0	0	0	0	0
939	0	0.975	-38.47	0	0	546	182	592.14	197.38
946	0	0.968	-31.65	0	0	0	0	0	0
947	0	0.963	-31.65	0	0	0	0	0	0
955	0	0.999	-24.10	0	0	0	0	0	0
956	0	0.987	-24.66	0	0	419	-21.8	454.41	-23.642
959	0	0.937	-29.57	0	0	0	0	0	0
960	0	0.988	-33.57	0	0	652	311	707.09	337.28
962	0	0.925	-41.48	0	0	282	69.9	305.83	75.807
963	0	0.921	-39.32	0	0	-85.8	44.5	-93.05	48.26
964	0	0.906	-36.88	0	0	0	0	0	0
965	0	0.948	-39.48	0	0	501	44.9	543.33	48.694
967	0	0.923	-58.03	0	0	91.9	48.4	99.666	52.49
973	0	0.971	-22.88	0	0	0	0	0	0
976	0	0.865	-42.08	0	0	0	0	0	0
979	0	0.868	-41.22	0	0	0	0	0	0
980	0	0.916	-43.74	0	0	486	179	527.07	194.13
985	0	0.948	-47.59	0	0	39	25.9	42.296	28.089
991	0	0.936	-42.09	0	0	0	0	0	0
992	0	0.956	-47.16	0	0	207	50.7	224.49	54.984
995	0	0.999	-20.85	0	0	0	0	0	0
999	0	1.017	-2.53	0	0	0	0	0	0
1007	0	0.997	-52.74	0	0	33.1	61.3	35.897	66.48
1011	0	1.009	-50.52	0	0	41.4	-17.3	44.898	-18.762
1015	0	0.901	-43.04	0	0	133	6.1	144.24	6.616
1016	0	0.919	-48.81	0	0	390	182	422.96	197.38
1027	0	1.010	-4.40	0	0	0	0	0	0
1028	0	1.036	-7.20	0	0	728	249	789.52	270.04
1030	0	1.002	-22.26	0	0	0	0	0	0
1034	0	0.928	-53.73	0	0	0	0	0	0
1035	0	0.934	-57.51	0	0	164	17.9	177.86	19.413
1041	0	0.882	-33.81	0	0	152	8	164.84	8.676
1045	0	0.986	-23.76	0	0	0	0	0	0
1046	0	1.004	-24.75	0	0	247	2.8	267.87	3.037
1047	0	1.015	-10.89	0	0	275	13.2	298.24	14.315
1057	0	0.964	-53.31	0	0	273	106	296.07	114.96
1060	0	1.026	-5.20	0	0	4.9	38.8	5.314	42.079
1069	0	0.836	-32.48	0	0	329	133	356.8	144.24
1152	1	0.968	-39.64	160	105	4.8	0	5.206	0
1157	1	1.025	-22.10	220	194	0	0	0	0
1159	1	0.967	-32.58	130	60	0	0	0	0
1161	0	0.922	-39.24	0	0	0	0	0	0
1163	0	0.938	-47.49	0	0	-5	-3.8	-5.423	-4.121
1192	0	0.916	-44.28	0	0	157	43.3	170.27	46.959
1210	0	0.909	-45.54	0	0	1051	610	1139.8	661.55
1228	0	0.902	-40.28	0	0	89.9	38	97.497	41.211
1248	0	0.911	-45.45	0	0	129	70.6	139.9	76.566
2458	0	1.031	-5.01	0	0	451	129	489.11	139.9
2723	0	0.929	-51.54	0	0	10.3	6.8	11.17	7.375
2726	0	0.937	-48.13	0	0	0	0	0	0
2870	0	0.909	-56.59	0	0	61.8	22.4	67.022	24.293
Total:				10230.89	2193.09	9115.9	3006.4	9886.20	3260.44

As usinas (barras) que atingem o limite são Monte Claro (1159), Sepé Tiaraju (1152), Osório UG's 1 a 4 (919), Campos Novos (1157) e Itá (904), nesta ordem. Cabe mencionar que a barra 917 (Passo Fundo) tem a sua potência reativa gerada fixada no limite no caso base. Observa-se que $\alpha < 0$ para todas as barras com exceção da 904,

Tabela 4.15 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente do Sul 82 Barras - Caso 1

Barra	$V(pu)$	$V^*(pu)$	$Q_G(pu)$	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
1159	1.040	0.967	0.60	3.8037	-0.1153	-126.32	14.568	8.6710	-0.1304
1152	1.049	0.968	1.05	4.7984	-0.1077	-64.944	6.9912	9.2893	-0.1206
919	1.035	1.019	2.20	7.1470	-0.0607	-110.38	6.6951	16.488	-0.0646
1157	1.035	1.025	1.94	7.4293	-0.0313	-111.37	3.4822	31.984	-0.0323
904	1.035	1.035	4.50	8.4500	0.7117	1.0933	0.7781	-1.4052	0.4158

indicando que o ponto de intercâmbio de restrições QV desta barra corresponde a uma bifurcação estática induzida por limite. Por esta razão, o carregamento do sistema não pode ser elevado além deste ponto, o qual é instável. Pode-se notar também, que somente no caso desta barra, tanto $\frac{\partial \rho}{\partial V}$ quanto $\frac{\partial \rho}{\partial Q_g}$ são positivos, confirmando que o ponto é de bifurcação estática induzida por limites. Os demais pontos de intercâmbio de restrições QV são pontos de bifurcação dinâmica induzida por limite, visto que $\alpha < 0$.

A sensibilidade da potência reativa em relação à tensão ($\frac{\partial Q_g}{\partial V}$) é positiva para as barras 1159, 1152, 919 e 1157, ou seja, um incremento na geração de potência reativa nestas barras provoca uma elevação na tensão, o que caracteriza um comportamento estável, confirmando a classificação feita anteriormente. No caso da barra 904, $0 < \mu_{crit} < 1$, o que indica que o ponto de intercâmbio de restrições QV é instável. Nas demais barras $\mu_{crit} < 0$, confirmando que os correspondentes pontos de intercâmbio de restrições QV são estáveis.

As Figuras 4.11 e 4.12 mostram as curvas de fator de carregamento em relação a tensão e a potência reativa, respectivamente. Onde as barras 22, 27, 70, 71 e 72 se referem, respectivamente, às barras 904, 919, 1152, 1157 e 1159.

A análise da Figura 4.12 permite notar que a potência reativa da barra 904 varia mais acentuadamente com a variação do carregamento do que as demais barras. Observa-se ainda que esta é a última barra a atingir o limite de geração de potência reativa, pois quando o mesmo é alcançado o processo iterativo é finalizado. Ao se observar a Figura 4.11 percebe-se que conforme as barras atingem os correspondentes limites de potência reativa gerada a sua magnitude da tensão é degradada, com exceção da barra 904, pois o fator de máximo carregamento é alcançado ao mesmo tempo em que o limite de geração de potência reativa, e por

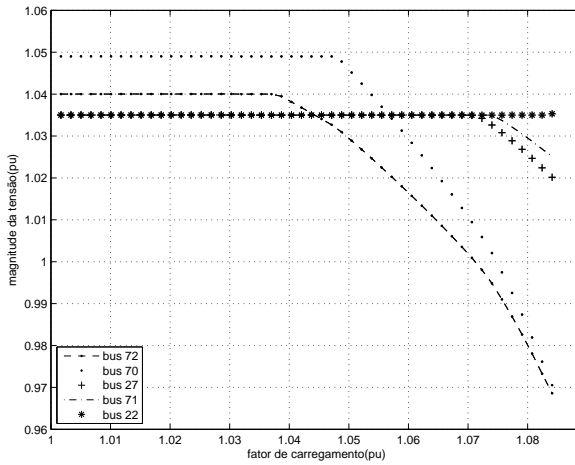


Figura 4.11 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 1

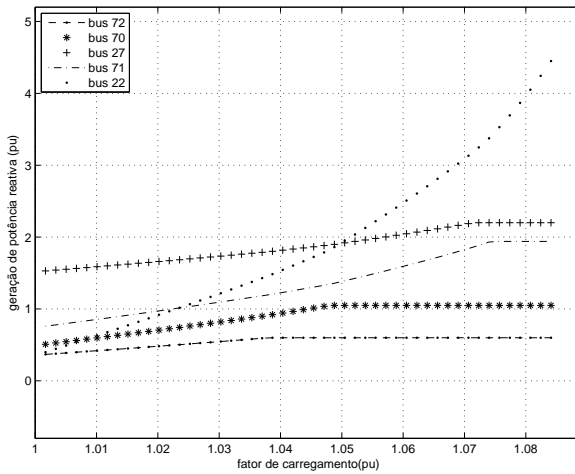


Figura 4.12 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 1

isso a magnitude da tensão desta barra permanece fixa no valor de referência.

4.3.3 Resultados das Simulações via Anarede - Caso 1

O fator de máximo carregamento encontrado pelo Anarede foi de 8,42; correspondendo a uma demanda máxima de 9883,61MW e 3259,58MVar. As Tabelas 4.16 e 4.17 apresentam, respectivamente, as principais informações referentes aos pontos de intercâmbio de restrições QV e o fluxo de potência no ponto de máximo carregamento encontrados pelo Anarede.

Tabela 4.16 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente Sul de 82 Barras via Anarede - Caso 1

Barra	V	V^*	Q_G	ρ
1159	1.040	0.968	60.0	4.06
1152	1.049	0.969	105.0	5.10
919	1.035	1.020	220.0	7.21
1157	1.035	1.025	194.0	8.29

Tabela 4.17 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Anarede - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^\circ$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.0	1970.9	105.6	0	0	0.0	0.0
67	0	0.856	-2.6	0.0	0.0	0.2	0	0.3	0.0
68	0	0.965	-2.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
112	0	0.996	-28.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
113	0	0.996	-28.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
122	1	1.051	-26.2	378.4	-63.9	0	0	0.0	0.0
125	0	1.045	-24.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
130	0	1.045	-24.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
556	1	1.012	-1.9	314.3	-85.9	0	0	0.0	0.0
800	1	1.020	-7.8	844.0	332.7	0.9	0	1.0	0.0
808	1	1.000	4.2	1000.0	11.8	2.4	0	2.6	0.0
810	1	1.035	-2.6	900.0	154.2	2.4	0	2.6	0.0
814	0	1.002	-31.5	0.0	0.0	161	65.5	174.6	71.0
816	0	0.987	-33.4	0.0	0.0	573	173	621.3	187.6
829	0	0.928	-30.9	0.0	0.0	68.1	51.7	73.8	56.1
831	0	0.934	-31.9	0.0	0.0	79.5	38.3	86.2	41.5
852	0	0.884	-21.5	0.0	0.0	24.5	49.9	26.6	54.1
856	0	1.023	-7.7	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
895	0	0.948	-28.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
896	0	1.025	-3.3	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
897	0	1.028	-1.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
904	1	1.035	-15.7	1000.0	446.4	2.5	0	2.7	0.0
911	1	1.025	-46.7	160.0	158.8	16	8	17.3	8.7
913	1	1.025	-47	180.0	190.4	18	9	19.5	9.8
915	1	1.014	-14.5	1000.0	150.8	1.8	0	2.0	0.0
917	1	0.893	-26.2	220.0	76.0	0	0	0.0	0.0
919	1	1.020	-3.9	720.0	220.0	1.2	0	1.3	0.0

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_{Dbase} (MW)	Q_{Dbase} (Mvar)	P_{Dmax} (MW)	Q_{Dmax} (Mvar)
921	1	1.035	-5.9	130.0	73.7	0.3	0	0.3	0.0
925	1	1.000	2.6	900.0	48.3	1.8	0	2.0	0.0
933	0	1.012	-13.2	0.0	0.0	0	-54.3	0.0	-58.9
934	0	1.018	-15.7	0.0	0.0	304	13.7	329.6	14.9
938	0	0.949	-34.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
939	0	0.976	-38.4	0.0	0.0	546	182	592.0	197.3
946	0	0.969	-31.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
947	0	0.964	-31.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
955	0	0.999	-24.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
956	0	0.987	-24.6	0.0	0.0	419	-21.8	454.3	-23.6
959	0	0.937	-29.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
960	0	0.989	-33.5	0.0	0.0	652	311	706.9	337.2
962	0	0.926	-41.4	0.0	0.0	282	69.9	305.7	75.8
963	0	0.922	-39.3	0.0	0.0	-85.8	44.5	-93.0	48.2
964	0	0.906	-36.8	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
965	0	0.949	-39.4	0.0	0.0	501	44.9	543.2	48.7
967	0	0.923	-58.0	0.0	0.0	91.9	48.4	99.6	52.5
973	0	0.971	-22.9	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
976	0	0.865	-42.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
979	0	0.869	-41.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
980	0	0.917	-43.7	0.0	0.0	486	179	526.9	194.1
985	0	0.949	-47.5	0.0	0.0	39	25.9	42.3	28.1
991	0	0.936	-42.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
992	0	0.957	-47.1	0.0	0.0	207	50.7	224.4	55.0
995	0	0.999	-20.8	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
999	0	1.017	-2.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1007	0	0.998	-52.7	0.0	0.0	33.1	61.3	35.9	66.5
1011	0	1.009	-50.4	0.0	0.0	41.4	-17.3	44.9	-18.8
1015	0	0.902	-43.0	0.0	0.0	133	6.1	144.2	6.6
1016	0	0.920	-48.7	0.0	0.0	390	182	422.8	197.3
1027	0	1.010	-4.4	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1028	0	1.036	-7.2	0.0	0.0	728	249	789.3	270.0
1030	0	1.003	-22.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1034	0	0.928	-53.7	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1035	0	0.935	-57.4	0.0	0.0	164	17.9	177.8	19.4
1041	0	0.883	-33.8	0.0	0.0	152	8	164.8	8.7
1045	0	0.986	-23.7	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1046	0	1.004	-24.7	0.0	0.0	247	2.8	267.8	3.0
1047	0	1.015	-10.9	0.0	0.0	275	13.2	298.2	14.3
1057	0	0.964	-53.2	0.0	0.0	273	106	296.0	114.9
1060	0	1.026	-5.2	0.0	0.0	4.9	38.8	5.3	42.1
1069	0	0.837	-32.4	0.0	0.0	329	133	356.7	144.2
1152	1	0.969	-39.6	160.0	0.0	4.8	0	5.2	0.0
1157	1	1.025	-22.1	220.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1159	1	0.968	-32.5	130.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1161	0	0.923	-39.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1163	0	0.939	-47.4	0.0	0.0	-5	-3.8	-5.4	-4.1
1192	0	0.917	-44.2	0.0	0.0	157	43.3	170.2	46.9
1210	0	0.910	-45.5	0.0	0.0	1051	610	1139.5	661.4
1228	0	0.903	-40.2	0.0	0.0	89.9	38	97.5	41.2
1248	0	0.912	-45.4	0.0	0.0	129	70.6	139.9	76.5
2458	0	1.031	-5.0	0.0	0.0	451	129	489.0	139.9
2723	0	0.930	-51.5	0.0	0.0	10.3	6.8	11.2	7.4
2726	0	0.937	-48.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
2870	0	0.910	-56.5	0.0	0.0	61.8	22.4	67.0	24.3

Devido ao fator de carregamento máximo encontrado pelo Anarede ser menor do que aquele obtido pelo algoritmo de identificação de barras críticas, utilizado na seção anterior, a barra 904 não chegou a atingir seu limite, mas seria a próxima barra caso se incrementasse um pouco mais a demanda deste sistema. As demais barras que atingem o limite de potência reativa são as mesmas encontradas na seção anterior, e a barra 917 já parte com a geração de potência reativa fixada no limite superior. Pode-se notar que o carregamento máximo obtido por este programa é superior ao encontrado pela última barra que atinge o seu limite de geração de potência reativa, além das tensões das barras

serem inferiores ao valor de referência, o que confirma a classificação do tipo de bifurcação destes pontos de intercâmbio de restrições como estáveis.

