



Tulio Anselmo dos Santos Valentim

**Relação VQ na Avaliação da Estabilidade
de Tensão**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Ricardo Bernardo Prada

Rio de Janeiro
Março de 2020



Tulio Anselmo dos Santos Valentim

Relação VQ na Avaliação da Estabilidade de Tensão

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Ricardo Bernardo Prada

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Marcos Vinicius Pimentel Teixeira

Instituto Militar de Engenharia – IME

Prof. Delberis Araujo Lima

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Março de 2020

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Tulio Anselmo dos Santos Valentim

Graduou-se em Engenharia Eletrônica e de Computação pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2009. Trabalho como engenheiro eletrônico nas áreas de planejamento energético e implantação de projetos de geração em Furnas. Atualmente atua como consultor na área de certificação de projetos eólicos e solares da UL Renewable.

Ficha Catalográfica

Anselmo dos Santos Valentim, Tulio

Relação VQ na Avaliação da Estabilidade de Tensão. Tulio Anselmo dos Santos Valentim; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – 2020.

v., 100 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2020.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Sistemas de Potência – Teses. 3. Estabilidade de tensão;. 4. Margem de potência reativa;. 5. Curva QV;. 6. Matriz D'. I. Bernardo Prada, Ricardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro . Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 620.11

A Lívia, minha companheira e amiga, pelo apoio
emocional e suporte técnico.

Agradecimentos

A Deus por mostrar-me o caminho a seguir, por demonstrar-me mais uma vez que todas as coisas são possíveis se temos fé.

A meu orientador, Ricardo Bernardo Prada, pelo permanente apoio nas diferentes etapas de desenvolvimento nesta dissertação, por sua atenção e paciência.

A minha família, pais e irmãos, que sempre me apoiaram em meus desafios e sonhos.

Ao povo brasileiro por terem dado suporte financeiro nos meus estudos. A todos os amigos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, muito especialmente a Vanessa Atencia, Oscar Cuaresma, Marília Zacarias, Diego Cardoso e André Milhorange.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro e à PUC-Rio pela bolsa de isenção de mensalidades do doutorado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Anselmo dos Santos Valentim, Tulio; Prada, Ricardo Bernardo (Orientador). **Relação VQ na Avaliação da Estabilidade de Tensão**. Rio de Janeiro, 2020. 100p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro .

O fenômeno de estabilidade de tensão é um problema associado ao fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. A manifestação mais conhecida do fenômeno é a existência de uma máxima carga que pode ser alimentada pela rede. Outra possibilidade é a existência de uma máxima injeção de potência ativa e reativa fornecida por geradores e compensadores. A curva QV possibilita o cálculo da margem Q, que corresponde à distância entre o caso-base e ponto de fronteira da curva. A margem Q, supostamente, é um índice para avaliação da estabilidade do sistema, determinando uma operação normal quando a inclinação da curva é positiva. O método da matriz D' também fornece a relação Q e V de cada barra, avaliando, supostamente, as condições de estabilidade do sistema. Nesta dissertação foi proposta a análise desses dois índices, com o objetivo de explicitar as premissas, similaridades e diferenças das duas maneiras de se calcular a relação VQ. E assim, avaliar e identificar possíveis resultados não coerentes.

Palavras-chave

Estabilidade de tensão; Margem de potência reativa; Curva QV; Matriz D' .

Abstract

Anselmo dos Santos Valentim, Tulio; Bernardo Prada, Ricardo (Advisor). **Relation VQ in the Evaluation of Voltage Stability.** Rio de Janeiro, 2020. 100p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The phenomenon of voltage stability is a problem associated with active and reactive power flow in transmission lines. The best-known manifestation of the event is the existence of a maximum load that can be supplied by the grid. Another possibility is the existence of a maximum injection of active and reactive power provided by generators and compensators. The QV curve enables the calculation of the Q margin, which corresponds to the distance between the base case and the curve's inflection point. The Q margin, supposedly, is an index for evaluating the system stability, consisting of normal operation when the slope of the curve is positive. The matrix method D' also provides the relation Q and V of each bar evaluating, supposedly, conditions of system stability. In this dissertation, an analysis of these two indices was proposed to clarify the assumptions, similarities, and differences between the two ways of calculating the VQ relation. And so, evaluate and identify possible non-coherent results.

Keywords

Voltage Stability; Reactive power margin; QV curve; Matrix D'.

Sumário

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Introdução | 14 |
| 1.1 | Considerações Gerais | 14 |
| 1.2 | Objetivos | 14 |
| 1.3 | Estrutura do Trabalho | 15 |
| 2 | Fluxo de Potência | 16 |
| 2.1 | Introdução | 16 |
| 2.2 | Equações de Carga | 17 |
| 2.3 | Desenvolvendo a Matriz de Admitância | 19 |
| 2.4 | Método de Newton-Raphson para Solução do Fluxo de Potência | 22 |
| 2.5 | Sumário do Capítulo | 26 |
| 3 | Estabilidade de Tensão | 27 |
| 3.1 | Límite de Estabilidade Estática Angular | 27 |
| 3.2 | Curvas P e Q com Φ Constantes | 30 |
| 3.3 | Impedância da Carga no Máximo Carregamento | 32 |
| 3.4 | Límite de Estabilidade de Tensão | 34 |
| 3.5 | Índices para Avaliação da Estabilidade de Tensão | 35 |
| 3.5.1 | Método da Matriz $[D']$ | 36 |
| 3.6 | Sumário do Capítulo | 38 |
| 4 | Avaliação da Estabilidade de Tensão | 39 |
| 4.1 | Introdução | 39 |
| 4.2 | A Curva QV | 40 |
| 4.3 | Avaliação da Estabilidade de Tensão com a Curva QV | 42 |
| 4.4 | Obtendo o Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ | 44 |
| 4.5 | Avaliação da Estabilidade de Tensão Utilizando o Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ | 46 |
| 4.6 | Incompatibilidade na Avaliação da Estabilidade de Tensão | 46 |
| 4.7 | Sumário do Capítulo | 47 |
| 5 | Casos de Estudo | 49 |
| 5.1 | Introdução | 49 |
| 5.2 | Estudo Comparativo do Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e Margem da Curva QV | 49 |
| 5.2.1 | Estudos com Crescimento de Carga e Geração em uma Única Barra | 50 |
| 5.2.1.1 | Análise da Barra 1 | 51 |
| 5.2.1.2 | Análise da Barra 2 | 58 |
| 5.2.1.3 | Análise da Barra 4 | 62 |
| 5.2.1.4 | Análise da Barra 5 | 66 |
| 5.2.1.5 | Conclusão | 71 |
| 5.2.2 | Estudos com Crescimento de Carga e Geração em Múltiplas Barras | 71 |
| 5.2.2.1 | Análise da Barra 1 | 72 |
| 5.2.2.2 | Análise da Barra 2 | 75 |
| 5.2.2.3 | Análise da Barra 4 | 77 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 5.2.2.4 | Análise da Barra 5 | 80 |
| 5.2.2.5 | Conclusão | 82 |
| 5.3 | Incongruência na Margem de Potência Reativa da Curva QV Obtida Através do Fluxo de Potência Continuado | 83 |
| 5.3.1 | Comparação das Cargas Máximas da Curva QV | 83 |
| 5.3.2 | Comparação da Margem da Curva QV | 84 |
| 5.3.3 | Margem da Curva QV para Diferentes Mecanismos de Aumento de Carga | 89 |
| 5.3.4 | Conclusão | 93 |
| 5.4 | Sumário do Capítulo | 93 |
| 6 | Conclusões | 95 |
| 6.1 | Trabalhos Futuros | 96 |
| | Referências bibliográficas | 97 |
| A | Dados de Sistema IEEE 14 Barras | 99 |

Lista de figuras

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 2.1 | Barra Isolada | 17 |
| Figura 2.2 | Sistemas de Duas Barras - modelo π | 18 |
| Figura 2.3 | Correntes no Sistema de Duas Barras | 19 |
| Figura 3.1 | Circuito de Duas Barras | 28 |
| Figura 3.2 | Curvas V_1 Constante no Plano ΘV | 29 |
| Figura 3.3 | Curvas V_1 Constante nos Eixos $\Theta_1 VP$ | 30 |
| Figura 3.4 | P_1 e Q_1 Constantes no Plano $\Theta_1 V_1$ | 31 |
| Figura 3.5 | Curvas P e Q com o mesmo Fator de Potência | 32 |
| Figura 3.6 | Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga | 33 |
| Figura 3.7 | Limite de Estabilidade de Tensão Sobre as Curvas de ϕ Constante no Plano SV | 36 |
| Figura 4.1 | Curva QV | 40 |
| Figura 4.2 | Curvas QV | 42 |
| Figura 5.1 | Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras | 50 |
| Figura 5.2 | Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 1 | 57 |
| Figura 5.3 | Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 2 | 62 |
| Figura 5.4 | Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 4 | 66 |
| Figura 5.5 | Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 5 | 71 |
| Figura 5.6 | Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 1 | 75 |
| Figura 5.7 | índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 2 | 77 |
| Figura 5.8 | índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 4 | 80 |
| Figura 5.9 | índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 5 | 82 |
| Figura A.1 | Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras | 99 |

Lista de tabelas

| | | |
|-------------|--|----|
| Tabela 5.1 | Análise da Barra 1 - Crescimento de Carga na Barra 2 | 52 |
| Tabela 5.2 | Tipos das Barras - Crescimento de Carga na Barra 2 | 56 |
| Tabela 5.3 | Análise da Barra 2 - Crescimento de Carga na Barra 2 | 58 |
| Tabela 5.4 | Análise da Barra 4 - Crescimento de Carga na Barra 2 | 63 |
| Tabela 5.5 | Análise da Barra 5 - Crescimento de Carga na Barra 2 | 67 |
| Tabela 5.6 | Análise na Barra 1 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5 | 72 |
| Tabela 5.7 | Tipos das Barras - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5 | 74 |
| Tabela 5.8 | Análise na Barra 2 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5 | 76 |
| Tabela 5.9 | Análise na Barra 4 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5 | 78 |
| Tabela 5.10 | Análise na Barra 5 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5 | 80 |
| Tabela 5.11 | Comparação das Cargas Máximas da Curva QV | 84 |
| Tabela 5.12 | Casos do FPC com percentual de aumento de carga de 5% | 86 |
| Tabela 5.13 | Casos do FPC com percentual de aumento de carga de 10% | 87 |
| Tabela 5.14 | Cenário 1 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20% | 88 |
| Tabela 5.15 | Cenário 2 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20% | 88 |
| Tabela 5.16 | Cenário 3 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20% | 88 |
| Tabela 5.17 | Cenário 4 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20% | 88 |
| Tabela 5.18 | Cenário 5 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20% | 89 |
| Tabela 5.19 | Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5% | 90 |
| Tabela 5.20 | Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5% | 90 |
| Tabela 5.21 | Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5% | 90 |
| Tabela 5.22 | Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5% | 91 |
| Tabela 5.23 | Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5% | 91 |
| Tabela 5.24 | Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5% | 91 |
| Tabela 5.25 | Cenário 4 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5% | 91 |
| Tabela 5.26 | Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10% | 92 |

| | |
|---|----|
| Tabela 5.27 Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10% | 92 |
| Tabela 5.28 Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10% | 92 |
| Tabela 5.29 Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15% | 92 |
| Tabela 5.30 Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15% | 93 |
| Tabela 5.31 Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15% | 93 |

Lista de Abreviaturas

LEEA – Limite de Estabilidade Angular

LET – Limite de Estabilidade de Tensão

FCP – Fluxo de Potência Continuado

SEE – Sistema de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

LEEA – Limite de Estabilidade Angular

LET – Limite de Estabilidade de Tensão

FCP – Fluxo de Potência Continuado

SEE – Sistema de Energia Elétrica

CA – Corrente Alternada

1

Introdução

1.1

Considerações Gerais

Nas últimas décadas diversos fatores têm levado ao aumento da probabilidade de ocorrência de *blackouts* em sistemas elétricos de grande porte, transformando o problema da estabilidade de tensão numa preocupação para diversos agentes do planejamento e operação do sistema elétrico [1].

O principal motivo que vem levando os sistemas elétrico de potência a operar perto dos limites de estabilidade é o aumento da demanda por energia elétrica, junto com o surgimento de novas restrições técnicas, econômicas e ambientais [2].

A sobrecarga da rede tende a ocorrer em momentos em que o sistema opera em condições de carga pesada, com elevado fluxo de potência ativa e reativa em suas linhas de transmissão, ou quando o sistema opera sob a perda de geradores ou linhas de transmissão.

Devido a importância de operar-se dentro da região normal, desenvolveram-se métodos que permitem prever e identificar os barramentos mais fracos e as áreas mais críticas do sistema. Diversos índices têm sido propostos para avaliar e prever o ponto de colapso de tensão [1].