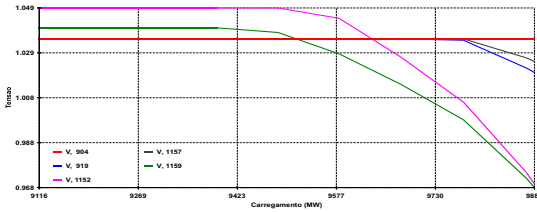


Figura 4.13 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede - Caso 1

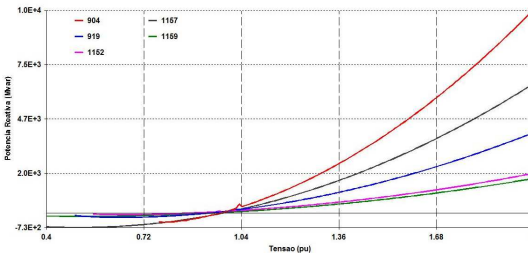


Figura 4.14 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $Q_G \times V$ - via Anarede - Caso 1

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam as curvas PV, QV e PQ, respectivamente, nas barras de geração cujo limite de potência reativa é alcançado. Nota-se que a barra 904, assim como na seção anterior, possui uma variação mais elevada da tensão em relação ao aumento de geração de potência reativa (Figura 4.14) e uma sensibilidade também mais elevada da potência reativa com a variação do carregamento do sistema (Figura 4.15). Esta barra não apresenta deterioração da tensão no ponto de máximo carregamento, conforme Figura 4.13, enquanto as demais não estão mais fixas no valor de referência, indicando que a classificação dos tipos de bifurcação destas barras como bifurcação dinâmica induzida por limites na seção anterior é coerente.

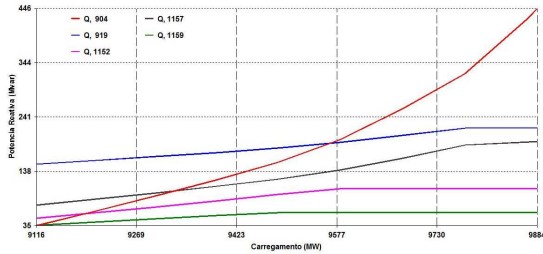


Figura 4.15 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - via Anarede - Caso 1

A Figura 4.16 mostra o comportamento da tensão de algumas barras de carga frente à maximização do carregamento do sistema. As barras 113, 939, 995, 1027, 1192, 1248 e 2723 foram escolhidas de forma aleatória para compor este gráfico.

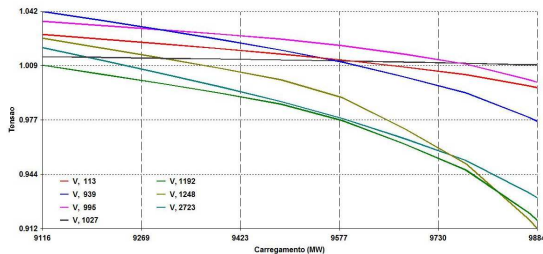


Figura 4.16 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede para as Barras de Carga - Caso 1

4.3.4 Resultados das Simulações via Flupot - Caso 1

Os resultados obtidos através do Flupot, para este sistema teste, foram um pouco diferentes. O máximo carregamento encontrado foi de 9,51MW, um pouco superior aos encontrados pelos demais métodos e, por isso, o número de barras que atingem o limite de potência reativa foi maior. Nas simulações das seções anteriores, 5 e 4 barras atingiram

o limite, respectivamente, enquanto nesta simulação foram 8 barras, conforme Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente Sul de 82 Barras via Flupot - Caso 1

Barra	V	V^*	Q_G
904	1.035	1.068	450.0
911	1.025	1.113	188.0
913	1.025	1.109	214.0
919	1.035	1.079	220.0
921	1.035	1.099	84.0
1152	1.049	1.041	105.0
1157	1.035	1.051	194.0
1159	1.040	1.037	60.0

Sabe-se que quando o ponto de intercâmbio de restrições QV é estável, é possível elevar-se o carregamento do sistema além do valor deste fator encontrado para barra que atinge o limite, e dessa forma, a tensão nesta barra deixa de ser fixa e começa a cair em relação ao valor de referência. Nota-se através da Tabela 4.18 que nenhuma barra está no valor de referência da tensão, indicando que o Flupot não encontrou nenhum ponto de bifurcação estática induzida por limites. Nestas simulações, além das usinas (barras) Monte Claro (1159), Sepé Tiaraju (1152), Osório UG's 1 a 4 (919), Campos Novos (1157) e Itá (904), as usinas (barras) J. Lacerda B (911), J. Lacerda C (913) e S. Osório UG's 5 e 6 (921) alcançaram o limite de geração de potência reativa. O resultado do fluxo de potência está contido na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 1

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.0	2056.9	32.8	0	0	0.0	0.0
67	0	0.857	-2.8	0.0	0.0	0.2	0	0.2	0.0
68	0	0.967	-2.8	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
112	0	1.008	-28.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
113	0	1.008	-28.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
122	1	1.050	-26.0	378.4	-198.4	0	0	0.0	0.0
125	0	1.031	-24.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
130	0	1.031	-24.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
556	1	1.012	-2.0	314.3	-93.3	0	0	0.0	0.0
800	1	1.020	-8.2	844.0	245.2	0.9	0	0.9	0.0
808	1	1.000	3.9	1000.0	-15.4	2.4	0	2.4	0.0
810	1	1.035	-2.9	900.0	93.0	2.4	0	2.4	0.0
814	0	1.016	-31.4	0.0	0.0	161	65.5	176.3	71.7
816	0	1.002	-33.3	0.0	0.0	573	173	627.4	189.4
829	0	0.944	-30.8	0.0	0.0	68.1	51.7	74.6	56.6
831	0	0.950	-31.8	0.0	0.0	79.5	38.3	87.0	41.9

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
852	0	0.965	-22.2	0.0	0.0	24.5	49.9	26.8	54.6
856	0	1.030	-8.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
895	0	0.959	-28.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
896	0	1.028	-3.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
897	0	1.031	-1.9	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
904	1	1.068	-16.3	1000.0	450.0	2.5	0	2.5	0.0
911	1	1.113	-46.0	160.0	188.0	16	8	17.5	8.8
913	1	1.109	-46.2	180.0	214.0	18	9	19.7	9.9
915	1	1.014	-14.9	1000.0	-38.1	1.8	0	1.8	0.0
917	1	0.976	-26.8	220.0	76.0	0	0	0.0	0.0
919	1	1.079	-6.4	720.0	220.0	1.2	0	1.2	0.0
921	1	1.099	-8.2	130.0	84.0	0.3	0	0.3	0.0
925	1	1.000	2.3	900.0	6.9	1.8	0	1.8	0.0
933	0	1.021	-13.5	0.0	0.0	0	-54.3	0.0	-54.3
934	0	1.036	-16.1	0.0	0.0	304	13.7	332.8	15.0
938	0	0.980	-34.3	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
939	0	1.012	-37.9	0.0	0.0	546	182	597.8	199.3
946	0	0.999	-31.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
947	0	0.994	-31.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
955	0	1.027	-24.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
956	0	1.014	-24.7	0.0	0.0	419	-21.8	458.8	-23.9
959	0	0.952	-29.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
960	0	1.007	-33.3	0.0	0.0	652	311	713.9	340.5
962	0	0.995	-40.1	0.0	0.0	282	69.9	308.8	76.5
963	0	0.994	-38.3	0.0	0.0	-85.8	44.5	-85.8	44.5
964	0	0.964	-36.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
965	0	1.013	-38.3	0.0	0.0	501	44.9	548.5	49.2
967	0	1.000	-55.6	0.0	0.0	91.9	48.4	100.6	53.0
973	0	1.004	-23.0	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
976	0	0.931	-40.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
979	0	0.934	-39.8	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
980	0	0.988	-42.0	0.0	0.0	486	179	532.1	196.0
985	0	0.994	-46.4	0.0	0.0	39	25.9	42.7	28.4
991	0	0.976	-41.3	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
992	0	1.003	-46.0	0.0	0.0	207	50.7	226.6	55.5
995	0	1.032	-21.1	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
999	0	1.018	-2.6	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1007	0	1.087	-51.1	0.0	0.0	33.1	61.3	36.2	67.1
1011	0	1.094	-49.2	0.0	0.0	41.4	-17.3	45.3	-18.9
1015	0	0.936	-42.3	0.0	0.0	133	6.1	145.6	6.7
1016	0	0.959	-47.6	0.0	0.0	390	182	427.0	199.3
1027	0	1.011	-4.5	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1028	0	1.037	-7.3	0.0	0.0	728	249	797.1	272.6
1030	0	1.028	-22.4	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1034	0	1.001	-51.9	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1035	0	1.012	-55.2	0.0	0.0	164	17.9	179.6	19.6
1041	0	0.969	-33.1	0.0	0.0	152	8	166.4	8.8
1045	0	1.020	-23.8	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1046	0	1.038	-24.8	0.0	0.0	247	2.8	270.4	3.0
1047	0	1.076	-12.6	0.0	0.0	275	13.2	301.1	14.5
1057	0	1.051	-51.5	0.0	0.0	273	106	298.9	116.1
1060	0	1.032	-5.5	0.0	0.0	4.9	38.8	4.9	38.8
1069	0	0.926	-31.7	0.0	0.0	329	133	360.2	145.6
1152	1	1.041	-38.5	160.0	105.0	4.8	0	4.8	0.0
1157	1	1.051	-22.3	220.0	194.0	0	0	0.0	0.0
1159	1	1.037	-32.5	130.0	60.0	0	0	0.0	0.0
1161	0	0.995	-38.2	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
1163	0	1.016	-45.9	0.0	0.0	-5	-3.8	-5.0	-3.8
1192	0	0.988	-42.7	0.0	0.0	157	43.3	171.9	47.4
1210	0	0.985	-43.5	0.0	0.0	1051	610	1150.7	667.9
1228	0	0.978	-39.0	0.0	0.0	89.9	38	98.4	41.6
1248	0	0.987	-43.5	0.0	0.0	129	70.6	141.2	77.3
2458	0	1.034	-5.2	0.0	0.0	451	129	493.8	141.2
2723	0	0.987	-50.0	0.0	0.0	10.3	6.8	11.3	7.4
2726	0	0.980	-46.9	0.0	0.0	0	0	0.0	0.0
2870	0	0.978	-54.4	0.0	0.0	61.8	22.4	67.7	24.5

4.3.5 Resultados das Simulações - Caso 2

Assim como para o Sistema Teste IEEE de 24 Barras, flexibilizou-se o limite de geração de potência reativa da barra 904 de 450MVar para 510MVar. O fator de máximo carregamento encontrado para este cenário foi de 9,16. Cabe mencionar que, assim como nas seções anteriores, foi necessário utilizar um método auxiliar para encontrar o máximo carregamento do sistema, visto que o algoritmo utilizado tem seu processo finalizado quando a última barra PV atinge seu limite de geração de potência reativa, já que o objetivo é identificar as barras críticas, não sendo possível, portanto, encontrar o máximo carregamento do sistema através dele.

Os parâmetros de máximo carregamento obtidos através dos Métodos da Continuação Convencional e da Aproximação Quadrática e programas comerciais Anarede e Flupot foram muito próximos daquele encontrado pelo algoritmo utilizado neste trabalho, cujos valores são 8,67; 8,59; 8,83 e 9,94; respectivamente. Estes resultados, assim como o número de iterações necessárias para encontrar a solução, são apresentados na Tabela 4.20. A Tabela 4.21 apresenta o resultado do fluxo de potência no ponto de máximo carregamento. Para este caso foi utilizado um programa de fluxo de potência ótimo (Método de Newton) para encontrar o fator de carregamento máximo.

Tabela 4.20 – Resumo dos Resultados de Máximo Carregamento Obtidos através dos Diferentes Métodos - Caso 2

Método	Fator de Carregamento (%)	Número de Iterações
Algoritmo Proposto	8,82	06
Método Direto (FLUPOT)	9,94	15
Fluxo de Potência Continuado (ANAREDE)	8,83	14
Método da Continuação Convencional	8,67	09
Aproximação Quadrática	8,59	04

Com a elevação do limite de geração de potência reativa da barra 904, esta barra, através do algoritmo proposto, não chega a atingir o limite, como pode ser visto na Tabela 4.22. Pode-se visualizar nesta tabela que as mesmas barras que atingiram o limite no primeiro cenário continuam alcançando este valor neste caso (1159, 1152, 919, 1157). Nesta simulação uma nova usina (barra) atinge seu limite, a qual é a UHE S. Osório UG's 5 e 6 (921).

Através das figuras de mérito usadas neste trabalho para classificar o tipo de bifurcação encontrado, conclui-se que o ponto de bi-

furção encontrado quando esta barra atinge o limite máximo de potência reativa é um ponto de bifurcação dinâmica induzida por limites. O fator de máximo carregamento da barra 921 é 8,816, porém o máximo carregamento do sistema é encontrado para $\rho = 9,16$, visto que, para este caso, é possível o aumento do carregamento do sistema além do fator máximo encontrado para barra. Pode-se chegar a esta conclusão através da observação de α e μ_{crit} , os quais são menores do que zero, indicando que o ponto de intercâmbio de restrições é estável. A relação de sensibilidade $\frac{\partial Q_g}{\partial V}$ é superior a 1, o que também indica que a barra PV é convertida em PQ sem a passagem por um ponto crítico.

Tabela 4.21 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo - Caso 2

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^\circ$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.00	2043.73	113.79	0	0	0.00	-326.05
67	0	0.856	-0.05	0.00	0.00	0.2	0	0.22	-263.71
68	0	0.965	-0.05	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
112	0	0.995	-0.50	0.00	0.00	0	0	0.00	-134.60
113	0	0.995	-0.50	0.00	0.00	0	0	0.00	-134.60
122	1	1.051	-0.47	378.40	-51.62	0	0	0.00	0.00
125	0	1.047	-0.43	0.00	0.00	0	0	0.00	-96.19
130	0	1.047	-0.43	0.00	0.00	0	0	0.00	-96.19
556	1	1.012	-0.04	314.30	-84.35	0	0	0.00	0.00
800	1	1.020	-0.14	844.00	337.35	0.9	0	0.98	0.00
808	1	1.000	0.07	1000.00	11.74	2.4	0	2.62	0.00
810	1	1.035	-0.05	900.00	155.83	2.4	0	2.62	0.00
814	0	1.001	-0.56	0.00	0.00	161	65.5	175.75	0.00
816	0	0.985	-0.59	0.00	0.00	573	173	625.50	0.00
829	0	0.925	-0.55	0.00	0.00	68.1	51.7	74.34	0.00
831	0	0.932	-0.57	0.00	0.00	79.5	38.3	86.78	0.00
852	0	0.883	-0.39	0.00	0.00	24.5	49.9	26.74	0.00
856	0	1.023	-0.14	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
895	0	0.947	-0.50	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
896	0	1.025	-0.06	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
897	0	1.028	-0.03	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
904	1	1.045	-0.28	1000.00	510.00	2.5	0	2.73	0.00
911	1	1.025	-0.83	160.00	160.61	16	8	17.47	0.00
913	1	1.025	-0.83	180.00	192.64	18	9	19.65	0.00
915	1	1.014	-0.26	1000.00	137.34	1.8	0	1.96	0.00
917	1	0.894	-0.47	220.00	76.00	0	0	0.00	0.00
919	1	1.019	-0.08	720.00	220.00	1.2	0	1.31	0.00
921	1	1.035	-0.11	130.00	74.81	0.3	0	0.33	0.00
925	1	1.000	0.04	900.00	46.92	1.8	0	1.96	0.00
933	0	1.011	-0.24	0.00	0.00	0	-54.3	0.00	0.00
934	0	1.018	-0.28	0.00	0.00	304	13.7	331.86	0.00
938	0	0.948	-0.61	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
939	0	0.974	-0.68	0.00	0.00	546	182	596.03	237.31
946	0	0.968	-0.56	0.00	0.00	0	0	0.00	-140.59
947	0	0.963	-0.56	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
955	0	1.000	-0.43	0.00	0.00	0	0	0.00	-150.14
956	0	0.988	-0.44	0.00	0.00	419	-21.8	457.39	0.00
959	0	0.936	-0.53	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
960	0	0.987	-0.60	0.00	0.00	652	311	711.74	0.00
962	0	0.930	-0.73	0.00	0.00	282	69.9	307.84	0.00
963	0	0.925	-0.70	0.00	0.00	-85.8	44.5	-93.66	0.00
964	0	0.910	-0.65	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
965	0	0.953	-0.70	0.00	0.00	501	44.9	546.91	0.00
967	0	0.920	-1.03	0.00	0.00	91.9	48.4	100.32	0.00
973	0	0.976	-0.41	0.00	0.00	0	0	0.00	-472.19
976	0	0.870	-0.74	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
979	0	0.874	-0.73	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
980	0	0.922	-0.77	0.00	0.00	486	179	530.53	0.00

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
985	0	0.946	-0.84	0.00	0.00	39	25.9	42.57	0.00
991	0	0.934	-0.75	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
992	0	0.954	-0.84	0.00	0.00	207	50.7	225.97	0.00
995	0	1.004	-0.37	0.00	0.00	0	0	0.00	-302.31
999	0	1.017	-0.05	0.00	0.00	0	0	0.00	-103.33
1007	0	0.997	-0.93	0.00	0.00	33.1	61.3	36.13	0.00
1011	0	1.009	-0.89	0.00	0.00	41.4	-17.3	45.19	0.00
1015	0	0.899	-0.76	0.00	0.00	133	6.1	145.19	0.00
1016	0	0.916	-0.86	0.00	0.00	390	182	425.74	0.00
1027	0	1.009	-0.08	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
1028	0	1.035	-0.13	0.00	0.00	728	249	794.71	0.00
1030	0	1.005	-0.40	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
1034	0	0.926	-0.95	0.00	0.00	0	0	0.00	42.86
1035	0	0.932	-1.02	0.00	0.00	164	17.9	179.03	0.00
1041	0	0.884	-0.60	0.00	0.00	152	8	165.93	0.00
1045	0	0.991	-0.42	0.00	0.00	0	0	0.00	-147.32
1046	0	1.009	-0.44	0.00	0.00	247	2.8	269.63	0.00
1047	0	1.014	-0.20	0.00	0.00	275	13.2	300.20	0.00
1057	0	0.964	-0.94	0.00	0.00	273	106	298.01	0.00
1060	0	1.026	-0.10	0.00	0.00	4.9	38.8	5.35	0.00
1069	0	0.836	-0.58	0.00	0.00	329	133	359.15	0.00
1152	1	0.974	-0.70	160.00	105.00	4.8	0	5.24	0.00
1157	1	1.026	-0.39	220.00	194.00	0	0	0.00	0.00
1159	1	0.971	-0.58	130.00	60.00	0	0	0.00	0.00
1161	0	0.926	-0.69	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
1163	0	0.941	-0.84	0.00	0.00	-5	-3.8	-5.46	0.00
1192	0	0.920	-0.78	0.00	0.00	157	43.3	171.39	0.00
1210	0	0.915	-0.80	0.00	0.00	1051	610	1147.30	326.87
1228	0	0.905	-0.71	0.00	0.00	89.9	38	98.14	0.00
1248	0	0.917	-0.80	0.00	0.00	129	70.6	140.82	0.00
2458	0	1.031	-0.09	0.00	0.00	451	129	492.32	0.00
2723	0	0.927	-0.91	0.00	0.00	10.3	6.8	11.24	4.13
2726	0	0.934	-0.85	0.00	0.00	0	0	0.00	0.00
2870	0	0.906	-1.00	0.00	0.00	61.8	22.4	67.46	9.86
Total:				10300.43	2260.06	9115.9	3006.4	9951.18	3281.87

Observa-se através do resultado do fluxo de potência (Tabela 4.21) que quando o máximo carregamento é encontrado, o limite da barra 904 novamente é atingido. No algoritmo de identificação das barras críticas utilizado neste estudo, este limite não chega a ser alcançado. Sabe-se que metodologias diferentes podem encontrar resultados diferentes dependendo da direção escolhida para o traçado da solução.

Tabela 4.22 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente do Sul 82 Barras - Caso 2

Barra	$V(pu)$	$V^*(pu)$	$Q_G(pu)$	ρ	α	$\frac{\partial \rho}{\partial V}$	$\frac{\partial \rho}{\partial Q_G}$	$\frac{\partial Q_g}{\partial V}$	μ_{crit}
1159	1.040	0.971	0.60	3.8028	-0.1153	-126.32	14.568	8.6710	-0.1304
1152	1.049	0.974	1.05	4.7984	-0.1077	-64.944	6.9912	9.2893	-0.1206
919	1.035	1.019	2.20	7.1463	-0.0607	-110.38	6.695	16.487	-0.0646
1157	1.035	1.026	1.94	7.4293	-0.0313	-111.37	3.4822	31.984	-0.0323
921	1.035	1.035	0.84	8.8163	-0.3144	-10.899	3.4267	3.1806	-0.4586

As Figuras 4.17 e 4.18 mostram as curvas de fator de carregamento versus tensão e potência reativa, respectivamente.

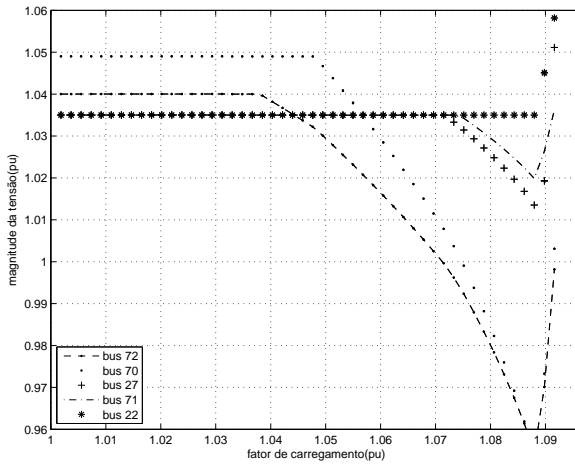


Figura 4.17 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - Caso 2

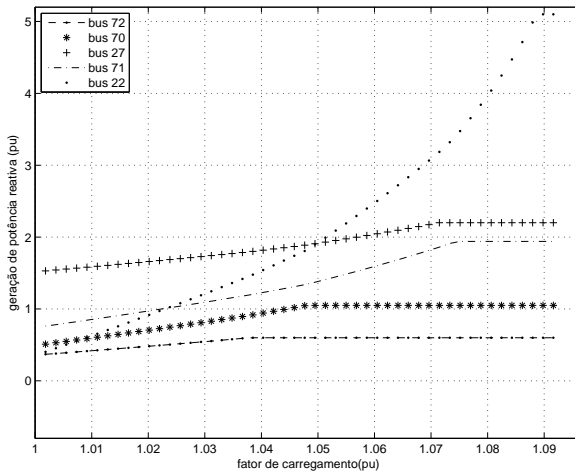


Figura 4.18 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - Caso 2

Analisando-se as figuras acima pode-se confirmar que o processo iterativo continua após o fator de máximo carregamento da barra 904 ser atingido, pois a tensão desta barra não está fixa no valor de referência (Figura 4.17) e a potência reativa se mantém por algumas iterações fixada no seu limite máximo (Figura 4.18). Assim, os pontos de intercâmbio de restrições QV são estáveis, portanto, para nenhuma barra deste sistema nesta condição, o ponto de bifurcação encontrado é um ponto de bifurcação estática induzida por limites. Nota-se também que após o limite da barra 921 ser atingido, as tensões das barras sofrem uma elevação.

4.3.6 Resultados das Simulações via Anarede - Caso 2

O resultado obtido através do Fluxo de Potência Continuado foi muito próximo daquele apresentado na seção anterior. O fator de máximo carregamento encontrado foi de 8,83, correspondendo a 9920,6MW e 3271,79MVar. Os dados correspondentes aos pontos de intercâmbio de restrições QV encontrado pelo Anarede são apresentados na Tabela 4.23, enquanto o resultados do fluxo de potência encontra-se na Tabela 4.24.

Tabela 4.23 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente Sul de 82 Barras via Anarede - Caso 2

Barra	V	V^*	Q_G	ρ
1159	1.040	0.968	60.0	4.06
1152	1.049	0.969	105.0	5.10
919	1.035	1.020	220.0	7.21
1157	1.035	1.025	194.0	8.29
921	1.035	1.035	84.0	8.83

Tabela 4.24 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Anarede- Caso 2

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.0	2019.7	131.2	0	0	0	0
67	0	0.856	-2.7	0	0	0.2	0	0.3	0
68	0	0.965	-2.7	0	0	0	0	0	0
112	0	0.993	-28.7	0	0	0	0	0	0
113	0	0.993	-28.7	0	0	0	0	0	0
122	1	1.051	-26.8	378.4	-29.0	0	0	0	0
125	0	1.049	-24.8	0	0	0	0	0	0
130	0	1.049	-24.8	0	0	0	0	0	0

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_{Dbase} (MW)	Q_{Dbase} (Mvar)	P_{Dmax} (MW)	Q_{Dmax} (Mvar)
556	1	1.012	-2.0	314.3	-82.8	0	0	0	0
800	1	1.020	-8.1	844	355.7	0.9	0	1	0
808	1	1.000	4.1	1000	18.9	2.4	0	2.6	0
810	1	1.035	-2.8	900	170	2.4	0	2.6	0
814	0	0.998	-32.1	0	0	161	65.5	175.2	71.3
816	0	0.982	-34.0	0	0	573	173	623.6	188.3
829	0	0.923	-31.5	0	0	68.1	51.7	74.1	56.3
831	0	0.929	-32.5	0	0	79.5	38.3	86.5	41.7
852	0	0.871	-22.1	0	0	24.5	49.9	26.7	54.3
856	0	1.022	-7.9	0	0	0	0	0	0
895	0	0.945	-28.7	0	0	0	0	0	0
896	0	1.024	-3.5	0	0	0	0	0	0
897	0	1.027	-1.7	0	0	0	0	0	0
904	1	1.035	-16.1	1000	503.5	2.5	0	2.7	0
911	1	1.025	-47.9	160	166.4	16	8	17.4	8.7
913	1	1.025	-48.2	180	199.6	18	9	19.6	9.8
915	1	1.014	-15.0	1000	187.5	1.8	0	2	0
917	1	0.878	-26.8	220	76	0	0	0	0
919	1	1.013	-4.2	720	220	1.2	0	1.3	0
921	1	1.035	-6.3	130	84.3	0.3	0	0.3	0
925	1	1.000	2.4	900	58	1.8	0	2	0
933	0	1.009	-13.5	0	0	0	-54.3	0	-59.1
934	0	1.015	-16.1	0	0	304	13.7	330.8	14.9
938	0	0.943	-35.2	0	0	0	0	0	0
939	0	0.968	-39.1	0	0	546	182	594.2	198.1
946	0	0.962	-32.2	0	0	0	0	0	0
947	0	0.957	-32.2	0	0	0	0	0	0
955	0	0.993	-24.6	0	0	0	0	0	0
956	0	0.981	-25.1	0	0	419	-21.8	456	-23.7
959	0	0.933	-30.1	0	0	0	0	0	0
960	0	0.984	-34.1	0	0	652	311	709.6	338.5
962	0	0.912	-42.4	0	0	282	69.9	306.9	76.1
963	0	0.907	-40.2	0	0	-85.8	44.5	-93.4	48.4
964	0	0.893	-37.6	0	0	0	0	0	0
965	0	0.935	-40.3	0	0	501	44.9	545.2	48.9
967	0	0.915	-59.2	0	0	91.9	48.4	100	52.7
973	0	0.966	-23.3	0	0	0	0	0	0
976	0	0.850	-43.0	0	0	0	0	0	0
979	0	0.854	-42.1	0	0	0	0	0	0
980	0	0.900	-44.7	0	0	486	179	528.9	194.8
985	0	0.939	-48.5	0	0	39	25.9	42.4	28.2
991	0	0.928	-42.8	0	0	0	0	0	0
992	0	0.947	-48.0	0	0	207	50.7	225.3	55.2
995	0	0.994	-21.3	0	0	0	0	0	0
999	0	1.016	-2.6	0	0	0	0	0	0
1007	0	0.993	-53.9	0	0	33.1	61.3	36	66.7
1011	0	1.006	-51.6	0	0	41.4	-17.3	45.1	-18.8
1015	0	0.894	-43.8	0	0	133	6.1	144.7	6.7
1016	0	0.910	-49.7	0	0	390	182	424.4	198.1
1027	0	1.009	-4.5	0	0	0	0	0	0
1028	0	1.035	-7.3	0	0	728	249	792.3	271
1030	0	0.998	-22.7	0	0	0	0	0	0
1034	0	0.920	-54.8	0	0	0	0	0	0
1035	0	0.926	-58.7	0	0	164	17.9	178.5	19.5
1041	0	0.867	-34.7	0	0	152	8	165.4	8.7
1045	0	0.981	-24.2	0	0	0	0	0	0
1046	0	0.999	-25.2	0	0	247	2.8	268.8	3
1047	0	1.008	-11.2	0	0	275	13.2	299.3	14.4
1057	0	0.959	-54.5	0	0	273	106	297.1	115.4
1060	0	1.025	-5.4	0	0	4.9	38.8	5.3	42.2
1069	0	0.821	-33.3	0	0	329	133	358	144.7
1152	1	0.952	-40.5	160	105	4.8	0	5.2	0
1157	1	1.019	-22.5	220	194	0	0	0	0
1159	1	0.953	-33.3	130	60	0	0	0	0
1161	0	0.908	-40.1	0	0	0	0	0	0
1163	0	0.928	-48.6	0	0	-5	-3.8	-5.4	-4.1
1192	0	0.903	-45.3	0	0	157	43.3	170.9	47.1
1210	0	0.892	-46.6	0	0	1051	610	1143.8	663.8
1228	0	0.887	-41.2	0	0	89.9	38	97.8	41.4
1248	0	0.893	-46.5	0	0	129	70.6	140.4	76.8
2458	0	1.030	-5.2	0	0	451	129	490.8	140.4
2723	0	0.920	-52.5	0	0	10.3	6.8	11.2	7.4
2726	0	0.928	-49.0	0	0	0	0	0	0
2870	0	0.900	-57.7	0	0	61.8	22.4	67.3	24.4

A diferença em relação ao resultado apresentado na seção anterior é que o processo iterativo não converge após o limite de geração de potência reativa da barra 921 ser atingido e, portanto, o processo iterativo é encerrado.

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 mostram o comportamento da tensão em relação ao carregamento e a potência reativa, e da potência reativa em relação ao carregamento, respectivamente. Na Figura 4.19 a curva PV das barras 904 e 921 estão sobrepostas. Pode-se observar que a tensão na barra 921, para o resultado obtido pelo Anarede, não apresenta modificação em relação ao valor de referência quando o máximo carregamento é atingido. Assim, no ponto de máximo carregamento, a tensão está fixa no valor de referência e a potência reativa está fixa no limite superior, além do fator de carga máximo encontrado para a barra ser o mesmo encontrado pelo sistema. Isto indica que este ponto pode ser um ponto de bifurcação estática induzida por limites, o que não foi encontrado na seção anterior através do algoritmo preditor corretor de identificação de barras críticas.