1.2

Objetivos

O objetivo é realizar um estudo que apresente e contraponha as principais diferenças e semelhanças para dois índices que são utilizados para avaliação da estabilidade de tensão em sistemas elétricos.

A curva QV e sua margem são ferramentas amplamente utilizadas por engenheiros de operação e planejamento de sistema elétricos, sendo o primeiro índice estudado. Considera-se normal a operação quando o sistema opera com inclinação $\Delta V/\Delta Q$ positiva. A margem corresponde à distância entre o valor-base e o valor onde a inclinação troca de sinal. Procura-se operar sistemas elétricos sempre com uma margem 'grande', sendo motivo de preocupação se a inclinação é negativa ou se a margem é pequena [3].

O segundo índice estudado, parte do método da matriz D' e desenvolve a relação entre Q e V de cada barra através da relação $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)' = \det [D'] / \left(\frac{\partial P}{\partial \Theta}\right)$.

Os dois índices são desenvolvidos e comparados em um estudo que procura demonstrar possíveis divergências nesses índices quando operando próximo a sua carga máxima.

1.3

Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 apresentam-se conceitos relacionados ao problema de fluxo de potência, onde desenvolve-se suas equações junto com a formulação matricial do problema e aplicação do método numérico de Newton-Raphson para solucionar o problema.

No Capítulo 3 é abordado o problema da estabilidade de tensão, onde apresentam-se os conceitos de regiões de operação da curva ϕ constante no plano SV , dos limites de estabilidade estática angular e de estabilidade de tensão, a relação entre o uso de linhas de transmissão perto de sua capacidade máxima e os problemas de estabilidade de tensão. Também se apresenta uma ferramenta analítica de avaliação das condições nodais através do método da matriz $[D']$.

No Capítulo 4 é apresentado como obter-se a curva QV e como sua margem pode ser utilizada na avaliação da estabilidade de tensão. Um segundo índice também é desenvolvido através da matriz D' e, então, são explicitadas suas principais diferenças.

No Capítulo 5 apresentam-se aplicações práticas em um sistema teste dos índices apresentados no Capítulo 4. Assim são abordadas possíveis incoerências na avaliação da estabilidade de tensão ao utilizar o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)'$ e a margem da curva QV em sistemas de potência próximos de seu carregamento máximo. Também foi discutido inconsistências no método de fluxo de potência continuado.

Finalmente, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões sobre o estudo comparativo em sistema com alto carregamento. Sugestões para futuros trabalhos também foram apresentadas.

2

Fluxo de Potência

2.1

Introdução

O principal objetivo de um sistema de energia elétrica (SEE) de grande porte é atender a demanda de energia dos diversos consumidores do sistema, garantindo os requisitos mínimos de qualidade para o fornecimento de energia elétrica [4].

Além do equilíbrio entre potência gerada e consumida no SEE, existem outros requisitos econômicos e operacionais, como:

1. Manter os níveis de tensão nas barras dentro da faixa operativa;
2. Manter a frequência da rede dentro de determinada faixa especificada[5];
3. Operar com baixo nível de interrupção, permitindo que consumidores mantenham seus negócios em níveis adequados de confiabilidade;
4. Garantir o custo mínimo da energia, e a viabilidade econômica dos empreendimentos de geração e transmissão de energia elétrica.

Dentro desse contexto, o balanceamento de potência ativa em uma malha elétrica é de vital importância para o correto funcionamento do SEE, tendo em vista que a potência ativa de um sistema está diretamente relacionada a sua frequência operativa[5] e que a potência reativa se encontra diretamente relacionada com o módulo da tensão nas barras.

O fluxo de potência ou fluxo de carga consiste no estudo para determinar a tensão e ângulo nas barras, em junto com o fluxo de potência nos ramos. Essas informações são de grande utilidade no planejamento e expansão do SEE, mas também em sua operação.

Nesse capítulo será apresentada a teoria para execução do cálculo do fluxo de potência CA em sistemas de energia elétrica. A formulação das equações e suas premissas para modelagem fluxo de carga são desenvolvidas nas Seções 2.2 e 2.3. E finalmente, na Seção 2.4 é apresentado o método numérico de Newton-Raphson utilizado para resolver as equações não-lineares do fluxo de carga.

2.2

Equações de Carga

As equações do problema do fluxo de carga são obtidas através da conservação da potência ativa e reativa nas barras do SEE.

Para o cálculo do fluxo de carga adota-se como premissa que as variações no tempo são suficientemente lentas, permitindo ignorar os efeitos transitórios do sistema [6]. Ou seja, o estudo de fluxo de carga é uma modelagem estática do sistema elétrico de potência.

Adota-se como referência que as potências injetadas na barra são positivas e que as potências que saem da barra são negativas.

A potência total injetada em uma barra é conhecida como potência aparente, (2.1), somatório de sua potência reativa e ativa. Analisando-se o sistema de uma única barra da Figura 2.1 obtêm-se (2.2).

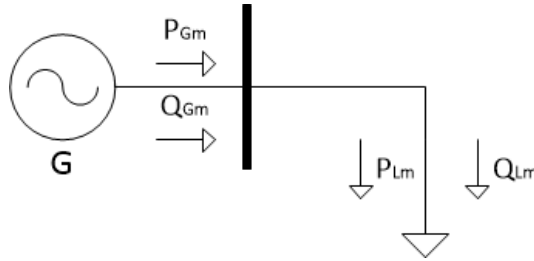


Figura 2.1: Barra Isolada

$$S = P + jQ \quad (2.1)$$

$$S = (P_G - P_L) + j(Q_G - Q_L) \quad (2.2)$$

Para uma representação mais adequada do sistema elétrico de potência, o sistema de uma barra é expandido para um sistema de duas barras, conforme exibido na Figura 2.2.

As tensões nas barras, V_1 e V_2 , são definidas por seu módulo e fase na barra:

$$V_1 = |V_1|e^{j\Theta_1} \quad \text{e} \quad V_2 = |V_2|e^{j\Theta_2}$$

A linha de transmissão é modelada através do modelo π [7], composto por uma impedância em série (2.3), e duas admitâncias *shunt* em paralelo nas barras, (2.4):

$$Z = |Z|e^{j\alpha_t} \quad (2.3)$$

$$Y_{sh} = |Y_{sh}|e^{j\alpha_{sh}} \quad (2.4)$$

A potência aparente total injetada na barra é definida em termos da sua tensão e sua corrente conjugada:

$$S = V * I^* \quad (2.5)$$

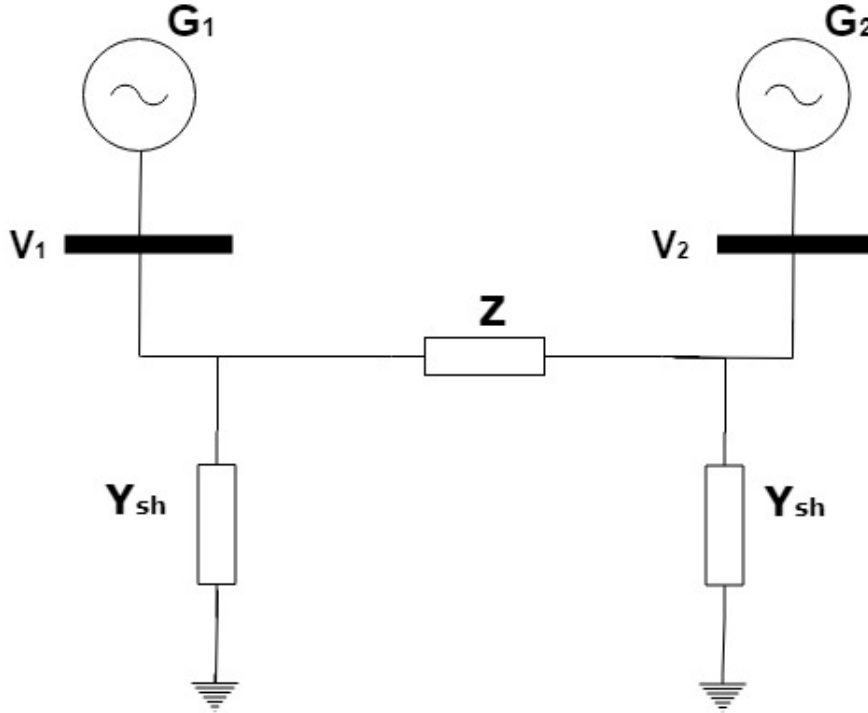


Figura 2.2: Sistemas de Duas Barras - modelo π

Na Figura 2.2 a corrente injetada na barra 1 é calculada como a soma da corrente na admitância *shunt* e na impedância em série:

$$I_1 = V_1 \cdot Y_{sh} + \frac{(V_1 - V_2)}{Z} \quad (2.6)$$

Substituindo-se (2.6) em (2.5):

$$S_1^* = \frac{V_1 V_1^* j}{X_c} + \frac{(V_1 - V_2) V_1^*}{Z} \quad (2.7)$$

Separando (2.7) em uma parte real e imaginária, obtêm-se:

$$P = -\frac{|V_1|^2 \cos(\alpha_t)}{Z} + \frac{|V_2| |V_1| \cos(\Theta_{21} - \alpha_t)}{Z} \quad (2.8)$$

$$Q = \frac{|V_1|^2}{X_c} + \frac{|V_1|^2 \sin(\alpha_t)}{Z} - \frac{|V_2| |V_1| \sin(\Theta_{21} - \alpha_t)}{Z} \quad (2.9)$$

As equações (2.8) e (2.9) são as equações não-lineares do fluxo de carga, que serão solucionadas na Seção 2.4.

2.3

Desenvolvendo a Matriz de Admitância

Sistemas elétricos podem ser muito mais complexos que um simples sistema de duas barras. Portanto, expande-se as equações de fluxo de carga, (2.8) e (2.9), tornando-se viável a modelagem computacional para um sistema de grande porte.

Modela-se o sistema de duas barras da Seção 2.2, porém para barras *a* e *b* genéricas.

Define-se que a corrente injetada na barra pode ser obtida pelo produto da matriz de corrente nodal versus a tensão na barra [7]:

$$I = Y_{nodal} \cdot U$$

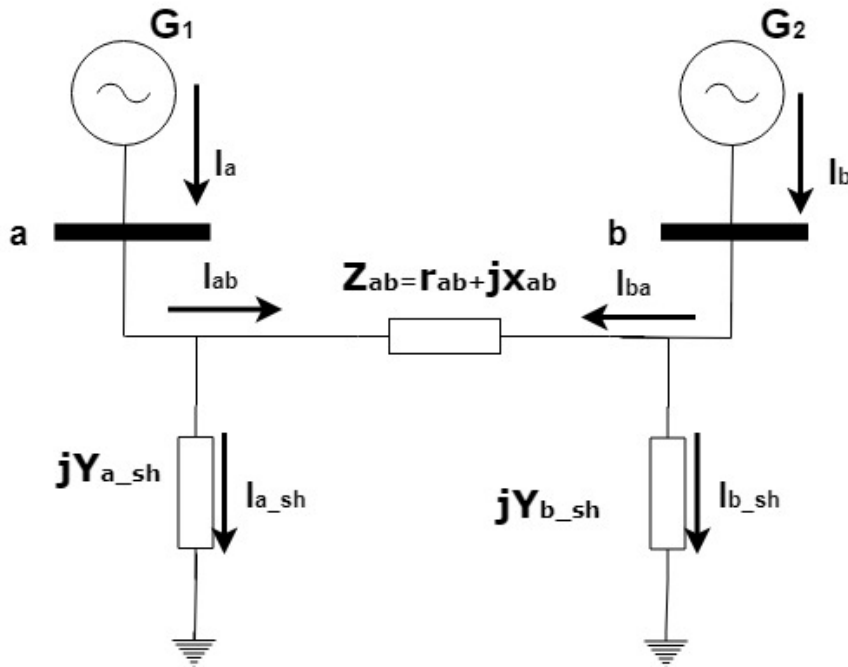


Figura 2.3: Correntes no Sistema de Duas Barras

A lei de Kirchhoff das correntes permite formular que a corrente injetada nas barras é igual a corrente que flui no elemento série da linha de transmissão mais a corrente sobre o elemento *shunt*, (2.10) e (2.11). E a admitância série da linha é definida por (2.12).

$$I_a = I_{ab} + I_{a_sh} \quad (2.10)$$

$$I_b = I_{ba} + I_{b_sh} \quad (2.11)$$

$$Y_{ab} = \frac{1}{Z_{ab}} = \frac{1}{R_{ab} + jX_{ab}} \quad (2.12)$$

Já com a lei de Kirchhoff das tensões obtém-se que a corrente sobre o elemento série e *shunt* é obtida pela tensão na linha versus a admitância da linha.