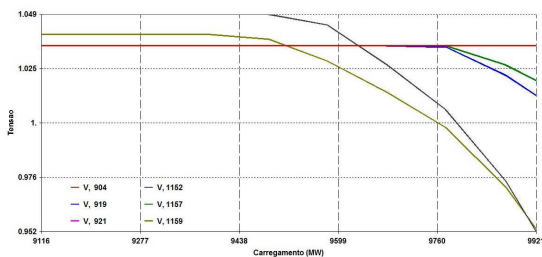


Figura 4.19 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede - Caso 2

A Figura 4.22 mostra a curva PV de algumas barras de carga. Esta curva praticamente não se altera com a flexibilização do limite superior de geração de potência reativa da usina de Itá (barra 904), então escolheu-se, novamente de forma aleatória, outras barras para apresentação desta curva, as quais são a 68 e a 897, cujas tensões não possuem uma variação muito significativa com a elevação do fator de carga, 979, 1011, 1069, cujo perfil de tensão é mais baixo do que nas demais barras mostradas, 1163 e 2870.

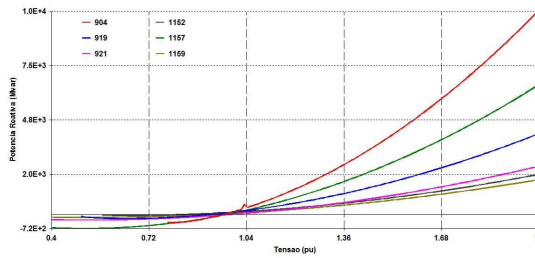


Figura 4.20 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $Q_G \times V$ - via Anarede - Caso 2

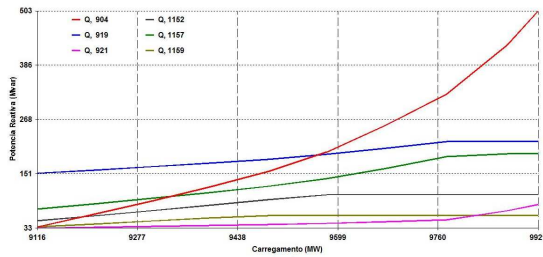


Figura 4.21 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times Q_G$ - via Anarede - Caso 2

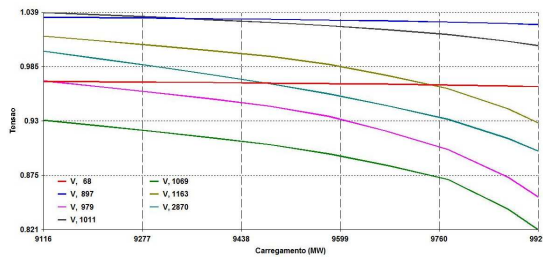


Figura 4.22 – Sistema Teste Equivalente Sul de 82 Barras: Curvas $\rho \times V$ - via Anarede para as Barras de Carga - Caso 2

4.3.7 Resultados das Simulações via Flupot - Caso 2

Os resultados obtidos pelo Flupot para este segundo cenário não diferem muito daqueles encontrados na seção 4.3.4. Os pontos de intercâmbio de restrições são os mesmos e as tensões das barras no ponto de máximo carregamento são superiores ao valor de referência. Porém, com a flexibilização do limite máximo de potência reativa gerada pela barra 904, o fator de máximo carregamento do sistema também aumenta ($\rho = 9,93$). Para este fator de máximo carregamento a carga correspondente é 10.105,9MW e 3319,81MVar. As Tabelas 4.25 e 4.26 mostram, respectivamente, os principais dados referentes aos pontos de intercâmbio de restrições QV e o resultado do fluxo de potência para o ponto de máximo carregamento do sistema.

Tabela 4.25 – Pontos de Intercâmbio de Restrições do Sistema Equivalente Sul de 82 Barras via Flupot - Caso 2

Barra	V	V^*	Q_G
904	1.035	1.0350	450.0
911	1.025	1.0250	188.0
913	1.025	1.0250	214.0
919	1.035	1.0350	220.0
921	1.035	1.0350	84.0
1152	1.049	1.0490	105.0
1157	1.035	1.0350	194.0
1159	1.040	1.0400	60.0

Tabela 4.26 – Resultado do Fluxo de Potência no Ponto de Carregamento Máximo via Flupot - Caso 2

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^\circ$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	$P_{D_{base}}$ (MW)	$Q_{D_{base}}$ (Mvar)	$P_{D_{max}}$ (MW)	$Q_{D_{max}}$ (Mvar)
65	2	0.994	0.0	2101.1	35.7	0	0	0	0
67	0	0.857	-2.9	0	0	0.2	0	0.2	0
68	0	0.967	-2.9	0	0	0	0	0	0
112	0	1.007	-28.3	0	0	0	0	0	0
113	0	1.007	-28.3	0	0	0	0	0	0
122	1	1.050	-26.4	378.4	-192.9	0	0	0	0
125	0	1.032	-24.3	0	0	0	0	0	0
130	0	1.032	-24.3	0	0	0	0	0	0
556	1	1.012	-2.1	314.3	-92.5	0	0	0	0
800	1	1.020	-8.4	844	246.6	0.9	0	0.9	0
808	1	1.000	3.8	1000	-16.4	2.4	0	2.4	0
810	1	1.035	-3.1	900	92.6	2.4	0	2.4	0
814	0	1.015	-31.7	0	0	161	65.5	177	72
816	0	1.001	-33.6	0	0	573	173	629.9	190.2
829	0	0.943	-31.2	0	0	68.1	51.7	74.9	56.8
831	0	0.949	-32.1	0	0	79.5	38.3	87.4	42.1
852	0	0.964	-22.6	0	0	24.5	49.9	26.9	54.9

Barra	Tipo	V (pu)	δ ($^{\circ}$)	P_G (MW)	Q_G (Mvar)	P_{Dbase} (MW)	Q_{Dbase} (Mvar)	P_{Dmax} (MW)	Q_{Dmax} (Mvar)
856	0	1.030	-8.2	0	0	0	0	0	0
895	0	0.959	-28.4	0	0	0	0	0	0
896	0	1.028	-3.7	0	0	0	0	0	0
897	0	1.031	-2.0	0	0	0	0	0	0
904	1	1.077	-16.7	1000	510	2.5	0	2.5	0
911	1	1.112	-46.4	160	188	16	8	17.6	8
913	1	1.108	-46.7	180	214	18	9	19.8	9
915	1	1.014	-15.2	1000	-51.2	1.8	0	1.8	0
917	1	0.976	-27.2	220	76	0	0	0	0
919	1	1.078	-6.7	720	220	1.2	0	1.2	0
921	1	1.098	-8.6	130	84	0.3	0	0.3	0
925	1	1.000	2.1	900	4.6	1.8	0	1.8	0
933	0	1.021	-13.7	0	0	0	-54.3	0	-54.3
934	0	1.036	-16.3	0	0	304	13.7	334.2	15.1
938	0	0.980	-34.6	0	0	0	0	0	0
939	0	1.012	-38.3	0	0	546	182	600.2	200.1
946	0	0.999	-31.8	0	0	0	0	0	0
947	0	0.994	-31.8	0	0	0	0	0	0
955	0	1.028	-24.5	0	0	0	0	0	0
956	0	1.015	-25.0	0	0	419	-21.8	460.6	-24
959	0	0.952	-29.8	0	0	0	0	0	0
960	0	1.006	-33.7	0	0	652	311	716.7	341.9
962	0	0.997	-40.5	0	0	282	69.9	310	76.8
963	0	0.996	-38.6	0	0	-85.8	44.5	-85.8	44.5
964	0	0.967	-36.3	0	0	0	0	0	0
965	0	1.015	-38.6	0	0	501	44.9	550.7	49.4
967	0	0.998	-56.1	0	0	91.9	48.4	101	53.2
973	0	1.008	-23.3	0	0	0	0	0	0
976	0	0.934	-40.8	0	0	0	0	0	0
979	0	0.937	-40.1	0	0	0	0	0	0
980	0	0.991	-42.2	0	0	486	179	534.3	196.8
985	0	0.993	-46.8	0	0	39	25.9	42.9	28.5
991	0	0.975	-41.7	0	0	0	0	0	0
992	0	1.001	-46.4	0	0	207	50.7	227.6	55.7
995	0	1.037	-21.4	0	0	0	0	0	0
999	0	1.018	-2.7	0	0	0	0	0	0
1007	0	1.086	-51.6	0	0	33.1	61.3	36.4	67.4
1011	0	1.093	-49.6	0	0	41.4	-17.3	45.5	-19
1015	0	0.934	-42.7	0	0	133	6.1	146.2	6.7
1016	0	0.957	-48.1	0	0	390	182	428.7	200.1
1027	0	1.010	-4.6	0	0	0	0	0	0
1028	0	1.036	-7.4	0	0	728	249	800.3	273.7
1030	0	1.030	-22.7	0	0	0	0	0	0
1034	0	1.000	-52.4	0	0	0	0	0	0
1035	0	1.010	-55.7	0	0	164	17.9	180.3	19.7
1041	0	0.969	-33.5	0	0	152	8	167.1	8.8
1045	0	1.024	-24.1	0	0	0	0	0	0
1046	0	1.043	-25.1	0	0	247	2.8	271.5	3
1047	0	1.075	-12.9	0	0	275	13.2	302.3	14.5
1057	0	1.050	-51.9	0	0	273	106	300.1	116.5
1060	0	1.033	-5.7	0	0	4.9	38.8	4.9	38.8
1069	0	0.925	-32.1	0	0	329	133	361.7	146.2
1152	1	1.044	-38.8	160	105	4.8	0	4.8	0
1157	1	1.052	-22.6	220	194	0	0	0	0
1159	1	1.039	-32.8	130	60	0	0	0	0
1161	0	0.997	-38.6	0	0	0	0	0	0
1163	0	1.017	-46.2	0	0	-5	-3.8	-5	-3.8
1192	0	0.990	-43.0	0	0	157	43.3	172.6	47.6
1210	0	0.989	-43.8	0	0	1051	610	1155.3	670.6
1228	0	0.980	-39.4	0	0	89.9	38	98.8	41.8
1248	0	0.990	-43.8	0	0	129	70.6	141.8	77.6
2458	0	1.034	-5.4	0	0	451	129	495.8	141.8
2723	0	0.985	-50.4	0	0	10.3	6.8	11.3	7.5
2726	0	0.979	-47.3	0	0	0	0	0	0
2870	0	0.976	-54.9	0	0	61.8	22.4	67.9	24.6

4.4 Método da Aproximação Quadrática

A curva PV é aproximadamente uma função quadrática e se torna exatamente quadrática nas proximidades do ponto de colapso de tensão, conforme mencionado anteriormente. O método da Aproximação Quadrática, como o próprio nome sugere, utiliza esta característica da curva PV para estimar o ponto crítico.

Para se fazer uma avaliação deste modelo, duas condições iniciais foram variadas, as quais são os fatores que mais interferem na qualidade do resultado obtido por este método. Estes parâmetros são o fator de carregamento inicial (ρ_0), o qual foi inicializado como zero nas simulações apresentadas anteriormente, e o tamanho do passo de crescimento da demanda ($\Delta\rho$), o qual foi definido como 0,01 nas seções anteriores.

4.4.1 Fator de Carregamento Inicial

Nas simulações apresentadas nas seções anteriores deste capítulo, foi utilizado um fator de carga nulo no início do processo iterativo, ou seja, $\rho_0 = 0$. Para o sistema teste IEEE de 118 barras, por exemplo, com este fator de carga inicial o resultado obtido é muito diferente, pois o máximo carregamento encontrado representa uma elevação da carga em torno de 62 por cento, o que é um valor elevado e, portanto, a condição inicial do problema está muito distante do ponto crítico. Assim, o método perde precisão, visto que a curva não é uma quadrática perfeita neste ponto de operação. Se colocarmos $\rho_0 = 10$, o resultado obtido é muito próximo daquele encontrado pelo método da continuação.

Para o sistema IEEE de 24 barras, o resultado obtido via método da continuação, no caso 1 (caso base), foi de 58,67 e através do método da aproximação quadrática, com $\rho_0 = 0$; 57,85. Se alterarmos ρ_0 para 30, por exemplo, o fator de máximo carregamento passa a ser 58,17, valor mais próximo do encontrado pelo método da continuação. No caso do sistema equivalente da região sul de 82 barras, para $\rho_0 = 0$, o valor do fator de carga encontrado pelo método da Aproximação Quadrática é 8,31, enquanto se definirmos $\rho_0 = 4$, aproximadamente metade do valor encontrado pelo método da continuação, o qual foi 8,44; o máximo carregamento do sistema é atingido para um fator de carga igual a 8,39.

Observa-se que, apesar de mais próximo do resultado obtido pelo

método da continuação, a modificação do resultado no sistema de 82 barras é menor, já que o fator de máximo carregamento encontrado é significativamente menor do que o encontrado no sistema de 24 barras. Assim, o ponto de operação inicial já estava mais próximo do ponto crítico, e dessa forma, o método é mais preciso mesmo para condição inicial imposta anteriormente (ρ_0).

Após esta análise se pode notar que o método é significativamente sensível as condições iniciais, sua precisão é dependente do ponto de operação inicial, visto que a curva PV é quadrática no ponto crítico, e aproximadamente uma quadrática nos pontos próximos a este. Quanto mais distante do ponto crítico as condições iniciais estiverem, um valor mais distante do valor exato do máximo carregamento é encontrado.

A Tabela 4.27 mostra um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 4.27 – Resultados obtidos via Método da Aproximação Quadrática - Variação de ρ_0

Sistema	$\rho_0 = 0$	$\rho_0 = 4$	$\rho_0 = 30$
IEEE 24 Barras	57,85	-	58,17
Equiv. Região Sul 82 Barras	8,31	8,39	-

4.4.2 Fator de Variação da Demanda

O fator de crescimento da carga utilizado nas simulações apresentadas nas seções anteriores foi de 1 por cento. De forma a avaliar a sensibilidade do método da Aproximação Quadrática em relação ao tamanho do passo com que é feito o crescimento da demanda, modificou-se este parâmetro tanto para um passo superior; 1,25 por cento; quanto inferior, para 0,9 por cento.

Para o sistema teste de 24 barras, quando elevou-se o fator de passo para 1,25 obteve-se um valor de fator de carga menor, o qual foi 46,08. Enquanto que reduzindo este parâmetro, encontrou-se $\rho = 64,11$. Já para o sistema equivalente sul, os resultados encontrados para $\Delta\rho = 0,0125$ e $\Delta\rho = 0,009$ foram 6,7 e 9,71; respectivamente. Portanto, quando o tamanho do passo de crescimento da demanda é elevado, obtém-se uma redução no fator de carregamento, e no caso contrário, quando o passo é reduzido, o fator de carregamento obtido é superior ao obtido nas simulações apresentadas anteriormente.

A Tabela 4.28 mostra um resumo dos resultados obtido com

Tabela 4.28 – Resumo dos Resultados obtidos via Método da Aproximação Quadrática com Variação de $\Delta\rho$

Sistema	$\Delta\rho = 0,0125$	$\Delta\rho = 0,01$	$\Delta\rho = 0,009$
IEEE 24 Barras	46,08	57,85	64,11
Equiv. Região Sul 82 Barras	6,70	8,31	9,71

os diferentes valores utilizados de $\Delta\rho$. Novamente se pode observar que este método, assim como a grande maioria dos métodos utilizados, é muito sensível à variação do tamanho de passo de crescimento da demanda.

4.5 Conclusões

Este capítulo mostrou os resultados obtidos das simulações realizadas, utilizando tanto o método proposto para encontrar o máximo carregamento, quanto o algoritmo preditor corretor para identificação das barras críticas, ambos apresentados no Capítulo 3. Para tal, foram utilizados dois sistemas testes, um sistema didático do IEEE e outro mais próximo do sistema real, sendo uma rede equivalente da região sul do país. Foram usados os resultados intermediários do processo iterativo do algoritmo preditor corretor para calcular os valores dos índices propostos para classificar o tipo de bifurcação encontrado e avaliar a estabilidade de tal ponto, os quais foram apresentados nos Capítulos 2 e 3. Esta classificação é importante porque o tipo de bifurcação encontrado, quando a barra atinge seu limite de geração de potência reativa, irá indicar se com o próximo incremento de carga o sistema manterá a estabilidade ou haverá um colapso de tensão imediatamente após esta elevação da carga.

Avaliou-se para cada método o desempenho computacional e a precisão do resultado obtido. Para fins de comparação, de forma a qualificar a resposta dos métodos, utilizou-se, além do método da continuação convencional e em alguns casos, do método de fluxo de potência ótimo (Método de Newton), dois programas computacionais usualmente empregados pelas empresas do setor elétrico, os quais são o Flupot e o Anarede, ambos desenvolvidos pelo CEPEL. A análise realizada em cada caso consistiu em se verificar quais barras atingem o limite de geração de potência reativa, o valor do máximo carregamento encontrado para cada barra e para o sistema como um todo, e o tipo

de bifurcação em tal ponto. Para verificar a eficiência dos índices se analisou, o máximo carregamento do sistema e o perfil de tensão da barra em questão. Para o método da aproximação quadrática também foi avaliado o desempenho do método frente a diferentes valores iniciais do parâmetro de carga e fatores de passo de crescimento da demanda, visto que o método se mostrou bastante sensível a estes parâmetros. Este último influencia os resultados da grande maioria dos métodos.

Por fim, cabe mencionar que não foram utilizadas as diversas modelagens de carga existentes e nem houve variação do fator de potência das barras no decorrer do processo iterativo. A modelagem da carga usada foi a de potência constante, modelo considerado o mais conservador e, portanto, analisou-se o pior caso possível. O usual nas empresas é mesclar os modelos de carga de acordo com a característica de carga de cada região, ou seja, é preciso uma avaliação mais detalhada de cada tipo de carga presente na rede elétrica sob estudo.

No próximo capítulo é feita uma avaliação dos resultados obtidos e ressaltados os aspectos mais relevantes do trabalho.

5 CONCLUSÕES

A finalidade deste trabalho é apresentar estratégias para identificar e classificar os pontos críticos de geração de potência reativa da rede, visto que atingir estes limites é um sinal de vulnerabilidade do sistema, diretamente associado aos problemas de estabilidade de tensão. A avaliação da estabilidade de tensão é de significativa importância, assim como a identificação das barras *fracas* do sistema sob o ponto de vista de estabilidade de tensão, nas etapas de planejamento e/ou operação, visto que estas barras são candidatas ao reforço frente a eventuais problemas de colapso de tensão. O estudo de formas alternativas de se identificar e classificar os pontos críticos de geração de potência reativa pode ser de grande importância na análise de ações de prevenção.

Ao longo dos dois primeiros capítulos deste trabalho foram apresentados os aspectos fundamentais relacionados ao problema da estabilidade de tensão, abordando os conceitos e as definições essenciais, além da teoria da bifurcação, a qual foi muito utilizada no decorrer deste texto. Nesta seção foram apresentadas as características gerais dos pontos de bifurcação, os conceitos teóricos e matemáticos, e as condições de transversalidade para cada tipo de bifurcação (Sela-Nó e Induzida por Limites).

Os dois métodos utilizados, um para encontrar o máximo carregamento e o outro para determinação dos pontos críticos do sistema, são apresentados no capítulo 3, assim como um dos índices utilizados para avaliação da estabilidade no ponto de intercâmbio de restrições QV. O método usado para estimar o ponto crítico se baseia na aproximação quadrática da curva PV, e a principal característica deste método é o rápido encontro da solução.

Para identificar as barras críticas da rede, utilizou-se um esquema preditor corretor, baseado nas equações do fluxo de potência em coordenadas retangulares. Na etapa de predição são resolvidos dois sistemas lineares, que utilizam informações de primeira e segunda ordem da expansão em série de Taylor. Isto aumenta a precisão dos resultados, pois a expansão em série de Taylor não possui termos superiores aos de segunda ordem na formulação em coordenadas retangulares. O cálculo do tamanho do passo do processo iterativo é feito de forma a assegurar que apenas a barra mais crítica tenha seu limite de geração de potência reativa atingido na etapa de correção.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos via simulação dos métodos propostos e dos programas computacionais usualmente uti-

lizados nas empresas do Setor Elétrico Brasileiro, de forma a se obter uma validação destas metodologias. Diversas curvas foram apresentadas para melhor visualização destes resultados, as quais foram as curvas PV, QV e PQ das barras de geração e em alguns casos também das barras de carga.

5.1 Considerações Finais

A avaliação do desempenho dos métodos propostos foi feita no capítulo 4, através das simulações de diversos casos para cada um dos dois sistemas teste utilizados. A análise destes resultados foi feita com base nos resultados obtidos das simulações com os programas comerciais Anarede e Flupot, além dos Métodos da Continuação Convencional e do Fluxo de Potência Ótimo. Cabe mencionar que as simulações realizadas nestes dois programas foram feitas considerando-se nos arquivos dos casos criados as mesmas condições dos algoritmos propostos, conforme descrito em detalhes na seção 4.1. Para cada sistema teste foram feitas simulações para dois casos, sendo o primeiro um caso base, e o segundo com a alteração do limite de geração de potência reativa da barra mais crítica, de forma a confirmar o resultado obtido anteriormente.

5.1.1 Método da Aproximação Quadrática

Os resultados obtidos para o método da Aproximação Quadrática foram satisfatórios em ambos sistemas teste. Porém, nota-se que para fatores de carregamentos reduzidos, como no caso do sistema teste equivalente da Região Sul de 82 Barras, o nível de precisão é maior. Isto ocorre devido à influência significativa das condições iniciais do sistema no processo iterativo. No caso deste sistema, o método se mostrou bastante eficiente sob o ponto de vista computacional, o que ocorreu devido ao ponto de operação do caso base estar mais próximo do ponto crítico, onde a curva PV se torna mais próxima de uma função quadrática perfeita.

Observou-se que este método é muito sensível às condições iniciais, o que pode causar a convergência do processo iterativo a valores errôneos. Conclui-se que a utilização deste método requer uma calibração individual para cada sistema.

Outro fator analisado foi a sensibilidade do método frente ao fator de variação da demanda, o que confirmou que o método também

é bastante sensível a este parâmetro.

5.1.2 Algoritmo Preditor Corretor

O algoritmo preditor-corretor mostrou-se preciso para o sistema de 24 barras. Os resultados obtidos para o sistema equivalente de 82 barras da Região Sul também foram satisfatórios. O método se mostrou bastante robusto e rápido para ambos os sistemas teste. O valor de fator de carregamento correspondente a cada barra foi muito semelhante àquele obtido pelo Anarede. Algumas diferenças foram observadas com relação à barra mais crítica, visto que o processo iterativo do programa Anarede se encerra antes da identificação da barra mais crítica.

Para o sistema teste de 24 barras, as barras críticas encontradas pelo Flupot foram muito semelhantes às obtidas pelo algoritmo proposto.

Já para o sistema de 82 barras, este programa identificou um número de barras críticas maior, não havendo nenhum ponto de bifurcação estática induzida por limites, como aquele encontrado pelo algoritmo proposto e confirmado pelos índices utilizados para esta finalidade. Deve ser observado que métodos diferentes podem assumir diferentes trajetórias para encontrar uma solução. Isto pode resultar em que os limites de geração de potência reativa de algumas barras sejam encontradas antes do limite da barra mais crítica, o que pode alterar a característica da solução determinada.

5.1.3 Índices de Estabilidade

O fato dos três índices utilizados para classificar o tipo de bifurcação no ponto de máximo carregamento conduzirem as mesmas conclusões sobre a classificação dos pontos de intercâmbio de restrições QV é importante na validação destes indicadores. Considerou-se portanto, satisfatórios os resultados obtidos pelo algoritmo preditor-corretor.

5.2 Contribuições da Dissertação

A contribuição mais importante deste trabalho foi a apresentação de uma metodologia alternativa para identificar e classificar os pontos críticos de geração de potência reativa. Foram testados dois métodos

presentes na literatura, comparando-os com programas computacionais bastante utilizados no dia a dia das empresas do setor, de forma a tratar o problema de uma forma mais prática.

O método da Aproximação Quadrática foi descrito na referência [26]. Porém, nesta dissertação, mais testes foram realizados, e as análises foram feitas de forma mais minuciosa, apontando vantagens e desvantagens do uso desta ferramenta. Identificaram-se alguns fatores que podem ser relevantes na qualidade de solução do método.

O algoritmo preditor corretor de identificação das barras críticas é uma modificação do Método da Continuação e se baseia também no método proposto por [13]. Este esquema se mostra bastante robusto e pode certamente auxiliar na solução deste tipo de problema.

Os indicadores de estabilidade no ponto de intercâmbio de restrições também são baseados nos índices apresentados na literatura, as quais são [1], [4] e [17]. Estes índices permitiram concluir com precisão sobre a classificação do tipo de bifurcação, que por sua vez é muito importante na análise de estabilidade de tensão.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

A abordagem apresentada neste texto mostrou-se uma alternativa satisfatória para auxiliar na análise da estabilidade de tensão nas áreas de planejamento da operação do sistema. Porém a melhoria destes métodos ainda pode ser estudada, conforme sugestões indicadas a seguir.

- Visando tornar a abordagem mais abrangente, este estudo pode ser estendido para considerar os modelos de carga alternativos, tais como a combinação potência constante e impedância constante, como normalmente é feito nos estudos realizados nas empresas do setor elétrico.
- A eficiência do processo iterativo de identificação e classificação dos pontos de intercâmbio de restrições QV pode ser aumentada, sob o ponto de vista computacional, através da formulação do fluxo de potência em coordenadas polares.
- O desenvolvimento de uma metodologia de identificação de pontos de bifurcação induzida por limites de fluxo de potência em linhas de intercâmbio permitiria verificar quais as linhas possuem uma influência mais acentuada no máximo carregamento do sistema.

- O uso do parâmetro μ_{crit} e o seu relacionamento com o escalar α , que são usados para classificar os pontos de operação sob o ponto de vista da estabilidade de tensão, na determinação de soluções preventivas e/ou corretivas para evitar tais pontos, seria de utilidade na análise deste tipo de problema.

REFERÊNCIAS

- [1] KATAOKA, Y.; SHINODA, Y. Voltage Stability Limit of Electric Power Systems with Generator Reactive Power Constraints Considered. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 951–962, Maio 2005.
- [2] IBA, K.; SUZUKI, H.; EGAWA, M.; WATANABE, T. Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 06, n. 2, p. 584–593, Maio 1991.
- [3] AJJARAPU, V.; CHRISTY, C. The Continuation Power Flow: A Tool for Steady State Voltage Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 416–423, Fevereiro 1992.
- [4] ECHAVARREN, F. M.; LOBATO, E.; ROUCO, L. Steady-State Analysis of the Effect of Reactive Generation Limits in Voltage Stability. *Electric Power System Research*, v. 79, p. 1292–1299, Abril 2009.
- [5] AJJARAPU, V. *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*. [S.l.]: Springer, 2006.
- [6] AFFONSO, C. de M.; SILVA, L. C. P. da; SILVA, L. J. da. Avaliação da Estabilidade de Tensão do Sistema Brasileiro - Um Caso de Estudo. *Controle e Automação*, v. 19, n. 03, p. 327–336, Julho 2007.
- [7] PAIVA, I. de Freitas Borges de. *Comportamento da Curva QV nas Barras da Região Crítica de um Sistema Elétrico*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- [8] SILVEIRA, C. da S. *Estudo de Máximo Carregamento em Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — USP, 2003.
- [9] O.N.S. *Operador Nacional do Sistema Elétrico*. Disponível em: <www.ons.org.br>.
- [10] PAN, X.; XU, G. Available Transfer Capability Calculation Considering Voltage Stability Margin. *Electric Power System Research*, v. 76, n. 1, p. 52–57, Julho 2005.

- [11] DOBSON, I.; LU, L. Voltage Collapse Precipitated by the Immediate Change in Stability when Generator Reactive Power Limits are Encountered. *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I Fundamental Theory and Applications*, v. 39, n. 9, p. 762–766, Setembro 1992.
- [12] YORINO, N.; KOEDA, K.; LI, H.; ZOKA, Y.; SASAKI, H. A new continuation power flow based on q-limit points. In: *IEEE. Circuits and Systems, 2004. MWSCAS'04. The 2004 47th Midwest Symposium on*. [S.l.], 2004. v. 2, p. II-341.
- [13] HISKENS, I.; CHAKRABARTI, B. Direct calculation of reactive power limit points. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 18, n. 2, p. 121–129, 1996.
- [14] YORINO, N.; LI, H.-Q.; SASAKI, H. A Predictor/corrector Scheme for Obtaining Q-Limit Points for Power Flow Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 2, p. 130–137, Fevereiro 2005.
- [15] SALGADO, R. de S. *Aspectos Estáticos do Controle de Sistemas de Potência*. 2007. Notas de Aula da Disciplina de Mestrado.
- [16] O.N.S. Submódulo 10.21 dos Procedimentos de Rede. 2012. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/procedimentos/index.aspx>>.
- [17] AVALOS, R. J.; CAÑIZARES, C. A.; MILANO, F.; CONEJO, A. J. Equivalency of Continuation and Optimization Methods to Determine Saddle-Node and Limit Induced Bifurcations in Power Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I Fundamental Theory and Applications*, v. 56, n. 1, p. 210–223, Janeiro 2009.
- [18] MOHN, F. W.; SOUZA, A. C. Z. de. Tracing PV and QV Curves with the Help of a CRIC Continuation Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, p. 1115–1122, Agosto 2006.
- [19] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: Mc Graw-Hill, Inc, 1994.
- [20] MILLER, T. J. E. *Reactive Power Control in Electric Systems*. [S.l.]: John Miley e Sons, 1982.

- [21] DOBSON, I. The Irrelevance of Load Dynamics for the Loading Margin to Voltage Collapse and its Sensitivities. *Bulk Power System Voltage Phenomena - III: Voltage Stability, security and control*, Agosto 1994.
- [22] CAÑIZARES, C. A.; ALVARADO, F. L. Point of Collapse and Continuation Methods for Large ac/dc Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 08, n. 1, p. 1–8, Fevereiro 1993.
- [23] SALGADO, R. S.; ZEITUNE, A. F. Um Estudo do Método da Continuação Formulado em Coordenadas Cartesianas. In: SBA. *SBSE*. Belo Horizonte, 2008. p. 1–6.
- [24] CAÑIZARES, C. A.; MITHULANANTHAN, N.; BERIZZI, A.; REEVE, J. On the Linear Profile of Indices for the Prediction of Saddle-Node and Limit-Induced Bifurcation Points in Power Systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I Fundamental Theory and Applications*, v. 50, n. 12, p. 1588–1595, Dezembro 2003.
- [25] LI, H.; YORINO, N.; SASAKI, H. Assessment of q limit induced and saddle node bifurcations based on a constrained optimization method.
- [26] PAMA, A.; RADMAN, G. A New Approach for Estimating Voltage Collapse Point Based on Quadratic Approximation of PV-Curves. *Electric Power System Research*, v. 79, p. 653–659, Novembro 2009.
- [27] SEYDEL, R. *Practical Bifurcation and Stability Analysis - From Equilibrium to Chaos*. [S.l.]: Elsevier Science Ltd, 1988.
- [28] SALGADO, R. S.; ZEITUNE, A. F. A framework to study critical loadability solutions. In: *Proceedings of the IEEE PowerTech Conference*. Trondheim - Norway: [s.n.], 2011.
- [29] AYASUN, S.; NWANKPA, C.; KWATNY, H. G. Computation of singular and singularity induced bifurcation points of differential-algebraic power system model. *IEEE Transactions on Circuits and Systems - I Fundamental Theory and Applications*, v. 51, n. 8, p. 1525–1538, August 2004.
- [30] ELETROBRÁS/CEPEL. Manual de Usuário do Programa de Análise de Redes (ANAREDE) V08. *Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 2003.