$$I_{ab} = (\dot{U}_a - \dot{U}_b) \cdot Y_{ab} \quad (2.13)$$

$$I_{ba} = (\dot{U}_b - \dot{U}_a) \cdot Y_{ab} \quad (2.14)$$

$$I_{a-sh} = \dot{U}_a \cdot jY_{a-sh} \quad (2.15)$$

$$I_{b-sh} = \dot{U}_b \cdot jY_{b-sh} \quad (2.16)$$

Substituindo-se (2.13), (2.14), (2.15) e (2.16) em (2.10) e (2.11) obtém-se (2.17) em sua forma matricial:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ab} + jY_{a-sh} & -Y_{ab} \\ -Y_{ab} & Y_{ab} + jY_{b-sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

A matriz Y_{nodal} é importante no cálculo do fluxo de potência, sendo montada com as seguintes regras:

- O elemento da diagonal principal é a soma de todos os elementos que estão conectados a esse elemento (2.18);
- O elemento fora da diagonal principal representa a conexão entre a barra a e b, e define-se pelo negativo da admitância que conecta a barra a a barra b (2.19).

$$Y_{aa} = \sum_{b=1}^n (Y_{ab} + jY_{a-sh}) \quad (2.18)$$

$$Y_{ab} = -Y_{ab} \quad (2.19)$$

Separa-se a matriz nodal em duas partes: real e imaginária. A parte real é chamada de matriz de condutância nodal e a imaginária de matriz de susceptância nodal:

$$Y_{nodal} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1a} \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ Y_{a1} & \cdots & Y_{aa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} + jB_{11} & \cdots & G_{1a} + jB_{1a} \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ G_{a1} + jB_{a1} & \cdots & G_{aa} + jB_{aa} \end{bmatrix}$$

$$Y_{nodal} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1a} \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ G_{a1} & \cdots & G_{aa} \end{bmatrix}}_{\text{condutância}} + j \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & \cdots & B_{1a} \\ \cdots & \ddots & \vdots \\ B_{a1} & \cdots & B_{aa} \end{bmatrix}}_{\text{susceptância}}$$

A potência e corrente injetada na barra já foram apresentadas na Seção 2.2 e são aqui desenvolvidas para as barras genéricas a e b:

$$S_a = \dot{U}_a \cdot \dot{I}_a^* \quad (2.20)$$

$$I_a = \sum_{b=1}^n Y_{ab} \cdot \dot{U}_b \quad (2.21)$$

Substituindo-se (2.21) em (2.20):

$$S_a = \dot{U}_a \cdot \left(\sum_{b=1}^n Y_{ab} \cdot \dot{U}_b \right)^* \quad (2.22)$$

A tensão fasorial das barras a e b tem o seu módulo e ângulo apresentados em (2.23) e (2.24). E a matriz nodal em 2.3 apresenta duas parcelas, uma condutiva e outra susceptiva, que são desenvolvidas em (2.25).

$$\dot{U}_a = V_a \angle \Theta_a = V_a \cdot (\cos \Theta_a + j \sin \Theta_a) \quad (2.23)$$

$$\dot{U}_b = V_b \angle \Theta_b = V_b \cdot (\cos \Theta_b + j \sin \Theta_b) \quad (2.24)$$

$$Y_{ab} = G_{ab} + j \cdot B_{ab} \quad (2.25)$$

Finalmente, substituindo-se (2.23), (2.24) e (2.25) em (2.22) obtém-se (2.26).

$$S_a = \left(\left(\sum_{b=1}^n G_{ab} \cdot V_a \cdot V_b \angle \Theta_{ab} \right) - j \cdot B_{ab} \cdot V_b \cdot V_a \angle \Theta_{ab} \right) \quad (2.26)$$

A potência injetada na barra, (2.26), é dividida em parte real e imaginária, (2.27) e (2.28):

$$G = G_{ab} \cdot V_b \cdot V_a \cdot (\cos \Theta_{ab} + j \cdot \sin \Theta_{ab}) \quad (2.27)$$

$$B = -j \cdot B_{ab} \cdot V_b \cdot V_a \cdot (\cos \Theta_{ab} + j \cdot \sin \Theta_{ab}) \quad (2.28)$$

Para finalizar, a potência aparente injetada na barra é apresentada em (2.29) para um sistema elétrico de n barras, com suas parcelas de potência ativa e reativa apresentadas em (2.30) e (2.31).

$$S_a = \sum_{b=1}^n (G + B) \quad (2.29)$$

$$P_a = V_a \cdot \sum_{b=1}^n (V_b \cdot (G_{ab} \cdot \cos \Theta_{ab} + B_{ab} \cdot \sin \Theta_{ab})), \forall a = 1, \dots, n \quad (2.30)$$

$$Q_a = V_a \cdot \sum_{m=1}^n (V_a \cdot (G_{ab} \cdot \sin \Theta_{ab} - B_{ab} \cdot \cos \Theta_{ab})), \forall a = 1, \dots, n \quad (2.31)$$

onde:

– n é o número de barras do sistema estudado;

- V_a e V_b são os módulos das tensões nas barras do sistema genérico;
- Θ_a e Θ_b são os ângulos das tensões nas barras do sistema;

2.4

Método de Newton-Raphson para Solução do Fluxo de Potência

As equações do fluxo de carga (2.30) e (2.31) formam um sistema não-linear. Para resolver esse sistema é utilizado o método numérico de Newton-Raphson [6]. O método de Newton-Raphson consiste em realizar sucessivas aproximações até convergir e resolver as equações de carga.

Pode-se caracterizar cada barrar através de 4 variáveis:

- V_k : módulo da tensão na barra k ;
- θ_k : ângulo da tensão na barra k ;
- P_k : potência ativa líquida injetada na barra k ;
- Q_k : potência reativa líquida injetada na barra k ;

Essas variáveis são divididas em dois tipos: variáveis de controle e variáveis de estado. As variáveis de controle são as dadas e as variáveis de estado são aquelas a serem calculadas.

As barras são classificadas e modeladas levando em consideram o seu papel no funcionamento do SEE. Assim, definem-se os seguintes tipos de barra:

- Barra de carga ou PQ: Não há controle de tensão nas barras e não possuem geração. Conhecem-se as variáveis P_k e Q_k , e calculam-se V_k e θ_k .
- Barra de tensão controlada ou PV: Possuem dispositivos de controle que permitem manter o módulo de tensão e a injeção de potência ativa dentro da faixa de valores especificados. Conhecem-se as variáveis P_k e V_k , e calculam-se Q_k e θ_k .
- Barra de referência, swing ou V θ : Na maioria das referências ([7], [4]) esses três tipos de barras são consideradas como do mesmo tipo. De maneira genérica, é a barra que fornece a referência angular do sistema, fechando o balanço de perdas de potência ativa do sistema. Conhecem-se as variáveis V_k e θ_k , e calculam-se P_k e Q_k .

Porém, as barras swing e de referência angular não são necessariamente as mesmas. A barra swing tem o papel de compensar as perdas de potência ativa. Uma barra swing tem P livre para variar, isto é, dentro dos limites configurados. Uma barra swing pode ou não ter V controlada. Por outro lado, a barra de referência angular é a barra com ângulo de referência fixo, normalmente igual a zero.

- Barra de controle de tensão ou P: Possui Q variável, é utilizada para controle da tensão em uma barra remota. Conhecem-se as variáveis P_k , e calculam-se Q_k , V_k e θ_k .
- Barra remota ou PQV: É uma barra de carga que tem sua tensão controlada remotamente por uma ou mais barras P. O controle remoto de tensão pode ser efetuado por um ou mais taps variáveis. Conhecem-se as variáveis P_k , Q_k e V_K , calculam-se θ_k .

A primeira etapa para resolução das equações de fluxo de potência consiste em calcular V e θ para todas as barras do sistema. Portanto, pretende-se calcular V_k e θ_k nas barras PQ e θ_k nas barras PV.

Após conhecer V_k e θ_k para todas as barras da rede, a segunda etapa consiste em calcular P_k e Q_k para a barra V θ , e Q_k para as barras PV, assim como outras variáveis de interesse. É importante ressaltar que a barra V θ é responsável por fechar o balanço de perdas do sistema.

O método de Newton-Raphson modela e soluciona um sistema de equações composto por duas equações e duas incógnitas para cada barra PQ e uma equação e uma incógnita para cada barra PV.

Com o objetivo de modelar o sistema algébrico e resolver o fluxo de potência nas barras PQ e PV, escreve-se uma equação para P especificado:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - P_k = 0 \quad (2.32)$$

E para as barras PQ, escreve-se uma equação para Q especificado:

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - Q_k = 0 \quad (2.33)$$

P_k^{esp} e Q_k^{esp} são as potências ativas e reativas especificadas na barra k, e P_k e Q_k são as potências ativas e reativas injetadas nas barras, dados por (2.30) e (2.31).

As equações (2.32) e (2.33) são reescritas em sua forma vetorial, (2.34) e (2.35):

$$\Delta P = P^{esp} - P(V, \theta) \quad (2.34)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q(V, \theta) \quad (2.35)$$

Defini-se a função vetorial $g(x)$:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta \bar{P} \\ \Delta \bar{Q} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

As variáveis a calcular-se são:

$$x = \begin{bmatrix} \bar{\theta} \\ \bar{V} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

O método de Newton-Raphson consiste em calcular novos valores de P_k e Q_k até obter-se $g(x) = 0$.

Portanto, pretende-se determinar os valores de θ_k e V_k para quando a potência ativa e reativa P_k e Q_k é idêntica à potência ativa e reativa especificada, resultando em $g(x) = 0$.

O problema de obter-se x que resulta em $g(x) = 0$ é solucionado pelo método de Newton-Raphson com o seguinte passo a passo:

1. Define-se um contador de iterações $i=0$ e escolhe-se $\theta_k^{(0)}$ inicial para as barras PQ e PV e $V_k^{(0)}$ inicial para as barras PQ.
2. Com $\theta_k^{(0)}$ e $V_k^{(0)}$ iniciais, calcula-se $P_k^{(i)}$ para as barras PQ e PV e $Q_k^{(i)}$ para as barras PQ, e calcula-se os resíduos $\Delta P_k^{(i)}$ e $\Delta Q_k^{(i)}$.
3. Compara-se $g(x^{(i)})$ com a tolerância ε . Caso, $\max |\Delta P_k^{(i)}| < \varepsilon$ e $\max |\Delta Q_k^{(i)}| < \varepsilon$, o método de Newton-Raphson convergiu e a solução $\theta_k^{(i)}$ e $V_k^{(i)}$ foi encontrada. Quando a condição de convergência não é atingida, passa-se para o próximo passo.
4. Lineariza-se $g(x^{(i)})$ em torno do ponto $(x^{(i)}; g(x^{(i)}))$ por intermédio da série de Taylor, desprezando-se os termos de ordem maior que 1:

$$g(x^{(i)} + \Delta x^{(i)}) \simeq g(x^{(i)}) + g'(x^{(i)}) \Delta x \quad (2.38)$$

sendo $g'(x)$ a derivada de primeira ordem, assim $g'(x) = \frac{dg}{dx}$.

Finalmente, ao linearizar (2.38) para solucionar o fluxo de carga, define-se a matriz Jacobiano como:

$$J^{(i)} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \Theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \Theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

A matriz Jacobiana é dividida em quatro subgrupos ou sub-matrizes:

- H: derivada parcial da potência ativa com relação a Θ ;
- L: derivada parcial da potência ativa com relação a V;
- M: derivada parcial da potência reativa com relação a Θ ;
- N: derivada parcial da potência reativa com relação a V.

Os elementos das sub-matrizes H, N, M e L são dados por:

$$H_{lm} = \frac{\partial P_l}{\partial \Theta_m} = V_l \cdot V_m \cdot (G_{lm} \sin \theta_{lm} - B_{lm} \cos \theta_{lm})$$

$$H_{ll} = \frac{\partial P_l}{\partial \Theta_l} = -V_l^2 \cdot B_{kk} - V_l \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{lm} \sin \theta_{lm} - B_{lm} \cos \theta_{lm})$$

$$\begin{aligned}
N_{lm} &= \frac{\partial P_l}{\partial V_m} = V_l \cdot (G_{lm} \cos \theta_{lm} + B_{lm} \sin \theta_{lm}) \\
N_{ll} &= \frac{\partial P_l}{\partial V_l} = V_l \cdot G_{ll} - V_l \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{lm} \sin \theta_{lm} - B_{lm} \cos \theta_{lm}) \\
M_{lm} &= \frac{\partial Q_l}{\partial \Theta_m} = -V_l \cdot V_m \cdot (G_{lm} \cos \theta_{lm} - B_{lm} \sin \theta_{lm}) \\
M_{ll} &= \frac{\partial Q_l}{\partial \Theta_l} = -V_l^2 \cdot G_{ll} + V_l \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{lm} \cos \theta_{lm} + B_{lm} \sin \theta_{lm}) \\
L_{lm} &= \frac{\partial Q_l}{\partial V_m} = V_l \cdot (G_{lm} \sin \theta_{lm} - B_{lm} \cos \theta_{lm}) \\
L_{ll} &= \frac{\partial Q_l}{\partial \Theta_l} = -V_l \cdot B_{ll} + V_l \cdot \sum_{m=1}^n V_m \cdot (G_{lm} \sin \theta_{lm} - B_{lm} \cos \theta_{lm})
\end{aligned}$$

5. Ao linearizar $g(x^{(i)})$, obtêm-se:

$$g(x^{(i)}) + g'(x^{(i)}) \Delta x = 0$$

que é reescrito de uma forma mais conveniente:

$$g(x^{(i)}) = -g'(x^{(i)}) \Delta x \quad (2.40)$$

Rearranjando-se (2.40) e substituindo-se a matriz Jacobiano, (2.36) e (2.37). Resulta no seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \Theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \Theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}_J \begin{bmatrix} \Delta \Theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

onde:

- J é a matriz Jacobiana, aplicando a linearização de Taylor em (2.30) e (2.31), consistindo nas derivadas parciais de P e Q com relação a V e Θ .
- ΔP é o resíduo de potência ativa em todas as barras do sistema com exceção das barras do tipo V Θ , onde não se define P. Portanto, as equações relativas a P serão excluídas do sistema (2.41).
- ΔQ é o resíduo de potência reativa em todas as barras do sistema com exceção das barras do tipo PV e V Θ , onde não se define Q. Portanto, as equações relativas a Q serão excluídas do sistema (2.41).
- $\Delta \Theta$ é o resíduo do ângulo da tensão nas barras.
- ΔV é o resíduo do módulo da tensão nas barras.

6. Determinam-se novos resíduos, fazendo-se:

$$\theta^{(i+1)} = \theta^{(i)} + \Delta\theta^{(i)} \quad \text{e} \quad V^{(i+1)} = V^{(i)} + \Delta V^{(i)}$$

7. Faz-se $i = i + 1$ e retorna-se ao passo 2.

2.5

Sumário do Capítulo

Nesse capítulo foi apresentado o método numérico de Newton-Raphson, junto com o desenvolvimento das equações de fluxo de carga, para solucionar-se as equações de fluxo de carga do sistema elétrico de potência.

O fluxo de potência em conjunto com a matriz Jacobiana podem ser utilizados como instrumentos para obtenção de índices de estabilidade de tensão.

Esses índices são tema de estudo do presente trabalho e são apresentados nos Capítulos 3 e 4.

3

Estabilidade de Tensão

O conceito de estabilidade de tensão é definido pela capacidade que um sistema elétrico de potência possui em manter suas barras operando sob as condições normais de operação, mesmo quando submetido a distúrbios da rede [2].

Na ocorrência de distúrbios como aumento da carga ou perda da geração, o sistema pode passar a operar fora da região usual, nesse caso, ações de controle podem ter resultados contrários ao esperado.

Tradicionalmente, o problema da estabilidade de tensão tem sua origem no alto carregamento das linhas de transmissão e conseguinte aumento da compensação de potência reativa[2].

Um dos principais objetivos do estudo de estabilidade de tensão é identificar quando o sistema de potência passa a operar fora da região usual de operação. Nesse capítulo são introduzidos os conceitos iniciais de estabilidade de tensão e o limite de estabilidade angular (LEEA) para um sistema simplificado de duas barras nas Seções 3.1 e 3.2. Na Seção 3.3 desenvolve-se a impedância da carga no máximo carregamento do sistema e na Seção 3.4 apresenta-se o lugar geométrico formado pelo conjunto de máximos carregamentos e limite de estabilidade de tensão (LET) do sistema. E, finalmente, na Seção 3.5 apresenta-se um modelo matemático simples para avaliar, utilizando-se a matriz Jacobiano, em qual região de operação o SEE encontra-se.

3.1

Límite de Estabilidade Estática Angular

Para o estudo do limite de estabilidade "estática" angular é calculado o limite máximo do carregamento de potência ativa para um sistema de duas barras [8], Figura 3.1.

O sistema exemplo de duas barras é composto por um gerador com capacidade infinita de geração, uma carga com potência constante e uma linha de transmissão sem limite térmico. Para simplificar o estudo, as admitâncias *shunt* da linha de transmissão são desprezadas, sem perda de generalidade.

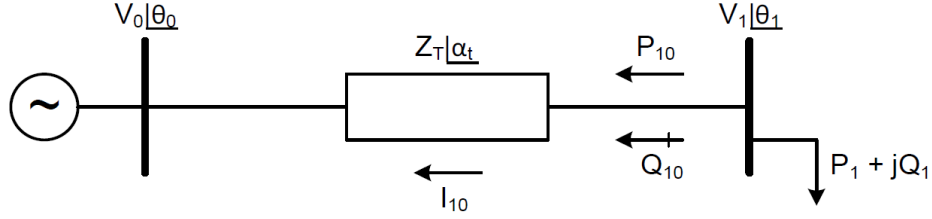


Figura 3.1: Circuito de Duas Barras

O estudo foi desenvolvido para um sistema de potência com os seguintes parâmetros:

$$\begin{aligned} V_0 &= 1 \text{ pu} \\ \theta_0 &= 0^\circ \\ Z_t &= 0,2 \text{ pu} \\ \alpha &= 70^\circ \\ -\infty &< P_0 < +\infty \\ -\infty &< Q_0 < +\infty \end{aligned}$$

Na Figura 3.1, o fluxo da potência aparente partindo da carga é dado por:

$$S_{10}^* = P_{10} - jQ_{10} = V_{10}^* I_{10} \quad (3.1)$$

A corrente da barra 1 para barra 0 e a tensão conjugada na barra 1 são definidas como em:

$$I_{10} = \frac{V_1 \angle \theta_1 - V_0 \angle \theta_0}{Z_t \angle \alpha_t} \quad (3.2)$$

$$V_1^* = V_1 \angle -\theta_1 \quad (3.3)$$

Portanto, é possível substituir (3.2) e (3.3) em (3.1) obtendo-se (3.4), que pode ser desmembrado em parte real (3.5) e imaginária (3.6).

$$S_{10}^* = \left[\frac{V_1^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] - j \left[\frac{V_1^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] \quad (3.4)$$

$$P_{10} = -P_1 = \frac{V_1^2 \cos(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (3.5)$$

$$Q_{10} = -Q_1 = \frac{V_1^2 \sin(\alpha_t)}{Z_t} - \frac{V_1 V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \quad (3.6)$$

O objetivo é determinar a potência máxima que pode ser entregue à carga. Considera-se V_1 constante em (3.5), traçando-se a curva da potência consumida na carga em função do ângulo da tensão na barra 1, Figura 3.2.

Na Figura 3.2 apresentam-se curvas V_1 constante no plano ΘV para diversos valores de V_1 . Observa-se que para todas as curvas traçadas, com V_1 constante, existe uma máxima potência ativa que pode ser transmitida à carga, quando $\theta_1 = -\alpha_t$.

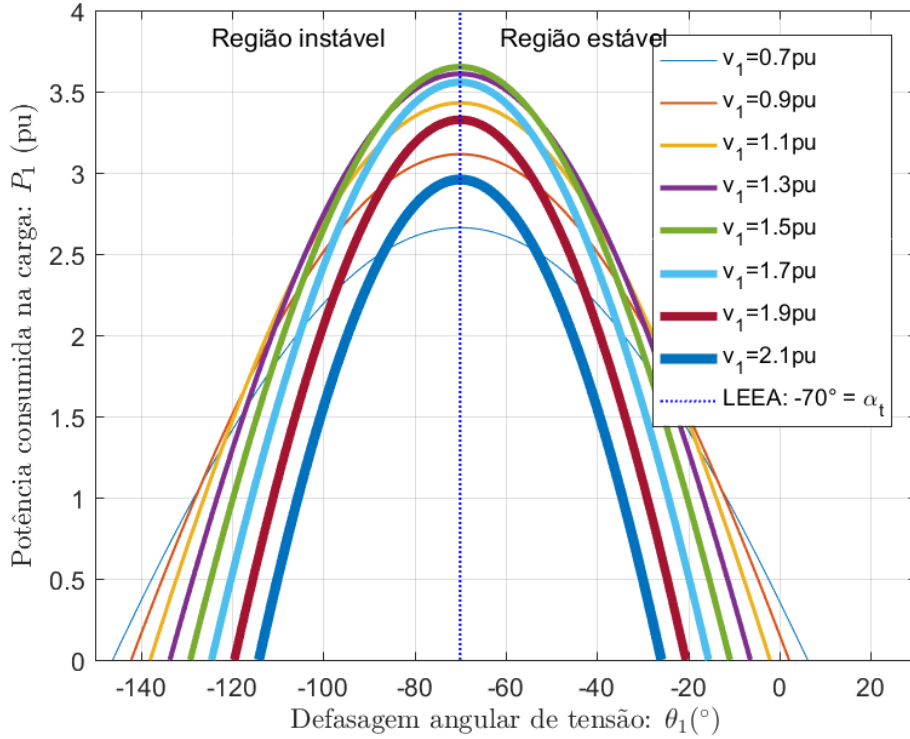
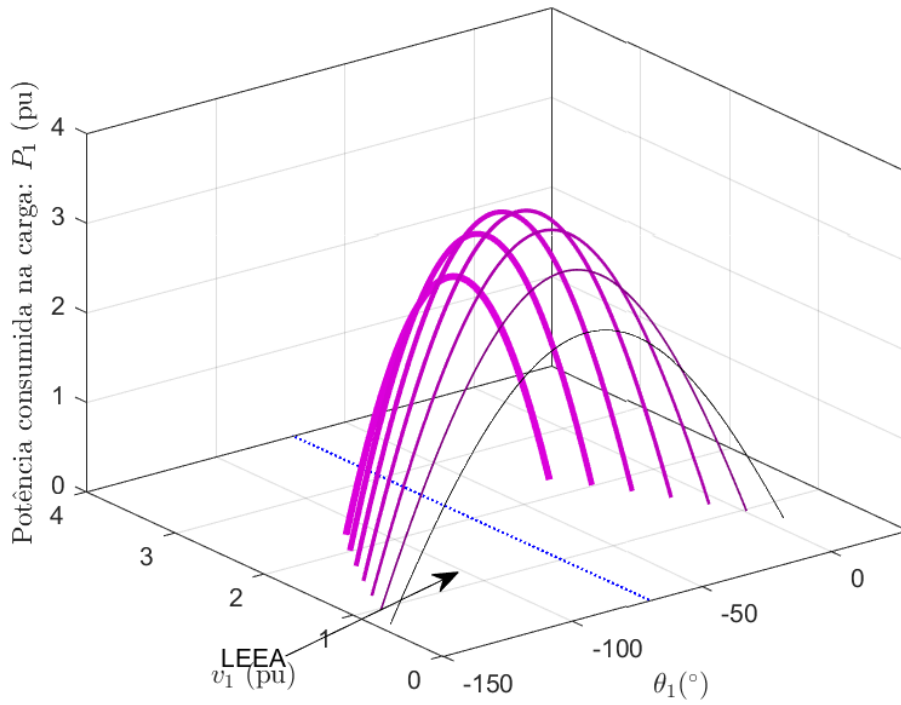


Figura 3.2: Curvas V_1 Constante no Plano ΘV

Ao observar a relação entre V_1 e P_1 na Figura 3.2, percebe-se que a medida que V_1 aumenta o valor máximo de P_1 aumenta. Entretanto, a partir de certo valor de V_1 , à medida que V_1 aumenta, o valor máximo de P_1 decresce. Portanto, existe uma potência ativa máxima que pode ser transmitida para a carga, mesmo com capacidade infinita de compensação de potência reativa na barra de carga. Essa potência máxima é conhecida como potência “maximum maximorum” [8].

A potência “maximum maximorum” pode ser observada com facilidade na Figura 3.3. A reta definida por $\theta_1 = -\alpha_t$, determina o limite de estabilidade “estática” angular (LEEAA), e pode ser observada nas Figuras 3.2 e 3.3 [8].

Figura 3.3: Curvas V_1 Constante nos Eixos Θ_1VP

3.2

Curvas P e Q com Φ Constantes

O objetivo desta seção é avaliar o aumento do carregamento do sistema de duas barras, Figura 3.1, e definir a existência uma máxima carga ativa.