- [31] ELETROBRÁS/CEPEL. Manual de Usuário do Programa de Fluxo de Potência Ótimo (FLUPOT) V6.1. *Rio de Janeiro, RJ, Brasil*, 2005.
- [32] WU, Y. C.; DEBS, A. S.; MARSTEN, R. E. A direct nonlinear predictor corrector primal dual interior point algorithm for optimal power flows. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 2, p. 876–883, Mai 1994.
- [33] GRANVILLE, S. Optimal reactive dispatch through interior point methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 9, n. 1, p. 136–146, Fev 1994.
- [34] IEEE-TASK-FORCE. The IEEE reliability test system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 14, n. 3, p. 1010–1020, August 1999.
- [35] STAGG, G. W.; EL-ABIAD, A. H. *Computer Methods in Power Systems Analysis*. [S.l.]: McGraw-Hill New-York, 1968.
- [36] GUEDES, M. R. *Coordenadas Polares versus Coordenadas Retangulares no Cálculo do Ponto de Máximo Carregamento em Sistemas Elétricos de Potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.

APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA

A modelagem do Método da Continuação utilizando as equações do fluxo de potência em coordenadas retangulares permite estimar de forma mais precisa as injeções de potência reativa originadas das variações da tensão complexa, [23]. Quando a tensão é escrita na forma retangular, pode-se escrever as equações das injeções de potência na forma quadrática, o que permite controlar a magnitude dos incrementos durante o processo iterativo, evitando a divergência e monitorando os limites de geração. Além disso, pode-se utilizar os resultados intermediários obtidos do fluxo de potência para se fazer um redespacho de potência ativa, permitindo aumentar a margem de carregamento do sistema.

O problema de fluxo de potência pode ser resolvido utilizando-se um conjunto de equações não lineares para expressar as potências ativa e reativa em função das tensões de barra, dessa forma, para a barra i tem-se, [5]:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (\text{A.1})$$

Onde V_i e I_i são os fasores da tensão nodal e a injeção líquida da corrente na barra i , a qual é dada por:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{A.2})$$

Sendo n o número de barras da rede. Substituindo (A.2) em (A.1):

$$(P_i + jQ_i)^* = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (\text{A.3})$$

Substituindo-se $V_i = e_i + jf_i$ na equação (A.3), obtém-se:

$$P_i - jQ_i = (e_i - jf_i) \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij}) (e_j + jf_j) \quad (\text{A.4})$$

Separando as partes real e imaginária são obtidas as equações para as potências ativa e reativa em coordenadas retangulares, conforme equação (A.5)

$$\begin{aligned}
P_i &= \sum_{j=1}^n e_i (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\
Q_i &= \sum_{j=1}^n f_i (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + e_i (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)
\end{aligned} \tag{A.5}$$

As equações dos desbalanços de potência são dadas por:

$$\begin{aligned}
P_{G_i}^{esp} - P_{D_i}^{esp} - P_i(e, f) &= \Delta P_i \\
Q_{G_i}^{esp} - Q_{D_i}^{esp} - Q_i(e, f) &= \Delta Q_i \\
V_i^{esp^2} - e_i^2 - f_i^2 &= \Delta V_i
\end{aligned} \tag{A.6}$$

Assim,

$$\begin{aligned}
\Delta P_i &= P_i^{esp} - \sum_{j=1}^n e_i (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\
\Delta Q_i &= Q_i^{esp} - \sum_{j=1}^n f_i (G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + e_i (G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) \\
\Delta V_i &= V_i^{esp^2} - (e_i^2 + f_i^2)
\end{aligned} \tag{A.7}$$

Onde a máxima magnitude desses desbalanços ($|\Delta P_i|$, $|\Delta Q_i|$, $|\Delta V_i|$) deve satisfazer uma tolerância pré especificada, a qual, geralmente, é menor ou igual a 10^{-3} pu.

A matriz admitância de barra e o vetor das tensões nodais expressos na forma retangular são dados por:

$$Y_b = G + jB \tag{A.8}$$

$$V_b = e + jf \tag{A.9}$$

Onde G e B são as matrizes das condutâncias e susceptâncias ($n \times n$), respectivamente, da matriz admitância de barras, enquanto e e f são vetores $n \times 1$ compostos, respectivamente, pelas partes real e imaginária da tensão complexa, assim, o vetor das injeções das correntes nas barras (I_b), pode ser reescrito conforme mostrado na equação (A.10).

$$\begin{aligned}
I_b &= Y_b V_b \\
I_b &= (G + jB)(e + jf) \\
&= (Ge - Bf) + j(Be + Gf) \\
&= I_e + jI_f
\end{aligned} \tag{A.10}$$

Sendo, portanto, $I_e = (Ge - Bf)$ e $I_f = (Be + Gf)$, os quais são vetores de ordem $n \times 1$, cujos componentes são as partes real e imaginária da injeção de corrente nodal, e onde Y_b é a matriz admitância de barra, V_b é o vetor das tensões nodais. A equação (A.10) na forma matricial é dada por:

$$\begin{bmatrix} I_e \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \quad (\text{A.11})$$

Através da forma matricial acima pode-se observar a natureza linear da relação entre as partes real e imaginária das injeções nodais de corrente com as partes real e imaginária da tensão complexa nas barras.

A potência aparente de barra expressa na forma retangular é dada por:

$$S_b(e, f) = D_v I_b^* \quad (\text{A.12})$$

Sendo $D_v = D_e + jD_f$ uma matriz diagonal, cujos elementos são as tensões nodais complexas na forma retangular, onde D_e e D_f são matrizes diagonais cujos elementos não nulos são as partes real e imaginária das tensões complexas, respectivamente.

Substituindo os termos I_e e I_f na equação (A.12) obtém-se:

$$\begin{aligned} S_b(e, f) &= (D_e + jD_f)(I_e - jI_f) \\ &= (D_e I_e + D_f I_f) + j(D_f I_e - D_e I_f) \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

E desde que $S_b(e, f) = P(e, f) + jQ(e, f)$,

$$\begin{aligned} P(e, f) &= D_e I_e + D_f I_f \\ &= D_e (Ge - Bf) + D_f (Be + Gf) \\ &= D_e Ge - D_e Bf + D_f Be + D_f Gf \\ Q(e, f) &= D_f I_e - D_e I_f \\ &= D_f (Ge - Bf) - D_e (Be + Gf) \\ &= D_f Ge - D_f Bf - D_e Be - D_e Gf \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

Na forma matricial, as equações (A.14) são expressas por:

$$\begin{aligned}
 P(e, f) &= \begin{bmatrix} D_e & D_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} \\
 Q(e, f) &= \begin{bmatrix} -D_e & D_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & G \\ G & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{A.15}$$

Dessa forma, as equações (A.7) podem ser reescritas como:

$$\begin{aligned}
 P^{esp} - P(e, f) &= 0 \\
 P^{esp} - \begin{bmatrix} D_e & D_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G & -B \\ B & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} &= 0 \\
 Q^{esp} - Q(e, f) &= 0 \\
 Q^{esp} - \begin{bmatrix} -D_e & D_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & G \\ G & -B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} &= 0 \\
 V^{esp^2} - (e_i^2 + f_i^2) &= 0 \\
 V^{esp^2} - \begin{bmatrix} D_e & D_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} &= 0
 \end{aligned} \tag{A.16}$$

Onde os vetores P^{esp} , Q^{esp} e V^{esp} representam os valores especificados das injeções de potência ativa e reativa e magnitude das tensões, respectivamente.

A representação destas equações (A.16) na forma quadrática permite observar a natureza quadrática das equações que expressam a potência complexa em função da tensão nodal na forma retangular, tal que (A.16) pode ser reescrita na forma compacta como:

$$g_0(x) = \frac{1}{2}x^t Q_0 x \tag{A.17}$$

Sendo Q_0 um arranjo tridimensional. Assim, as equações do fluxo de potência podem ser reescritas na forma compacta por:

$$g(x) = y_s - g_0(x) = 0 \tag{A.18}$$

Onde y_s é o vetor das grandezas especificadas, as quais são as injeções de potências ativa (barras PV e PQ) e reativa (barras PQ), além da magnitude de tensão nodal (barras PV), quando estas equações são formuladas em coordenadas retangulares.

As equações do fluxo de potência em regime permanente, as quais são parametrizadas, possibilitando a determinação do ponto de máximo carregamento, são expressas por:

$$\begin{aligned} P_g - (P_d^0 + \rho \Delta P_d) - P(e, f) &= 0 \\ Q_g - (Q_d^0 + \rho \Delta Q_d) - Q(e, f) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

Onde P_g e Q_g são os vetores que representam as potências ativa e reativa, respectivamente, P_d^0 e Q_d^0 são as demandas de potência ativa e reativa no caso base, enquanto ΔP_d e ΔQ_d representam a variação da demanda de potência ativa e reativa. Os componentes real e imaginário das tensões nodais que compõem o vetor V_b são representados por e e f , respectivamente. E o parâmetro de carga é dado por ρ .

As equações parametrizadas do fluxo de potência podem ser expressas pela forma compacta dada por (A.20):

$$g(x, \rho) = y_s(\rho) - g_0(x) = 0 \quad (\text{A.20})$$

Onde y_s é o vetor das grandezas parametrizadas e é dado por:

$$y_s(\rho) = y_0 + \rho \Delta y \quad (\text{A.21})$$

Sendo y_0 e Δy vetores da demanda base e das variações de carga pré-especificadas, respectivamente, e $g_0(x)$ é um vetor de funções não lineares do vetor das variáveis de estado x . Utilizando-se a equação (A.17) obtém-se:

$$y_s(\rho) - \frac{1}{2} x^t Q_0 x = 0 \quad (\text{A.22})$$

Assim, o conjunto de equações do fluxo de potência em coordenadas retangulares, expresso em termos da equação (A.21), é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} g(x, \rho) = 0 \rightarrow \begin{cases} P_{g_i} - (P_{d_i}^0 + \rho \Delta P_{d_i}) - P_i(e, f) = 0 & (\text{Barras PV e PQ}) \\ Q_{g_i} - (Q_{d_i}^0 + \rho \Delta Q_{d_i}) - Q_i(e, f) = 0 & (\text{Barras PQ}) \\ V_i^{esp^2} - e_i^2 - f_i^2 = 0 & (\text{Barras PV}) \end{cases} \quad (\text{A.23}) \\ h(x, \rho) \geq 0 \rightarrow Q_{g_i}^m \leq Q_{g_i} \leq Q_{g_i}^M \quad (\text{Barras PV}) \end{aligned}$$

Ou, através da equação (A.17), obtém-se:

$$\begin{aligned} g(x, \rho) = 0 \rightarrow \begin{cases} y_p(\rho) - \frac{1}{2} x^t Q_p x = 0 & (\text{Barras PV e PQ}) \\ y_q(\rho) - \frac{1}{2} x^t Q_q x = 0 & (\text{Barras PQ}) \\ y_v(\rho) - \frac{1}{2} x^t Q_v x = 0 & (\text{Barras PV}) \end{cases} \quad (\text{A.24}) \\ h(x, \rho) \geq 0 \rightarrow y_q(\rho) - \frac{1}{2} x^t H_q x \quad (\text{Barras PV}) \end{aligned}$$

Esta formulação resulta em um conjunto de equações não lineares com duas equações para cada barra do sistema, [35]. As potências ativa

(P_{g_i}) e reativa (Q_{g_i}) são conhecidas, enquanto as componentes real e imaginária da tensão e_i e f_i , respectivamente, são desconhecidas para todas as barras com exceção da barra de folga, resultando em $2(n-1)$ equações a serem resolvidas para solucionar o problema de fluxo de potência, [35].

A.1 MATRIZ JACOBIANA

Para solução do fluxo de potência através do método de Newton Raphson é necessário formar um conjunto de equações lineares que expresse a relação entre as variações da potência ativa e reativa e os componentes da tensão de barra, conforme mostrado a seguir, [35]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (\text{A.25})$$

Onde a matriz $\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix}$ é matriz Jacobiana do fluxo de potência, cujos elementos são dados por:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_{n-1} \\ \text{---} \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial e_{n-1}} & | & \frac{\partial P_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & | & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial P_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \\ \text{---} & \text{---} & \text{---} & | & \text{---} & \text{---} & \text{---} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial e_{n-1}} & | & \frac{\partial Q_1}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial f_{n-1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & | & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial e_{n-1}} & | & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_1} & \cdots & \frac{\partial Q_{n-1}}{\partial f_{n-1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \vdots \\ \Delta e_{n-1} \\ \text{---} \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{n-1} \end{bmatrix} \quad (\text{A.26})$$

As equações para determinar os elementos do Jacobiano são as derivadas das equações de fluxo de potência das barras, conforme mostrado a seguir, [35].

A equação do fluxo de potência ativa, de acordo com a equação (A.5) é a que segue:

$$\begin{aligned} P_i &= e_i (e_i G_{ii} + f_i B_{ii}) + f_i (f_i G_{ii} - e_i B_{ii}) \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [e_i (e_j G_{ij} + f_j B_{ij}) + f_i (f_j G_{ij} - e_j B_{ij})] \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

$$i = 1, 2, \dots, n-1$$

Diferenciando-se a equação acima encontra-se:

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial e_j} = e_i G_{ij} - f_i B_{ij} \quad \text{para } j \neq i \quad (\text{A.28})$$

$$H_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial e_i} = 2e_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} + f_j B_{ij}) \quad (\text{A.29})$$

$$N_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial f_j} = e_i G_{ij} + f_i B_{ij} \quad \text{para } j \neq i \quad (\text{A.30})$$

$$N_{ii} = \frac{\partial P_i}{\partial f_i} = 2f_i G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (f_j G_{ij} - e_j B_{ij}) \quad (\text{A.31})$$

A equação do fluxo de potência reativa, de acordo com a equação (A.5) é a que segue:

$$\begin{aligned} Q_i &= f_i (e_i G_{ii} + f_i B_{ii}) - f_i (f_i G_{ii} - e_i B_{ii}) \\ &+ \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n [f_i (e_j G_{ij} + f_j B_{ij}) - e_i (f_j G_{ij} - e_j B_{ij})] \end{aligned} \quad (\text{A.32})$$

$i = 1, 2, \dots, n - 1$

Diferenciando-se a equação (A.32) encontra-se:

$$J_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial e_j} = e_i G_{ij} + f_i B_{ij} \quad \text{para } j \neq i \quad (\text{A.33})$$

$$J_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial e_i} = 2e_i B_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (f_j G_{ij} - e_j B_{ij}) \quad (\text{A.34})$$

$$L_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial f_j} = -e_i G_{ij} + f_i B_{ij} \quad \text{para } j \neq i \quad (\text{A.35})$$

$$L_{ii} = \frac{\partial Q_i}{\partial f_i} = 2f_i B_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (e_j G_{ij} + f_j B_{ij}) \quad (\text{A.36})$$

No caso da formulação do fluxo de potência em coordenadas retangulares o módulo da tensão não é uma variável explícita, sendo necessário equações adicionais para representar as restrições de tensão

nas barras de tensão controlada PV, [36]. Conforme equação (A.7):

$$\Delta V_i = V_i^{esp^2} - (e_i^2 + f_i^2) \quad (\text{A.37})$$

Diferenciando-se a equação acima, obtém-se:

$$K_{ij} = \frac{\partial V_i^2}{\partial e_j} = 0 \quad (\text{A.38})$$

$$K_{ii} = \frac{\partial V_i^2}{\partial e_i} = 2e_i \quad (\text{A.39})$$

$$M_{ij} = \frac{\partial V_i^2}{\partial f_j} = 0 \quad (\text{A.40})$$

$$M_{ii} = \frac{\partial V_i^2}{\partial f_i} = 2f_i \quad (\text{A.41})$$

Assim, o sistema de equações a ser resolvido torna-se:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \\ K & M \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} \quad (\text{A.42})$$

APÊNDICE B - MÉTODO DA CONTINUAÇÃO

Se um sistema está operando estável para um determinado caso de carregamento base, o montante adicional de carga que poderia causar o colapso de tensão é denominado margem de carregamento [10]. Esta margem de carregamento pode ser determinada através do Método da Continuação.