Reescrevendo-se (3.5) e (3.6) para visualizar uma equação quadrática em função de V_1 , obtêm-se:

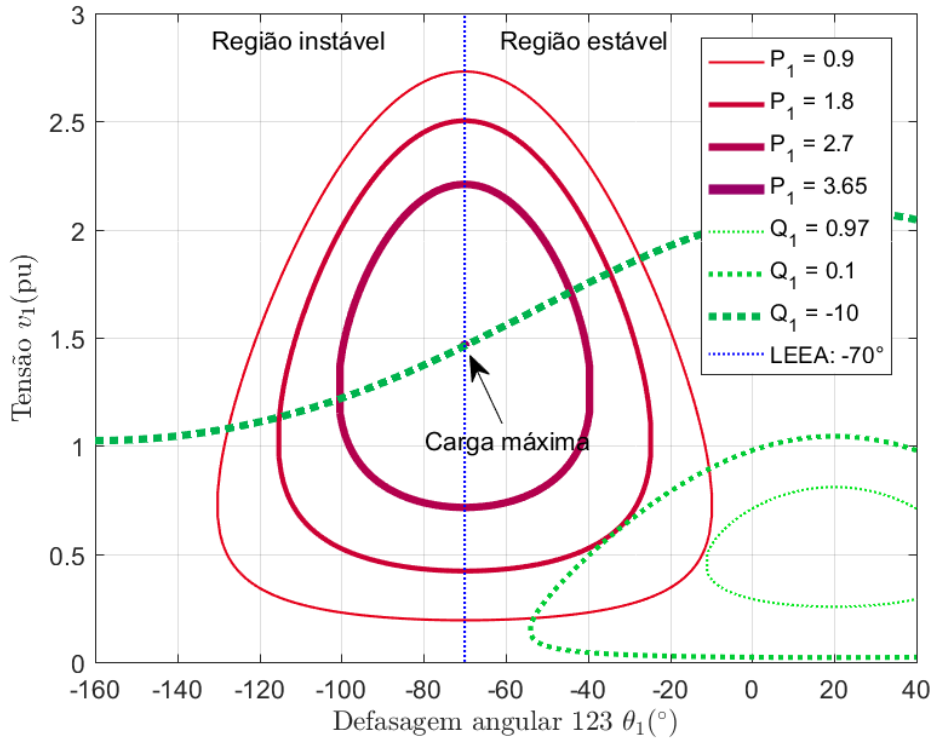
$$V_1^2 \left[\frac{\cos(\alpha_t)}{Z_t} \right] - V_1 \left[\frac{V_0 \cos(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + P_1 = 0 \quad (3.7)$$

$$V_1^2 \left[\frac{\sin(\alpha_t)}{Z_t} \right] - V_1 \left[\frac{V_0 \sin(\theta_{10} + \alpha_t)}{Z_t} \right] + Q_1 = 0 \quad (3.8)$$

Da mesma forma como foram traçadas curvas no plano ΘP na Figura 3.2, pode-se traçar curvas no plano ΘV . Fazendo-se P_1 constante e variando θ_1 em (3.7), pode-se calcular V_1 e, portanto, traçar a curva P_1 constante no plano ΘV . Analogamente, variando-se θ_1 em (3.8), pode-se calcular V_1 e, assim traçar a curva Q_1 constante no plano ΘV .

Na Figura 3.4, apresentam-se as curvas de nível para quatro valores de P_1 e Q_1 .

Na Figura 3.4 observa-se a existência de uma máxima carga ativa (“maximum maximorum”), mesmo com compensação ilimitada de potência

Figura 3.4: P_1 e Q_1 Constantes no Plano $\Theta_1 V_1$

reativa. Nesse sistema de duas barras, a carga máxima é obtida para $P_1 = 3,65$ MW e $Q_1 = -10,00$ Mvar.

Percebe-se uma correspondência entre as curvas das Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, com todas indicando a existência de uma máxima potência que pode ser transmitida para carga.

Assim, os pontos de operação formados por pares $\theta_1 V_1$ com $\theta_1 = -\alpha_t$ definem o lugar geométrico chamado de LEEA. O LEEA é obtido fazendo-se V_1 constante e calculando o ponto de máximo em (3.5).

Ao traçar as curvas no plano ΘV para diferentes valores de P e Q , porém, mantendo-se o fator de potência ϕ constante, um melhor entendimento do comportamento do sistema frente ao aumento da capacidade de transmissão de carga é obtido.

Na Figura 3.5 apresenta-se novamente P e Q constantes, como na Figura 3.4, mais a curva ϕ constante no plano ΘV , variando-se θ_1 em (3.9) e calculando-se V_1 .

$$V_1 = \frac{V_0 [\sin(\theta_{01} + \alpha_t) - \tan(\phi) \cos(\theta_{01} + \alpha_t)]}{\sin(\alpha_t) - \tan(\phi) \cos(\alpha_t)} \quad (3.9)$$

Analisando-se as curvas da Figura 3.5, verifica-se que para a carga, $P_a + jQ_a$, pode-se ter duas soluções de tensão: V_a e V'_a (interseção das curvas P_a e Q_a).

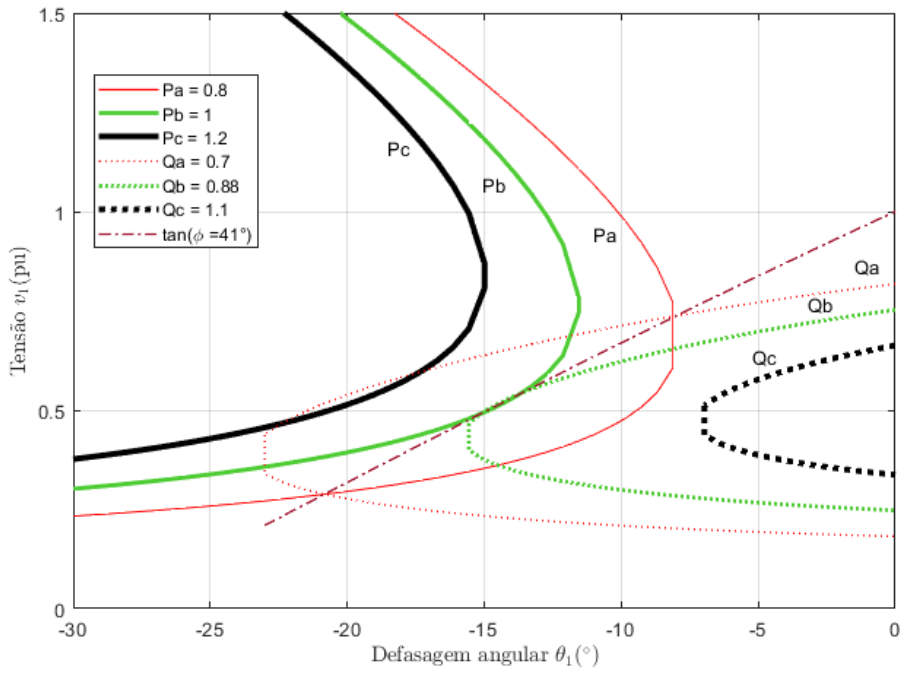


Figura 3.5: Curvas P e Q com o mesmo Fator de Potência

Aumentando-se a carga para $P_b + jQ_b$, mantendo-se o fator de potência constante, as duas soluções de tensão V_b e V'_b aproximam-se até coincidirem em um único ponto $V_b = V'_b$, interseção das curvas P_b e Q_b .

Assim, conclui-se que se P e Q continuarem aumentando, a curva P_c constante no plano $\theta_1 V_1$ e Q_c constante no plano $\theta_1 V_1$ não mais se cruzam, ou seja, não há solução para a tensão. Desta forma, para certo fator de potência ϕ , há uma máxima carga ativa e reativa que pode ser alimentada.

Portanto, pode-se verificar a existência de duas, uma ou nenhuma solução para a tensão ao aumentar o carregamento do sistema. Quando há duas soluções para a tensão em uma barra do sistema, uma delas pertencerá à região normal de operação e a outra à região anormal de operação, onde ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado [8].

3.3

Impedância da Carga no Máximo Carregamento

A máxima potência que pode ser transmitida para uma carga, para cada fator de potência, está relacionada ao valor de sua impedância equivalente. Será demonstrado que no ponto de máxima potência a impedância da carga é igual à impedância da linha de transmissão (“casamento de impedância”).

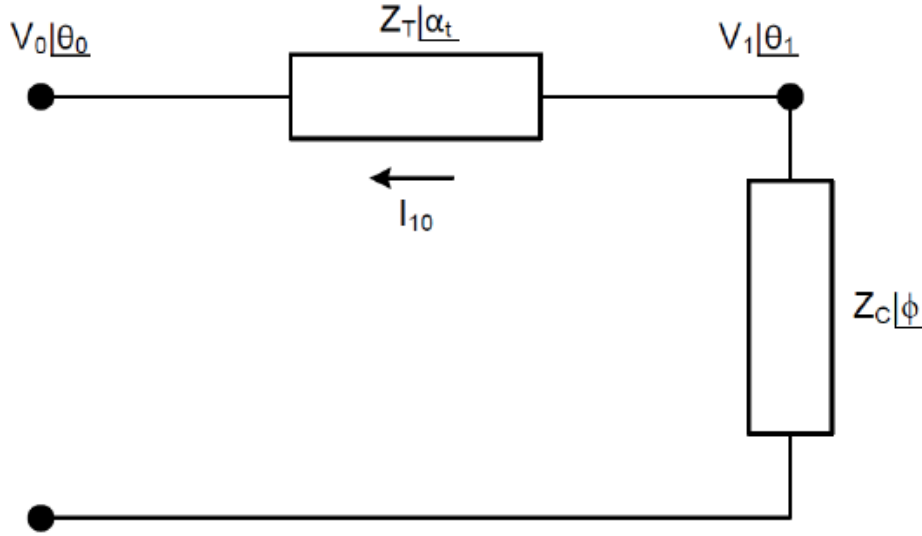


Figura 3.6: Circuito com as Impedâncias da Transmissão e da Carga

Na Figura 3.6, a corrente que flui para a carga é:

$$I_{01} = \frac{V_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_C \angle \phi}$$

Logo:

$$I_{01} = \frac{V_0}{\sqrt{(Z_t \cos(\alpha_t) + Z_c \cos(\phi))^2 + (Z_t \sin(\alpha_t) + Z_c \sin(\phi))^2}} \quad (3.10)$$

Por outro lado:

$$P_{10} = -P_1 = -I_{01}^2 Z_C \cos(\phi) \quad (3.11)$$

Substituindo-se (3.10) em (3.11):

$$P_{10} = -\frac{V_0^2 Z_C \cos(\phi)}{Z_t^2 \cos^2(\alpha_t) + 2Z_t Z_C \cos(\alpha_t) \cos(\phi) + Z_C^2 \cos^2(\phi) + Z_t^2 \sin^2(\alpha_t) + 2Z_t Z_C \sin(\alpha_t) \sin(\phi) + Z_C^2 \sin^2(\phi)} \quad (3.12)$$

Aplicando-se a propriedade trigonométrica do cosseno da diferença em (3.12), é possível reescrever:

$$P_{10} = -P_1 = \frac{V_0^2 Z_C \cos(\phi)}{Z_t^2 + Z_C^2 + 2Z_t Z_C \cos(\alpha_t - \phi)} \quad (3.13)$$

Como o objetivo é obter a impedância de carga no máximo carregamento:

$$\frac{\partial P_1}{\partial Z_C} = \frac{V_0^2 \cos(\phi) [Z_t^2 + Z_C^2 + 2Z_t Z_C \cos(\alpha_t - \phi)]}{[Z_t^2 + Z_C^2 + 2Z_t Z_C \cos(\alpha_t - \phi)]^2} - \frac{V_0^2 Z_C \cos(\phi) [2Z_C + 2Z_t \cos(\alpha_t - \phi)]}{[Z_t^2 + Z_C^2 + 2Z_t Z_C \cos(\alpha_t - \phi)]^2} = 0 \quad (3.14)$$

Rearranjando-se (3.14) obtêm-se:

$$V_0^2 Z_t^2 \cos(\phi) = V_0^2 Z_C^2 \cos(\phi) \therefore Z_C = Z_t \quad (3.15)$$

O segundo passo na análise de (3.13) é avaliar se o ponto de inflexão encontrado em (3.15) é um ponto de máximo ou mínimo. Faz-se a segunda derivada da potência injetada igual a zero em 3.16. Como a segunda derivada com $Z_c = Z_t$ é menor que zero, conclui-se que quando $Z_c = Z_t$, P_1 é máximo.

$$\frac{\partial^2 P_1}{\partial Z_C^2} = 0 \quad (3.16)$$

3.4

Limite de Estabilidade de Tensão

O conjunto dos pontos de operação no máximo carregamento define o lugar geométrico chamado de limite de estabilidade de tensão (LET). Partindo de (3.13), chega-se a uma relação analítica que permite identificar o LET.