O Método da Continuação é baseado em um esquema preditor-corretor para encontrar o caminho da solução do conjunto de equações do fluxo de potência, incluindo nestas equações um parâmetro de carga [3]. O processo se inicia de uma solução conhecida e usa uma tangente preditora para estimar a solução subsequente correspondente para um valor diferente do parâmetro de carga [3]. Esta estimativa é, por fim, corrigida usando o método de Newton Raphson utilizado no fluxo de potência convencional [3]. A etapa de predição é importante, pois fornece uma boa estimativa de solução, mais próxima do ponto de bifurcação, de forma a facilitar o processo de convergência da etapa de correção, a qual fornece, por fim, a solução desejada. A Figura B.1 retrata este processo de solução.

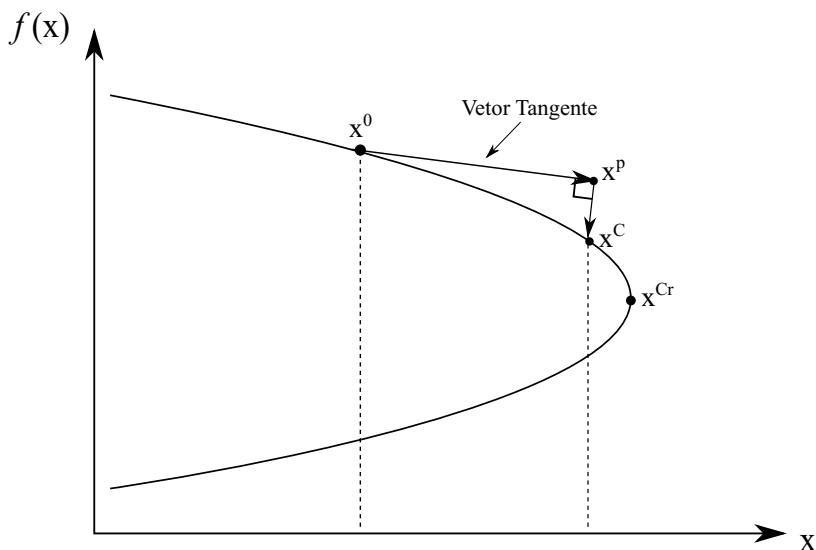


Figura B.1 – Esquema Predição Correção

As referências [2] [3] [22] [23] [17] [18] [5] e [15] abordam a formulação matemática e os principais conceitos relacionados ao Método da Continuação.

B.1 ETAPA DE PREDIÇÃO

Se a solução para o caso base, $\rho = 0$, foi encontrada, pode-se fazer a predição da próxima solução utilizando um tamanho de passo adequado na direção tangente ao caminho da solução, [3].

Esta etapa é baseada nas relações de sensibilidade entre as variáveis x e o parâmetro de carga ρ [15]. Os incrementos Δx , os quais estão associados à uma variação incremental $\Delta\rho$, são obtidos através da expansão em série de Taylor, até o termo de primeira ordem, do conjunto de equações $g(x, \rho) = 0$ no ponto (x^k, ρ^k) , ao longo da direção predita [15], conforme equação (B.1):

$$\left[\frac{\partial g(x^k, \rho^k)}{\partial x} \right]^t \Delta x^p + \left[\frac{\partial g(x^k, \rho^k)}{\partial \rho} \right]^t \Delta \rho^p = 0 \quad (\text{B.1})$$

Sendo $\frac{\partial g(x^k, \rho^k)}{\partial x}$ a matriz Jacobiana do fluxo de potência convencional no ponto (x^k, ρ^k) ; e $\frac{\partial g(x^k, \rho^k)}{\partial \rho}$ é o vetor de derivadas parciais das equações $g(x, \rho)$ em relação ao parâmetro ρ [15]. Outra forma de representar a equação acima, (B.1), é dada por (B.2):

$$\left[\nabla_x g(x^k, \rho^k) \quad \nabla_\rho g(x^k, \rho^k) \right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta x^p \\ \Delta \rho^p \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{B.2})$$

Com a introdução do parâmetro de carga nas equações do fluxo de potência, adicionou-se uma variável ao sistema de equações, porém o número de equações foi mantido, obtendo-se uma sistema linear subdeterminado, possuindo infinitas soluções. Portanto, mais uma equação é necessária. Este problema pode ser resolvido especificando-se o valor de uma variável, a qual é denominada variável da continuação e será descrita na próxima seção; e calculando-se, posteriormente, o valor das demais variáveis, [15], [3]. Assim, o sistema de equações fica da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g(x, \rho)}{\partial x} & \frac{\partial g(x, \rho)}{\partial \rho} \\ & u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x^p \\ \Delta \rho^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm\beta \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

O vetor tangente de predição, o qual fornece uma estimativa dos incrementos preditos, é denotado por t e é dado por $t = \begin{bmatrix} \Delta x^p \\ \Delta \rho^p \end{bmatrix}$

[15]. Outras formas de determinar o vetor tangente são descritas nas referências [5] e [18]. O vetor u_0 é um vetor coluna dimensionado de forma que todos os elementos sejam nulos com exceção do k -ésimo, correspondente à variável da continuação, o qual é igual a 1, [5]. Isso garante que o Jacobiano será não singular no ponto crítico. O escalar β é especificado de acordo com o incremento que se deseja dar para a variável da continuação.

Com a determinação do vetor tangente, os valores preditos podem ser encontrados através da seguinte relação, (B.4):

$$\begin{bmatrix} x^p \\ \rho^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^k \\ \rho^k \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} \Delta x^p \\ \Delta \rho^p \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Onde x^p e ρ^p são os valores preditos os quais são utilizados como ponto de partida na etapa de correção, de forma a facilitar a convergência; e σ é o fator de passo, o qual é utilizado para ajustar o vetor predito. Este fator é especificado de forma a reduzir o esforço computacional e melhorar a convergência do processo iterativo [15]. Os fatores de passo muito pequenos exigem um tempo computacional elevado, enquanto que quando se tem valores grandes para σ a convergência do processo iterativo se torna mais difícil. No capítulo 3 é apresentada uma forma de calcular este fator.

B.2 SELEÇÃO DO PARÂMETRO DA CONTINUAÇÃO

Uma forma de selecionar o parâmetro da continuação de forma mais adequada é através da avaliação da taxa de variação próximo a solução dada [5]. A variável que possuir a maior variação percentual é escolhida como variável da continuação. Ou seja [15],

$$u_i = \max \left\{ \left| \frac{\Delta x_1}{x_1} \right|, \left| \frac{\Delta x_2}{x_2} \right|, \dots, \left| \frac{\Delta x_n}{x_n} \right|, \left| \frac{\Delta \rho}{\rho} \right| \right\} \quad (\text{B.5})$$

O parâmetro de carga (ρ) é uma boa opção para iniciar o processo em uma condição base. No decorrer do processo iterativo, esta variável muda de ρ para a tensão de barra do sistema, que é mais variável, e depois de poucas iterações, retorna para o parâmetro de carga [22]. Entretanto, os autores da referência [22], através de estudos, observaram que é possível se obter bons resultados mesmo sem comutar os parâmetros.

Quando a carga é sucessivamente incrementada, atinge-se uma dada condição, normalmente mais próxima do ponto crítico, em que

a tensão, é provavelmente, o parâmetro com maior taxa de variação com o incremento de carga, ou seja, é a variável mais sensível à esta alteração e por isso seria o parâmetro mais adequado para ser a variável da continuação, pois a alteração do caminho da solução será mais significativa [3] [22].

B.3 ETAPA DE CORREÇÃO

Após a etapa de predição é necessário utilizar um método de correção para aproximar a solução, obtendo-se a solução exata do problema a ser resolvido.

Nesta etapa, assim como na fase de predição, é necessária a adição de uma equação extra no conjunto de equações. Uma maneira de se obter essa equação é através da definição de uma direção correspondente a trajetória desde a solução predita até a solução exata [15]. A direção ortogonal ao vetor tangente de predição é suposta ser a de menor distância entre as soluções citadas e, portanto, é a direção adotada [23].

Esta equação adicional é dada por um produto escalar, no qual os componentes do vetor apontando na direção perpendicular ao vetor tangente correspondem aos incrementos obtidos na etapa de correção, conforme mostrado na equação (B.6):

$$g(x, \rho) = 0$$

$$t^t \begin{bmatrix} \Delta x^c \\ \Delta \rho^c \end{bmatrix} = 0 \quad (\text{B.6})$$

Onde t é o vetor tangente de predição, definido na seção anterior, e $\begin{bmatrix} \Delta x^c \\ \Delta \rho^c \end{bmatrix}$ representa os incrementos obtidos nesta etapa de correção para o conjunto de equações não lineares parametrizadas. Através desta forma de encontrar a solução, um certo grau de liberdade é atribuído, para que os incrementos possam variar na direção selecionada [15], o que é uma vantagem deste método.

O método de Newton-Raphson é utilizado para resolver o sistema de equações acima. Durante o processo iterativo, a matriz Jacobiana é aumentada, assim como (B.3) na fase de predição, e da mesma forma, permite que o conjunto de equações reformulado permaneça bem condicionado, mesmo para pontos de carregamento mais elevados [15]. Assim, o sistema linear a ser resolvido a cada iteração é dado por:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial g(x, \rho)}{\partial x} & \frac{\partial g(x, \rho)}{\partial \rho} \\ t & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \rho \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} g(x, \rho) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Onde os termos da equação foram definidos anteriormente.

Outra forma de incluir uma equação extra no conjunto de equações não lineares é através de uma parametrização local, conforme apresenta a referência [3]. A desvantagem deste método é que o valor de uma das variáveis de estado, a qual é a variável da continuação, deve ser especificado, o que pode causar problemas nesta etapa de correção.

B.4 CRITÉRIO DE PARADA

O ponto crítico é onde o carregamento atinge seu valor máximo e, portanto, a partir deste ponto começa a decrementar. Durante a sequência de etapas alternadas de predição e correção, o componente $\Delta \rho$ do vetor tangente de predição é positivo até alcançar o ponto crítico, ponto no qual o valor deste parâmetro é nulo. Assim, o incremento $\Delta \rho$ é positivo até que o ponto crítico seja atingido, ou seja, na parte superior da curva PV e negativo na parte inferior da curva. Esta característica é utilizada como critério de parada do processo iterativo, visto que, se no k -ésimo passo do processo iterativo $\Delta \rho$ se tornar negativo, a solução corrigida estará situada em um ponto na parte inferior da curva PV, indicando que ultrapassou-se o ponto crítico [28]. Neste caso, prossegue-se o processo iterativo com os valores negativos de forma a se obter a parte inferior da curva.

B.5 ALGORITMO

Os passos do procedimento adotado na aplicação do método da continuação são representados no fluxograma a seguir, [15] [3].

1

¹Verificação do Critério de Parada: Se o incremento $\Delta \rho$ tiver seu sinal alterado de positivo para negativo, o ponto crítico foi ultrapassado e, portanto, o processo iterativo é encerrado.



Figura B.2 – Fluxograma do Processo Iterativo do Método da Continuação

APÊNDICE C - DADOS DOS SISTEMAS TESTES

Este capítulo apresenta os dados dos Sistemas Testes utilizados nos estudos realizados.

C.1 SISTEMA IEEE DE 24 BARRAS

Os dados do Sistema IEEE de 24 Barras são encontrados na referência [34].

C.2 SISTEMA DE 82 BARRAS

Os dados do Sistema de 82 Barras são apresentados nas Tabelas C.1, C.2 e C.3 a seguir:

Tabela C.1 – Sistema de 82 Barras - Dados das linhas de transmissão

Início	Fim	Circuito	R	X	C	Tap	Tap_{min}	Tap_{max}
65	68	1	0.000	.697	0.0	1.	0.0	0.0
65	999	1	0.000	.333	0.0	1.	0.0	0.0
67	68	1	0.000	3.544	0.0	1.	0.0	0.0
112	895	1	0.000	.01	0.0	1.05	0.0	0.0
113	895	1	0.000	.01	0.0	1.05	0.0	0.0
122	125	1	0.000	-2.051	0.0	0.0	0.0	0.0
122	130	1	0.000	-2.051	0.0	0.0	0.0	0.0
125	112	1	0.308	3.958	444.84	0.0	0.0	0.0
130	113	1	0.308	3.958	444.84	0.0	0.0	0.0
814	816	1	0.270	1.61	3.180	0.0	0.0	0.0
814	816	2	0.270	1.61	3.2008	0.0	0.0	0.0
814	816	3	0.340	1.7	3.0035	0.0	0.0	0.0
814	831	1	1.590	8.07	14.211	0.0	0.0	0.0
814	895	1	0.000	1.26	0.0	1.083	.95	1.15
814	895	2	0.000	1.21	0.0	1.083	.95	1.15
816	960	1	0.300	1.82	3.6243	0.0	0.0	0.0
816	960	2	0.510	2.62	4.54	0.0	0.0	0.0
829	831	1	0.420	2.12	3.8204	0.0	0.0	0.0
852	1047	1	1.630	8.344	14.643	0.0	0.0	0.0
852	1069	1	1.510	7.732	13.568	0.0	0.0	0.0
856	810	1	0.000	1.05	0.0	1.	0.0	0.0
895	959	1	0.050	.44	47.58	0.0	0.0	0.0
896	897	1	0.050	.74	79.518	0.0	0.0	0.0
896	999	1	0.193	2.43	282.1	0.0	0.0	0.0
897	808	1	0.000	1.02	0.0	1.024	0.0	0.0
933	800	1	0.000	1.12	0.0	1.024	0.0	0.0
933	856	1	0.052	.654	80.493	0.0	0.0	0.0
933	895	1	0.200	2.55	312.72	0.0	0.0	0.0
933	955	1	0.162	2.048	250.17	0.0	0.0	0.0
933	959	1	0.200	2.69	336.4	0.0	0.0	0.0
933	999	1	0.159	2.012	245.77	0.0	0.0	0.0
934	829	1	3.460	18.07	30.15	0.0	0.0	0.0
934	933	1	0.031	1.207	0.0	1.014	.922	1.127
934	1047	1	3.050	15.738	27.123	0.0	0.0	0.0
934	1047	2	3.040	15.718	27.089	0.0	0.0	0.0
938	946	1	0.061	1.067	129.15	0.0	0.0	0.0
938	955	1	0.256	2.9224	360.4	0.0	0.0	0.0
938	959	1	0.127	1.603	195.89	0.0	0.0	0.0
939	938	1	0.031	1.15	0.0	1.044	.945	1.155

Início	Fim	Circuito	R	X	C	Tap	Tap_{min}	Tap_{max}
939	938	2	0.032	1.163	0.0	1.044	.945	1.155
939	938	3	0.000	1.277	0.0	1.044	.945	1.155
939	991	1	0.680	3.28	6.53	0.0	0.0	0.0
939	991	2	0.680	3.28	6.53	0.0	0.0	0.0
939	1011	1	3.740	19.359	33.277	0.0	0.0	0.0
939	1015	1	1.270	6.562	11.305	0.0	0.0	0.0
939	1015	2	1.283	6.564	11.522	0.0	0.0	0.0
939	1034	1	2.532	13.132	22.551	0.0	0.0	0.0
947	946	1	0.031	1.15	0.0	.995	.945	1.155
955	946	1	0.170	2.845	414.2	0.0	0.0	0.0
955	964	1	0.188	2.367	287.24	0.0	0.0	0.0
955	1030	1	0.047	.59	71.818	0.0	0.0	0.0
956	955	1	0.015	1.238	0.0	.98	0.9	1.1
956	955	2	0.042	1.232	0.0	.98	0.9	1.1
956	955	3	0.042	1.228	0.0	.98	0.9	1.1
956	1157	1	0.000	2.056	0.0	1.	0.0	0.0
960	959	1	0.032	1.163	0.0	1.096	.945	1.155
960	959	2	0.031	1.166	0.0	1.096	.945	1.155
960	1015	1	1.890	9.776	16.845	0.0	0.0	0.0
960	1015	2	1.890	9.704	17.029	0.0	0.0	0.0
962	963	1	0.559	3.04	5.232	0.0	0.0	0.0
962	963	2	0.559	3.04	5.232	0.0	0.0	0.0
963	1041	1	4.020	20.76	35.759	0.0	0.0	0.0
963	1161	1	0.020	.1	.173	0.0	0.0	0.0
963	1228	1	0.660	3.104	5.855	0.0	0.0	0.0
964	976	1	0.073	.9164	112.17	0.0	0.0	0.0
964	995	1	0.164	3.0339	354.88	0.0	0.0	0.0
965	962	1	0.401	1.935	3.725	0.0	0.0	0.0
965	962	2	0.401	1.935	3.725	0.0	0.0	0.0
965	964	1	0.020	1.211	0.0	1.06	.9	1.1
965	964	2	0.020	1.233	0.0	1.06	.9	1.1
965	964	3	0.031	1.292	0.0	1.06	.9	1.1
967	1035	1	0.580	2.37	.65	0.0	0.0	0.0
967	1035	2	0.580	2.37	.65	0.0	0.0	0.0
973	995	1	0.320	4.25	481.24	0.0	0.0	0.0
973	1045	1	0.120	1.58	180.54	0.0	0.0	0.0
976	979	1	0.027	.343	41.861	0.0	0.0	0.0
980	979	1	0.015	1.238	0.0	1.074	.9	1.1
980	979	2	0.015	1.238	0.0	1.074	.9	1.1
985	992	1	0.730	2.97	.73	0.0	0.0	0.0
985	992	2	0.730	2.97	.73	0.0	0.0	0.0
985	2726	1	1.990	8.1	2.2	0.0	0.0	0.0
992	991	1	0.480	6.009	0.0	1.057	.9	1.1
992	991	2	0.488	6.014	0.0	1.057	.9	1.1
992	991	3	0.000	6.01	0.0	1.057	.9	1.1
992	2723	1	1.840	7.14	1.82	0.0	0.0	0.0
995	904	1	0.000	.923	0.0	1.	0.0	0.0
995	979	1	0.273	3.5502	451.62	0.0	0.0	0.0
995	1030	1	0.073	.92	112.26	0.0	0.0	0.0
995	1045	1	0.203	2.7595	288.63	0.0	0.0	0.0
995	1060	1	0.172	2.17	265.16	0.0	0.0	0.0
999	68	1	0.000	-.03	0.0	1.053	.838	1.053
999	1027	1	0.110	1.394	170.28	0.0	0.0	0.0
999	1027	2	0.085	1.448	171.6	0.0	0.0	0.0
999	1060	1	0.154	1.94	236.97	0.0	0.0	0.0
999	1060	2	0.109	2.005	235.49	0.0	0.0	0.0
1007	1011	1	0.841	11.826	0.0	1.043	.91	1.113
1007	1011	2	0.824	11.826	0.0	1.043	.91	1.113
1007	1035	1	6.600	26.83	7.28	0.0	0.0	0.0
1011	911	1	0.000	4.487	0.0	1.05	0.0	0.0
1011	913	1	0.000	7.436	0.0	1.05	0.0	0.0
1011	913	2	0.000	7.413	0.0	1.05	0.0	0.0
1011	1034	1	2.310	11.882	20.604	0.0	0.0	0.0
1011	1057	1	0.940	4.842	8.349	0.0	0.0	0.0
1011	1057	2	0.897	4.637	7.978	0.0	0.0	0.0
1016	1015	1	0.784	10.478	0.0	1.083	.9	1.099
1016	1015	2	0.395	5.853	0.0	1.083	.9	1.1

Início	Fim	Circuito	R	X	C	Tap	Tap _{min}	Tap _{max}
1016	1015	3	0.361	5.78	0.0	1.083	.9	1.1
1016	1015	4	0.767	12.721	0.0	1.083	.908	1.11
1027	556	1	0.091	1.409	175.77	0.0	0.0	0.0
1028	1027	1	0.039	1.272	0.0	1.046	.9	1.1
1028	1027	2	0.020	1.219	0.0	1.046	.9	1.1
1030	915	1	0.000	1.361	0.0	1.	0.0	0.0
1030	955	2	0.028	.4554	58.138	0.0	0.0	0.0
1035	1034	1	1.440	11.81	0.0	1.036	.95	1.161
1035	1034	2	1.110	13.104	0.0	1.036	.95	1.161
1035	1034	3	0.809	12.625	0.0	1.036	.95	1.161
1035	1034	4	0.319	5.977	0.0	1.036	.949	1.16
1041	917	1	0.000	4.614	0.0	1.025	0.0	0.0
1041	1069	1	1.510	7.776	13.402	0.0	0.0	0.0
1041	1069	2	1.500	7.766	13.385	0.0	0.0	0.0
1046	1045	1	0.016	1.211	0.0	1.019	.9	1.1
1046	1045	2	0.023	1.293	0.0	1.019	.9	1.1
1047	919	1	0.000	1.702	0.0	1.025	0.0	0.0
1047	921	1	0.000	6.782	0.0	1.025	0.0	0.0
1047	1069	1	3.070	15.885	27.375	0.0	0.0	0.0
1060	856	1	0.050	.7	86.055	0.0	0.0	0.0
1060	897	1	0.076	1.171	124.58	0.0	0.0	0.0
1060	925	1	0.000	1.515	0.0	1.024	0.0	0.0
1161	1159	1	0.096	8.	0.0	1.	0.0	0.0
1163	1057	1	2.320	11.954	20.582	0.0	0.0	0.0
1192	962	1	0.337	1.746	3.005	0.0	0.0	0.0
1192	1163	1	1.250	6.435	11.08	0.0	0.0	0.0
1210	976	1	0.030	1.219	0.0	1.075	.945	1.155
1210	976	2	0.039	1.138	0.0	1.075	.945	1.155
1210	976	3	0.036	1.217	0.0	1.075	.945	1.155
1228	1041	1	3.730	18.908	33.77	0.0	0.0	0.0
1248	1152	1	0.000	5.769	0.0	1.	0.0	0.0
1248	1210	1	0.192	1.01	2.09	0.0	0.0	0.0
2458	896	1	0.000	1.27	0.0	1.015	.9	1.1
2458	896	2	0.010	1.22	0.0	1.015	.9	1.1
2723	2870	1	2.170	8.83	2.13	0.0	0.0	0.0
2726	1016	1	2.620	10.62	2.89	0.0	0.0	0.0
2870	967	1	2.460	10.48	2.5	0.0	0.0	0.0

Tabela C.2 – Sistema de 82 Barras - Dados das barras

Barra	Tipo	V	$\delta(^{\circ})$	P_g	Q_g	$Q_{g_{min}}$	$Q_{g_{max}}$	P_d	Q_d	shunt
65	2	0.994	0	1099.	-141.0	-9999	99999	0.0	0.0	-330.0
67	0	0.860	-24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	-360.0
68	0	0.970	-24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
112	0	1.030	-44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-136.0
113	0	1.030	-44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-136.0
122	1	1.051	-41	378.4	-389.0	-9999	99999	0.0	0.0	0.0
125	0	1.016	-39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-87.8
130	0	1.016	-39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-87.8
556	1	1.012	-24	314.3	-122.0	-9999	99999	0.0	0.0	0.0
800	1	1.020	-26	844.	129.30	-800.	800.	0.9	0.0	0.0
808	1	1.000	-16	1000.	-54.50	-600.	600.	2.4	0.0	0.0
810	1	1.035	-22	900.	11.51	-400.	532.	2.4	0.0	0.0
814	0	1.043	-46	0.0	0.0	0.0	0.0	161.0	65.5	0.0
816	0	1.032	-48	0.0	0.0	0.0	0.0	573.0	173.0	0.0
829	0	0.977	-46	0.0	0.0	0.0	0.0	68.1	51.7	0.0
831	0	0.983	-47	0.0	0.0	0.0	0.0	79.5	38.3	0.0
852	0	0.961	-35	0.0	0.0	0.0	0.0	24.5	49.9	0.0
856	0	1.038	-27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
895	0	0.981	-44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
896	0	1.032	-24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
897	0	1.035	-22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
904	1	1.035	-32	1000.	27.62	-475.	450.	2.5	0.0	0.0
911	1	1.025	-56	160.	91.31	-32.	188.	16.0	8.0	0.0
913	1	1.025	-56	180.	109.0	-50.	214.	18.0	9.0	0.0

Barra	Tipo	V	$\delta(^{\circ})$	P_g	Q_g	Q_{gmin}	Q_{gmax}	P_d	Q_d	shunt
915	1	1.014	-31	1000.	-106.0	-525.	420.	1.8	0.0	0.0
917	1	1.040	-39	220.	76.0	-100.	76.	0.0	0.0	0.0
919	1	1.035	-20	720.	142.9	-148.	220.	1.2	0.0	0.0
921	1	1.035	-21	130.	30.79	-84.	84.	0.3	0.0	0.0
925	1	1.000	-17	900.	-37.6	-330.	315.	1.8	0.0	0.0
933	0	1.034	-31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-54.3	0.0
934	0	1.043	-33	0.0	0.0	0.0	0.0	304.0	13.7	0.0
938	0	1.008	-49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
939	0	1.043	-52	0.0	0.0	0.0	0.0	546.0	182.0	250.0
946	0	1.024	-46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.0
947	0	1.020	-46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
955	0	1.040	-40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.0
956	0	1.022	-40	0.0	0.0	0.0	0.0	419.0	-21.8	0.0
959	0	0.978	-45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
960	0	1.039	-48	0.0	0.0	0.0	0.0	652.0	311.0	0.0
962	0	1.022	-53	0.0	0.0	0.0	0.0	282.0	69.9	0.0
963	0	1.018	-51	0.0	0.0	0.0	0.0	-85.8	44.5	0.0
964	0	0.994	-50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
965	0	1.043	-52	0.0	0.0	0.0	0.0	501.0	44.9	0.0
967	0	1.006	-66	0.0	0.0	0.0	0.0	91.9	48.4	0.0
973	0	1.008	-39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-496.0
976	0	0.970	-54	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
979	0	0.972	-53	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
980	0	1.030	-55	0.0	0.0	0.0	0.0	486.0	179.0	0.0
985	0	1.037	-59	0.0	0.0	0.0	0.0	39.0	25.9	0.0
991	0	1.012	-55	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
992	0	1.043	-59	0.0	0.0	0.0	0.0	207.0	50.7	0.0
995	0	1.036	-37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-300.0
999	0	1.028	-24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-100.0
1007	0	1.043	-61	0.0	0.0	0.0	0.0	33.1	61.3	0.0
1011	0	1.040	-59	0.0	0.0	0.0	0.0	41.4	-17.3	0.0
1015	0	0.979	-56	0.0	0.0	0.0	0.0	133.0	6.1	0.0
1016	0	1.014	-60	0.0	0.0	0.0	0.0	390.0	182.0	0.0
1027	0	1.014	-26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1028	0	1.043	-29	0.0	0.0	0.0	0.0	728.0	249.0	0.0
1030	0	1.038	-38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1034	0	1.000	-63	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0
1035	0	1.014	-66	0.0	0.0	0.0	0.0	164.0	17.9	0.0
1041	0	0.993	-45	0.0	0.0	0.0	0.0	152.0	8.0	0.0
1045	0	1.024	-40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-150.0
1046	0	1.043	-40	0.0	0.0	0.0	0.0	247.0	2.8	0.0
1047	0	1.044	-26	0.0	0.0	0.0	0.0	275.0	13.2	0.0
1057	0	1.008	-62	0.0	0.0	0.0	0.0	273.0	106.0	0.0
1060	0	1.039	-25	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	38.8	0.0
1069	0	0.941	-44	0.0	0.0	0.0	0.0	329.0	133.0	0.0
1152	1	1.049	-51	160.	46.63	-75.	105.	4.8	0.0	0.0
1157	1	1.035	-38	220.	68.25	-194.	194.	0.0	0.0	0.0
1159	1	1.040	-45	130.	31.47	-60.	60.	0.0	0.0	0.0
1161	0	1.018	-51	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1163	0	1.016	-57	0.0	0.0	0.0	0.0	-5.0	-3.8	0.0
1192	0	1.012	-55	0.0	0.0	0.0	0.0	157.0	43.3	0.0
1210	0	1.030	-56	0.0	0.0	0.0	0.0	1051.0	610.0	390.0
1228	0	1.004	-52	0.0	0.0	0.0	0.0	89.9	38.0	0.0
1248	0	1.027	-56	0.0	0.0	0.0	0.0	129.0	70.6	0.0
2458	0	1.039	-25	0.0	0.0	0.0	0.0	451.0	129.0	0.0
2723	0	1.022	-62	0.0	0.0	0.0	0.0	10.3	6.8	4.8
2726	0	1.028	-59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2870	0	1.002	-66	0.0	0.0	0.0	0.0	61.8	22.4	12.0

Tabela C.3 – Limites Operacionais do Sistema Teste Equivalente Sul 82 Barras

Barra	V_{min}	V_{max}	P_{gmin}	P_{gmax}
65	0.95	1.05	-4950	4950
67	0.8	1.1	0	0
68	0.8	1.1	0	0
112	0.95	1.05	0	0
113	0.95	1.05	0	0
122	0.95	1.05	-2600	2600
125	0.95	1.05	0	0

Barra	V_{min}	V_{max}	P_{gmin}	P_{gmax}
130	0.95	1.05	0	0
556	0.95	1.05	-2000	2000
800	0.95	1.05	0	1676
808	0.95	1.05	0	1260
810	0.95	1.05	0	1260
814	0.95	1.05	0	0
816	0.95	1.05	0	0
829	0.95	1.05	0	0
831	0.95	1.05	0	0
852	0.95	1.05	0	0
856	0.95	1.05	0	0
895	0.95	1.05	0	0
896	0.95	1.05	0	0
897	0.95	1.05	0	0
904	0.95	1.05	0	1474
911	0.95	1.05	0	250
913	0.95	1.05	0	350
915	0.95	1.05	0	1160
917	0.95	1.05	0	220
919	0.95	1.05	0	720
921	0.95	1.05	0	360
925	0.95	1.05	0	1420
933	0.95	1.05	0	0
934	0.95	1.05	0	0
938	0.95	1.05	0	0
939	0.95	1.05	0	0
946	0.95	1.05	0	0
947	0.95	1.05	0	0
955	0.95	1.05	0	0
956	0.95	1.05	0	0
959	0.95	1.05	0	0
960	0.95	1.05	0	0
962	0.95	1.05	0	0
963	0.95	1.05	0	0
964	0.95	1.05	0	0
965	0.95	1.05	0	0
967	0.95	1.05	0	0
973	0.95	1.05	0	0
976	0.95	1.05	0	0
979	0.95	1.05	0	0
980	0.95	1.05	0	0
985	0.95	1.05	0	0
991	0.95	1.05	0	0
992	0.95	1.05	0	0
995	0.95	1.05	0	0
999	0.95	1.05	0	0
1007	0.95	1.05	0	0
1011	0.95	1.05	0	0
1015	0.95	1.05	0	0
1016	0.95	1.05	0	0
1027	0.95	1.05	0	0
1028	0.95	1.05	0	0
1030	0.95	1.05	0	0
1034	0.95	1.05	0	0
1035	0.95	1.05	0	0
1041	0.95	1.05	0	0
1045	0.95	1.05	0	0
1046	0.95	1.05	0	0
1047	0.95	1.05	0	0
1057	0.95	1.05	0	0
1060	0.95	1.05	0	0
1069	0.95	1.05	0	0
1152	0.95	1.05	0	200
1157	0.95	1.05	0	250
1159	0.95	1.05	0	150
1161	0.95	1.05	0	0
1163	0.95	1.05	0	0

Barra	V_{min}	V_{max}	P_{gmin}	P_{gmax}
1192	0.95	1.05	0	0
1210	0.95	1.05	0	0
1228	0.95	1.05	0	0
1248	0.95	1.05	0	0
2458	0.95	1.05	0	0
2723	0.95	1.05	0	0
2726	0.95	1.05	0	0
2870	0.95	1.05	0	0