Para o ponto de máximo carregamento, o módulo da impedância da carga é igual ao módulo da impedância da linha de transmissão. Substituindo-se (3.15) em (3.13), obtém-se:

$$P_{10}^{min} = \frac{V_0^2 Z_C \cos(\phi)}{2Z_C^2 [1 + \cos(\alpha_t - \phi)]} = -\frac{V_0^2 \cos(\phi)}{4Z_C \cos^2\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)}$$

A carga máxima é então:

$$P_1^{max} = \frac{V_0^2 \cos(\phi)}{4Z_C \cos^2\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)}$$

A tensão na barra 1 é calculada como o produto da impedância da carga pela corrente:

$$V_1 = Z_C I_{01}$$

Logo:

$$V_1 = \frac{V_0 Z_C}{\sqrt{2Z_t^2 (1 + \cos(\alpha_t - \phi))}} \therefore V_1 = \frac{V_0}{\sqrt{4 \cos^2\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)}}$$

Assim, a tensão no ponto de máximo carregamento é:

$$V_1 = \frac{V_0}{2 \cos\left(\frac{\alpha_t - \phi}{2}\right)} \quad (3.17)$$

A tensão na barra 1, pode ser escrita como:

$$\dot{V}_1 = \dot{Z}_C \dot{I}_{01} \therefore V_1 \angle \theta_1 = Z_C \angle \phi \frac{\dot{V}_0}{Z_t \angle \alpha_t + Z_C \angle \phi} \quad (3.18)$$

Expandindo-se (3.18) e considerando-se apenas a parte real de \dot{V}_1 , obtém-se:

$$V_1 \cos(\theta_1) = \frac{V_0 [\cos(\alpha_t) \cos(\phi) + \cos^2(\phi) + \sin(\alpha_t) \sin(\phi) + \sin^2(\phi)]}{\cos^2(\alpha_t) + 2 \cos(\alpha_t) + \cos^2(\phi) + \sin^2(\alpha_t) + 2 \sin(\alpha_t) + \sin^2(\phi)} \quad (3.19)$$

Reduzindo e simplificando (3.19), obtém-se:

$$V_1 = \frac{V_0}{2 \cos(\theta_1)} \quad (3.20)$$

Igualando-se (3.17) e (3.20), o ângulo na barra 1, no ponto de máximo carregamento é:

$$\theta_1 = \frac{\alpha_t - \phi}{2} \quad (3.21)$$

A máxima transmissão de potência à carga, para cada fator de potência, define o LET. Em outras palavras, variando-se ϕ e utilizando-se (3.20) e (3.21) traça-se o LET sobre as curvas de ϕ constante no plano SV, conforme Figura 3.7.

Na Figura 3.7 mostra-se diferentes curvas no plano SV, uma para cada fator de potência ϕ e a curva do LET passando por todos os pontos de máximo carregamento. As curvas no plano SV com fator de potência constante são também conhecidas como curvas do nariz [2].

O LET passa pelas “pontas do nariz” de todas as curvas para ϕ constante no plano SV, isto é, une todos os pontos de máximo carregamento. Além disso, o LET separa as duas regiões de operação: região superior da curva ϕ constante no plano SV, onde se tem controle sobre a tensão e região inferior da curva para ϕ constante no plano SV, onde as ações de controle de tensão podem ter efeito oposto ao esperado [2].

3.5

Índices para Avaliação da Estabilidade de Tensão

A operação na parte inferior da curva SV não é considerada normal. Portanto, torna-se importante métodos para avaliação em tempo real se a barra opera na parte inferior ou superior da curva SV.

Assim, são desenvolvidos índices de estabilidade de tensão que representam a margem operativa do sistema [1], para cálculo em tempo real. Desenvolveu-se, portanto, uma ferramenta analítica de avaliação das condições nodais associadas ao máximo fluxo de potência ativa e reativa de uma rede de transmissão.

Baseado em um modelo matemático simples e de direta interpretação física do fenômeno, são deduzidos índices abrangentes e significativos para

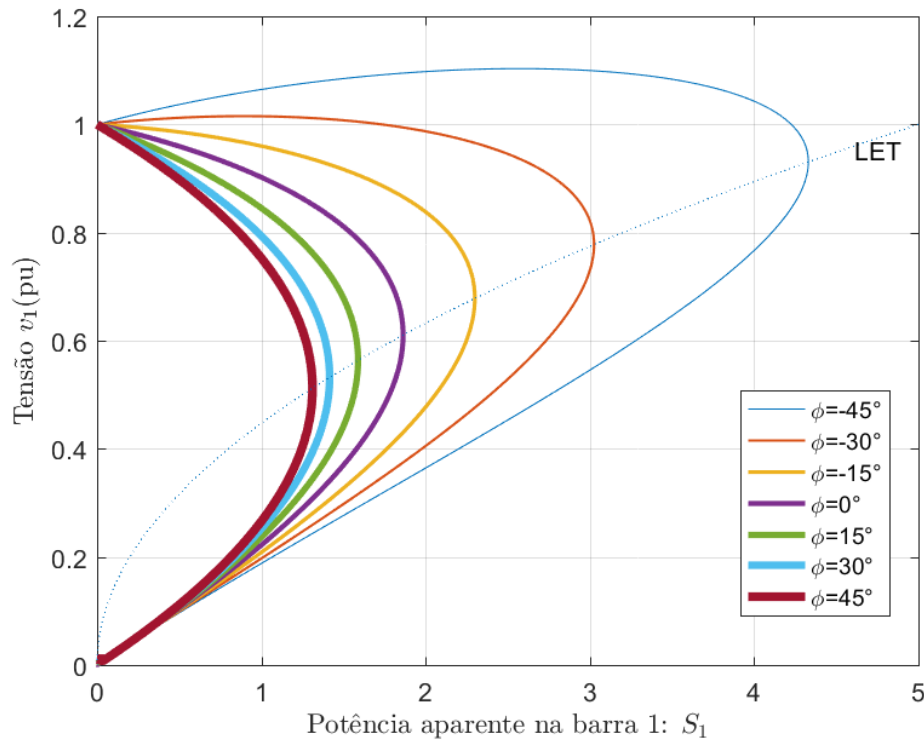


Figura 3.7: Limite de Estabilidade de Tensão Sobre as Curvas de ϕ Constante no Plano SV

avaliação da região de operação da curva ϕ constante no plano SV.

3.5.1 Método da Matriz $[D']$

O objetivo é ter-se uma ferramenta que permita identificar se a barra i opera na região superior ou inferior da curva ϕ constante no plano SV, ou no caso do plano VQ, do lado direito ou esquerdo.

Considera-se inicialmente a barra em análise como do tipo PQ. O sistema linearizado das equações estáticas de fluxo de potência, (2.39), é reescrito com o deslocamento para baixo das equações referentes a barra i e para a direita das colunas referentes as suas variáveis:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \\ \hline \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots & \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial P_k}{\partial v_m} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial P_m}{\partial v_m} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_m}{\partial v_i} \\ \vdots & \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial Q_k}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial v_i} \\ \vdots & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_m}{\partial v_i} \\ \hline \vdots & \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial P_i}{\partial v_m} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial v_i} \\ \vdots & \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_m} \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_k} \cdots & \frac{\partial Q_i}{\partial v_m} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial v_i} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vdots \\ \Delta \theta_k \\ \vdots \\ \Delta \theta_m \\ \vdots \\ \Delta v_k \\ \vdots \\ \Delta v_m \\ \hline \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

A matriz Jacobiano em (3.22) é, portanto, dividida em quatro submatrizes A, B, C e D, como em (3.23).

$$\begin{bmatrix} \Delta P' \\ \Delta Q' \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta v' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

O objetivo de um estudo de estabilidade de tensão nas barras de um sistema elétrico de potência é identificar o efeito de aumentos de carga.

Portanto, estudam-se variações infinitesimais em ΔP_i e ΔQ_i e seus efeitos em $\Delta \theta_i$ e Δv_i . Para avaliar as variações de P e Q na barra i é necessário fixar P e Q nas demais barras do sistema e assim faz-se $\Delta P' = \Delta Q' = 0$:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta' \\ \Delta v' \\ \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Ao desenvolver algebricamente (3.24), obtêm-se a relação de potência ativa e reativa injetadas com módulo e ângulo da tensão na barra i em (3.25).

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = [D - CA^{-1}B] \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta v_i \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

A matriz $[D']$ é definida por:

$$[D'] = [D - CA^{-1}B] \quad (3.26)$$

Em trabalhos anteriores [1] e em diversos estudos da área de estabilidade é demonstrado que o módulo e o sinal do determinante da matriz $[D']$ indicam respetivamente a distância do ponto de máximo carregamento e a região da curva ϕ constante no plano SV.

No presente estudo, porém, o método da matriz $[D']$ será utilizado como base para desenvolver uma relação de sensibilidade QV ou VQ.

3.6

Sumário do Capítulo

Nesse capítulo foi apresentado de maneira analítica e numérica, o limite da estabilidade de tensão para um sistema de duas barras.

Para esse sistema foi determinada a máxima potência que pode ser entregue a carga e sua relação com o LET.

O LET permite desenvolver o conceito de duas regiões de operação para o sistema de potência.

Foi introduzido o índice de estabilidade de tensão baseado na matriz $[D']$ que será discutido em maior profundidade no Capítulo 4 para desenvolvimento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$.

4

Avaliação da Estabilidade de Tensão

4.1

Introdução

O problema de estabilidade de tensão é motivo de preocupação das equipes de operação e planejamento de sistemas elétrico de potência. Assim, cada vez mais engenheiros estão utilizando ferramentas que levam em consideração o problema da estabilidade de tensão para operar e planejar o sistema de potência.

Este capítulo aborda dois índices com aplicação na análise da estabilidade de tensão: a curva QV e o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$. E discorre sobre como obter esses índices, sua aplicabilidade, e possíveis incoerências no estudo da estabilidade de tensão.

Nessa dissertação, almeja-se explicitar as premissas utilizadas na obtenção desses índices e, conseqüentemente, analisar suas similaridades e diferenças. Em alguns casos, a avaliação de operação na região normal obtida com um desses índices pode divergir com relação ao outro índice. Essas prováveis divergências serão investigadas.

A curva QV é um gráfico formado pela tensão de uma barra i no eixo x das abscissas e pela potência reativa absorvida ou gerada na barra i no eixo y das ordenadas. Em 2000, Chowdhury e Taylor publicaram um artigo abordando o uso a curva QV frente a técnicas de simulação dinâmica de longo prazo [9].

A nomenclatura natural para este gráfico seria curva VQ, como pode ser encontrado na literatura [9]. Porém, nesse trabalho será adotado o nome de “curva QV”, utilizado pelo *software* ANAREDE do CEPEL.

O método da curva QV permite estimar, em determinada barra i do sistema, a potência reativa gerada ou absorvida (Q), para determinada tensão (V). Este recurso oferece um panorama do desempenho do sistema durante eventos que possam comprometer a margem de potência reativa.

Um segundo método para avaliar a estabilidade de tensão abordado nesse trabalho consiste em utilizar a matriz D' [1]. Dessa matriz obtém-se o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, índice que representa a sensibilidade QV em uma barra em um ponto

de operação. Em 1992, Gao, Baofu, Morison e Kundur publicaram um artigo abordando o uso da análise modal para avaliar a estabilidade de tensão [10] a partir da matriz QV.

Nesse capítulo será discutido o procedimento para obtenção da curva QV na Seção 4.2 e sua utilização para avaliar a estabilidade de sistemas de potência na Seção 4.3. O procedimento para obtenção do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ é apresentado e discutido na Seção 4.4, enquanto que sua aplicabilidade na avaliação de sistema de potência é abordada na Seção 4.5. E finalmente, na Seção 4.6 são apresentadas as possíveis diferenças nos índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e lado da curva QV.

4.2

A Curva QV

A curva QV é obtida com a resolução de uma sucessão de problemas de fluxos de potência. Varia-se a tensão na barra i em torno da tensão no caso base. Cada alteração da tensão consiste em um novo caso, com uma nova tensão e potência reativa. Anota-se, portanto, o valor da tensão e potência reativa gerada ou absorvida para todos os casos obtidos.

A barra i passa a ser modelada com um compensador síncrono fictício acoplado e do ponto de vista da modelagem computacional, a barra é representada por uma barra do tipo PV sem limite de potência reativa.

Na Figura 4.1 exibe-se a curva QV, onde é observado o ponto de operação no caso base e no caso de inflexão. O ponto de fronteira da curva está localizado no ponto de potência reativa mínima que divide a curva entre os lados direito e esquerdo. O lado direito é o usual de operação; V e Q variam no mesmo sentido.

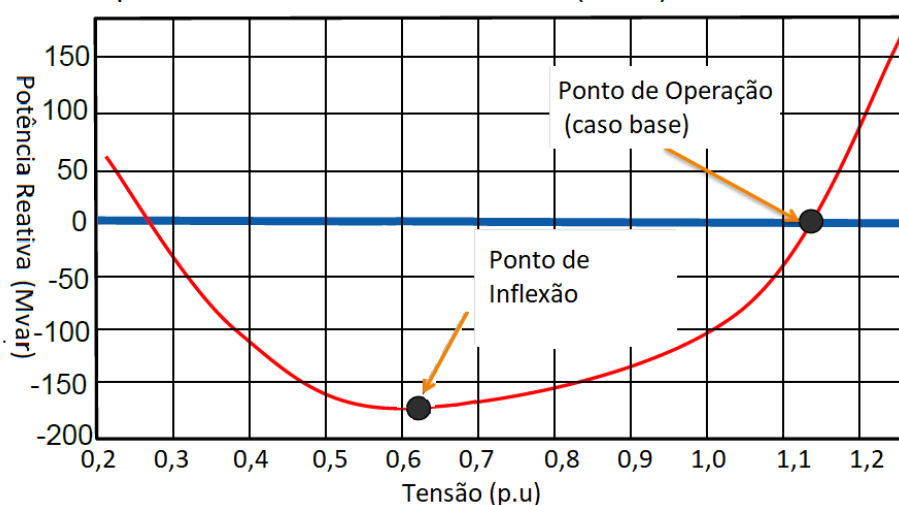


Figura 4.1: Curva QV[11]

A sequência do procedimento para obtenção da curva QV é:

1. Executar o algoritmo do fluxo de potência para o caso base;
2. Escolher uma barra i para calcular a curva QV;
3. Modelar a barra escolhida como tendo um gerador síncrono fictício (barra do tipo PV sem limite de potência reativa);
4. Variar a tensão da barra i com um pequeno passo em torno da tensão do caso base;
5. Executar o algoritmo do fluxo de potência para o novo caso;
6. Anotar a potência reativa Q obtida pelo fluxo de potência e;
7. Repetir os passos 4 a 6 até que seja possível traçar a curva QV. A amplitude de variação da tensão V fica em torno de 0,9 a 1,1 p.u, valores de tensão fora dessa faixa não são práticos [12].

A curva QV não foi desenvolvida, em princípio, para estudar o problema da estabilidade de tensão. Sua origem advém da necessidade de solucionar problemas de fluxo de carga de difícil convergência [13].

Sabendo-se em qual barra ocorrem os problemas de convergência do fluxo de potência, acopla-se um compensador síncrono fictício nessa barra e arbitra-se uma tensão V' . Após executar o fluxo de potência com a tensão V' pré-estabelecida e com o compensador síncrono fictício acoplado, obtém-se uma potência reativa (fictícia) Q' . Desse ponto em diante, o procedimento consiste em reduzir vagarosamente o valor de tensão e, conseqüentemente, a potência reativa gerada pelo compensador fictício também é reduzida.

Finalmente, a tensão na barra atinge valores que não demandam potência reativa do gerador fictício e, portanto, está resolvido o problema do fluxo de carga.

As curvas 1 e 2, apresentadas na Figura 4.2, representam o caso descrito nos dois parágrafos anteriores. A interseção com o eixo Q igual a zero corresponde ao ponto sem necessidade de geração do compensador fictício ($Q=0$).

Q_1 e Q_2 são as margens de potência reativa, representando a distância entre o ponto de potência reativa mínima e o ponto sem compensação de potência reativa ($Q=0$).

Se a curva QV não corta o eixo horizontal $Q=0$, então o problema de fluxo de carga não teria solução (curva 3 da Figura 4.2). Nesse caso, a presença do compensador fictício de potência reativa sem limites de geração e absorção não é suficiente para solucionar o problema de fluxo de carga de difícil solução.

Seria necessária a instalação de compensação de potência reativa real de um valor de, no mínimo, Q_3 .

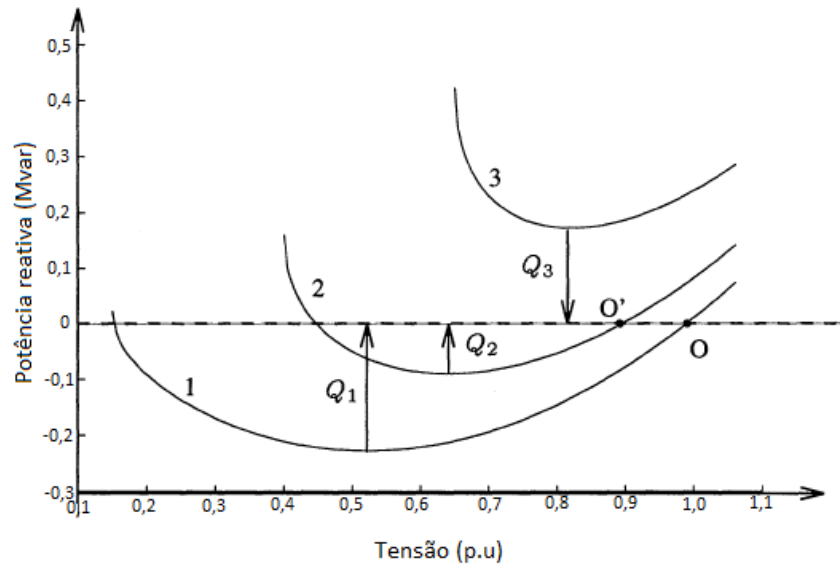


Figura 4.2: Curvas QV [13]

Por conseguinte, a aplicabilidade original da curva QV é solucionar problemas de fluxo de carga com difícil convergência. Posteriormente, a curva QV se mostrou interessante para avaliação da estabilidade de tensão.

Atualmente diversos programas podem ser utilizados para fornecimento da curva QV. O programa ANAREDE do CEPEL [14] foi utilizado para obtenção da curva QV nesse estudo.

A curva QV fornece informações que podem ser utilizadas para o estudo da estabilidade de tensão que serão apresentadas na Seção 4.3 .

4.3

Avaliação da Estabilidade de Tensão com a Curva QV

Tradicionalmente os equipamentos para controle de tensão nas barras do sistema (tap do transformador, reguladores automáticos de tensão) são construídos para operar satisfatoriamente na região em que o aumento de potência reativa Q é acompanhado por um aumento de tensão V [2]. Essa é considerada a região de operação usual do sistema.

A curva QV é uma ferramenta de estudo de sistemas de potência que permite identificar e avaliar quando a tensão V e potência reativa Q são diretamente ou inversamente proporcionais. Sendo que o lado direito da curva QV corresponde à região usual de operação, com tensão e potência reativa diretamente proporcionais. O lado esquerdo da curva corresponde à região não usual de operação, com tensão e potência reativa inversamente proporcionais.

Por conseguinte, identificar em qual região o sistema de potência opera é fundamental para ações de controle eficientes.

A tensão e a potência reativa injetada são as condições iniciais que caracterizam uma determinada curva QV, sendo definidas como potência reativa do caso base (Q_{cb}) e tensão do caso base (V_{cb}). A potência reativa no caso base também pode ser chamada de potência reativa injetada (Q_{inj}).

Outro ponto importante na análise da curva QV é o ponto de fronteira, caracterizado pela potência reativa mínima que ocorre antes do sistema passar a operar na região esquerda do gráfico, Figura 4.1. No ponto de fronteira da curva QV, define-se a potência reativa de inflexão (Q_{inf}) e a tensão de inflexão (V_{inf}).

A margem da curva QV (MQV) é definida como a diferença entre a potência reativa no ponto de fronteira e a potência reativa injetada (caso base) em (4.1).

$$MQV = (Q_{inf}) - (Q_{inj}) \quad (4.1)$$

A margem da curva QV avalia o quanto de potência reativa que precisa ser fornecido para atingir o limite de potência reativa em determinada barra, independente dos limites físicos do gerador. A margem da curva QV também fornece a distância em MW do ponto de máximo carregamento.

Portanto, quanto maior a margem da curva QV (MQV), maior a distância que a barra em análise encontra-se de atingir a região de operação não usual do sistema. O lado da curva QV é obtido avaliando-se a tensão no caso base e a tensão no ponto de fronteira. Caso V_{cb} seja maior que V_{inf} , o lado da curva QV encontra-se no lado direito. Já se V_{cb} for menor que V_{inf} , o lado da curva QV encontra-se do lado esquerdo.

O lado da curva QV é um indicativo importante no estudo de estabilidade de tensão com curva QV, pois permite identificar em qual região de operação encontra-se. Esse índice será utilizado nos estudos de casos para análise da curva QV.

4.4

Obtendo o Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$

Nessa seção será explicado como obter o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ realizando-se a redução da matriz Jacobiano duas vezes frente a algumas premissas adotadas.

Conforme descrito anteriormente em (2.30) e (2.31), as injeções de potência ativa e reativa do sistema de potência mantem uma relação com os ângulos e módulos de tensão na respectiva barra em estudo (4.2), através da matriz Jacobiano do sistema linearizado das equações de fluxo de potência.

Evidenciando as linhas e colunas correspondentes à barra i em análise obtém-se a expansão de (4.2) em (4.3).

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \Theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \overline{\Delta Q} \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] \begin{bmatrix} \overline{\Delta \Theta} \\ \overline{\Delta V} \\ \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Definem-se os elementos de (4.3):

- $\overline{\Delta P}$ é igual a ΔP excluindo o elemento ΔP_i ;
- $\overline{\Delta Q}$ é igual a ΔQ excluindo o elemento ΔQ_i ;
- $\overline{\Delta \Theta}$ é igual a $\Delta \Theta$ excluindo o elemento $\Delta \Theta_i$;
- $\overline{\Delta V}$ é igual a ΔV excluindo o elemento ΔV_i ;
- ΔP_i , ΔQ_i , $\Delta \Theta_i$ e ΔV_i são os elementos da barra i em análise.

A submatrix D em (4.3) relaciona as potências ativa e reativa injetadas em determinada barra com seu ângulo e módulo de tensão. Pretende-se avaliar as variações infinitesimais de ΔP_i e ΔQ_i e seus efeitos em $\Delta \Theta_i$ e ΔV_i . Essa relação determina a matrix D' (Seção 3.5.1).

As premissas para o cálculo da matrix D' consideram que a potências ativa e reativa fora da barra i são constantes e, portanto, $\overline{\Delta P}$ e $\overline{\Delta Q}$ são iguais a zero:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{c|c} A & B \\ \hline C & D \end{array} \right] \begin{bmatrix} \overline{\Delta \Theta} \\ \overline{\Delta V} \\ \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Para facilitar o entendimento da resolução de (4.4), as parcelas do lado direito da equação são substituídas por X e Y:

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta P} \\ \overline{\Delta Q} \end{bmatrix} = \mathbf{X} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \mathbf{Y}$$

e as parcelas do lado esquerdo são substituídas por Z e W:

$$\begin{bmatrix} \overline{\Delta \Theta} \\ \overline{\Delta V} \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \quad \text{e} \quad \begin{bmatrix} \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} = \mathbf{W}$$

Assim (4.4) fornece (4.5):

$$\begin{cases} \mathbf{0} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{W} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{W} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} -\mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{W} = \mathbf{Z} \quad (1) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Z} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{W} \quad (2) \end{cases} \quad (4.5)$$

Para resolver (4.5), substitui-se Z dado na equação (1) na equação (2) de (4.5):

$$\mathbf{Y} = -\mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{W} + \mathbf{D} \cdot \mathbf{W} \Rightarrow \left[-\mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D} \right] \cdot \mathbf{W}$$

Obtendo-se a matriz D' em (4.6):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \underbrace{\left[-\mathbf{C} \cdot \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{D} \right]}_{\mathbf{D}'} \begin{bmatrix} \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

A equação (4.6) tem D' como a matriz de derivadas parciais de Θ e V levando em conta todo o sistema:

$$\mathbf{D}' = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Portanto:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

O índice de estabilidade de tensão que pretende-se obter a relação entre ΔQ_i e ΔV_i em (4.8). Por conseguinte, é explicitando o elemento $\frac{\partial Q_i}{\partial V_i}$ da matriz D'. Para isso, o mesmo procedimento utilizado para obter a matriz D' será repetido em (4.8).

Adotando-se como premissa que $\Delta P_i = 0$:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \Theta_i \\ \Delta V_i \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Desenvolvendo-se (4.9) obtém-se (4.10):

$$\begin{cases} 0 = \frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} \Delta \Theta_i + \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \Delta V_i \\ \Delta Q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} \Delta \Theta_i + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \Delta V_i \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta Q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} \Delta \Theta_i + \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \Delta V_i \quad (1) \\ \Delta \Theta_i = \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \Delta V_i \left(\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} \right)^{-1} \quad (2) \end{cases} \quad (4.10)$$

Substituindo-se $\Delta \Theta_i$ em (1) de (4.10), obtém-se o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$:

$$\Delta Q_i = \left[\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} \left(\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} \right)^{-1} \right] \Delta V_i \Rightarrow \Delta Q_i = \left[\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} - \frac{\partial P_i}{\partial V_i} \frac{\partial Q_i}{\partial \Theta_i} \left(\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i} \right)^{-1} \right] \Delta V_i \quad (4.11)$$

Portanto, dividindo-se (4.11) por $\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i}$ obtém-se:

$$\Delta Q_i = \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right)'' \Delta V_i \Rightarrow \left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right)'' = \left[\frac{\Delta Q_i}{\Delta V_i} \right]$$

ou

$$\left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right)'' = \frac{\det(D')}{\frac{\partial P_i}{\partial \Theta_i}} \quad (4.12)$$

O índice $\left(\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} \right)''$ apresentado em (4.12) é implementado computacionalmente nesse trabalho.

Na Seção 4.5 será apresentado as vantagens desse índice e sua aplicabilidade na avaliação do problema de estabilidade de tensão.

4.5

Avaliação da Estabilidade de Tensão Utilizando o Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$ é a relação entre a potência reativa e a tensão em todos os barramentos do sistema [2, 10]. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$ positivo indica que um aumento de tensão levaria a um aumento de potência reativa em determinado barramento, assim como uma diminuição de tensão levaria a uma diminuição da potência reativa. Esse comportamento referente ao índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$ caracteriza que a rede opera na região normal [2].

Por outro lado, valores negativos do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$ são um indicativo de que o sistema opera na região anormal. Nessa situação aumentos de tensão seriam acompanhados pela diminuição da potência reativa [2].

4.6

Incompatibilidade na Avaliação da Estabilidade de Tensão

Essa seção tem como objetivo apresentar as diferenças e similaridades para obtenção do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V} \right)''$ e a curva QV como ferramentas para avaliação da estabilidade de tensão.

A principal diferença é que o cálculo do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ ocorre em determinado ponto de operação, enquanto a curva QV utiliza diversos pontos de operação.

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ como a própria nomenclatura indica é a variação infinitesimal de duas grandezas, Q e V. Pode-se dizer que esse índice é a derivada de Q em relação a V. Já a margem obtida da curva QV utiliza diversos pontos de operação, sendo a relação das variações finitas em ΔV e ΔQ . Portanto, a margem da curva QV representa uma variação de ΔV com ΔQ , onde ΔV e ΔQ são variações de grande magnitude.

Resumindo, enquanto $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ define variações infinitesimais (uma tangente), por outro lado, a curva QV expressa margens (ΔV e ΔQ) com a formação de um triângulo, Figura 4.1. Essa diferença matemática pode levar a uma avaliação de estabilidade de tensão com resultados diferentes.

Entretanto, a obtenção dos dois índices também apresenta similaridades. No cálculo do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ estuda-se na verdade uma variação infinitesimal entre Q e V, essa variação infinitesimal é absorvida pela barra swing no que diz respeito às variações das perdas ativas e as barras PV (com Q livre) absorvem as variações infinitesimais no Q e as variações das perdas reativas.

Já quando se faz a curva QV, varia-se V, resolve-se o fluxo de potência e calcula Q. Exatamente da mesma forma que no cálculo do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ quem absorve as variações das perdas ativas é a barra swing, e quem absorve a variação das perdas reativas são todas as barras do tipo PV, demonstrando-se similaridade nesse aspecto.

Como avaliado no decorrer dessa seção, a maneira de obter os dois índices de estabilidade de tensão é diferente na maneira de ser calculada. Portanto, é possível que para determinados casos de operação o resultado da avaliação de estabilidade de tensão deva ser diferente entre os índices.

4.7

Sumário do Capítulo

Nesse capítulo foram apresentados dois métodos para avaliação da estabilidade de tensão.

O método da curva QV realiza o fluxo da potência para calcular a margem da potência reativa e o lado da curva QV em determina barra do sistema. Enquanto o índice de sensibilidade $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ calcula a derivada de Q em relação a V em um único ponto de operação.

A avaliação do estado de operação do sistema segundo a estabilidade de tensão pode divergir quando comparados os resultados desses dois índices. Um

estudo de caso para avaliar e comparar possíveis divergências nos dois índices é apresentado no Capítulo 5 .

5

Casos de Estudo

5.1

Introdução

O objetivo deste capítulo é abordar possíveis inconsistências e incoerências na avaliação da estabilidade de tensão ao utilizar o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e a margem da curva QV em sistema de potência próximos de seu carregamento máximo, conforme abordado na Seção 4.6.

A margem e o lado da curva QV são obtidos através do programa ANAREDE, ferramenta computacional utilizada para análise de sistemas elétricos de potência em regime permanente desenvolvida pelo Cepel.

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ é calculado utilizando-se a matriz Jacobiana em determinado ponto de operação. Uma ferramenta computacional foi programada em Matlab para calcular o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$.

O procedimento adotado no caso estudado tem como referência o relatório produzido para o Cepel pela PUC-Rio [15]. Esse estudo consiste em aumentar o patamar de carga utilizando o Fluxo de Potência Continuado (FPC), obtendo-se vários pontos de operação e neles calculando-se os índices de interesse.

Nesse capítulo é desenvolvido um estudo comparativo com o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e a margem da curva QV na Seção 5.2. E na Seção 5.3 é apresentado um estudo avaliando-se a incongruência dos resultados da margem de potência reativa da curva QV.

5.2

Estudo Comparativo do Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e Margem da Curva QV

O estudo desenvolvido nessa Seção realizou-se com o sistema teste IEEE 14 barras [16], com o objetivo de avaliar as possíveis divergências nos índices utilizados. Aumenta-se gradualmente a carga do sistema teste, até atingir a região de máximo carregamento e, simultaneamente, em cada patamar de carga é calculado o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e a margem da curva QV.

O sistema IEEE 14 barras representa uma fração do sistema de potência dos EUA em fevereiro de 1962. Esse sistema consiste em um modelo bastante

testado no meio acadêmico e que frequentemente é usado por pesquisadores e engenheiros na implementação de novas ferramentas e conceitos na área de sistemas de potência.

Em resumo, o sistema possui 2 centrais de geração e 3 compensadores síncronos. Das 14 barras do sistema, 11 possuem carga. Na Figura 5.1 apresenta-se o sistema IEEE 14 barras, enquanto os seus dados podem ser encontrados no Apêndice A.

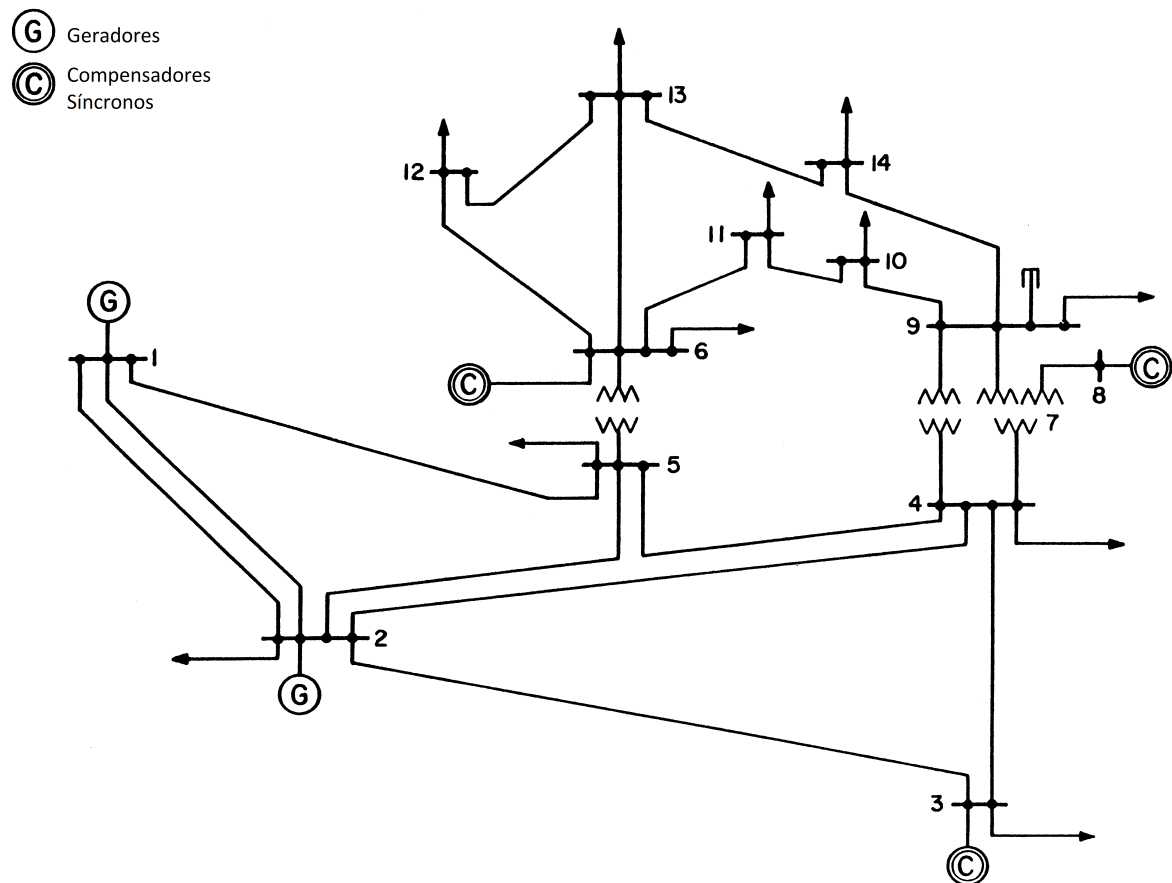


Figura 5.1: Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras [16]

5.2.1

Estudos com Crescimento de Carga e Geração em uma Única Barra

Para o sistema teste IEEE 14 barras é definido um ponto de operação inicial e, partindo desse ponto, são realizados aumentos sucessivos de carga na barra 2 com fator de potência constante.

A potência ativa necessária para acompanhar o aumento de carga é fornecida pela barra 1 (barra de referência do sistema).

A simulação do FPC é realizada no ANAREDE com os seguintes parâmetros ativados: NEWT, QLIM, VLIM, CREM, CTAP, RCVG, FILE, RBAR e BPSI. A opção de fluxo de potência continuado parametrizada é ativada. Para esse estudo utilizou-se a versão 11.2.4.

A simulação fornece [140] pontos de operação, cada qual com um diferente patamar de carga. Cada ponto de operação é obtido com um aumento de carga de 20 % com relação ao ponto anterior.

Os 140 casos ou pontos de operação possuem fluxo de carga convergido no ANAREDE. Porém, o algoritmo de fluxo de potência do Matlab não é capaz de convergir todos os casos para o cálculo do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$. Assim, alguns casos serão retirados da análise.

O comando DGER no ANAREDE é habilitado para configurar a barra 1 como responsável por fornecer potência ativa para o sistema, frente ao aumento de carga. A barra 1 é barra swing do sistema, responsável por absorver as perdas de potência ativa.

Assim, a circulação de potência ativa do sistema restringe-se principalmente entre as barras 1 e 2.

São apresentados tensão, potência reativa e ativa, índice de sensibilidade $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV para as barras 1, 2, 4 e 5 nas próximas seções.

A margem da curva QV denotada por (M_{QV}) nas Tabelas 5.1, 5.3, 5.4 e 5.5 tem valor positivo quando o ponto de operação se encontra no lado direito da curva QV e valor negativo, caso o ponto de operação esteja no lado esquerdo da curva. E conforme definido na Seção 4.3, a margem da curva QV informa a distância em MW do ponto de máximo carregamento.

5.2.1.1

Análise da Barra 1

A análise da barra 1 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos no patamar de carga na barra 2.

Na Tabela 5.1 apresentam-se tipo da barra, potência ativa e reativa gerada, tensão, ângulo, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.1.

A barra 1 é a barra de referência do sistema, portanto V e Θ são constantes nessa barra. Essa barra absorve as perdas de potência ativa e, junto com as barras PV, as perdas reativa do sistema.

O Caso 1 corresponde ao caso-base do sistema e possui potência ativa na barra 1 igual a 232,4 MW e tensão de 1,06 p.u. A M_{QV} não é calculada pelo programa ANAREDE no Caso 1, na barra 1.

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ apresenta descontinuidade quando ocorre perda de controle de tensão, ou seja, quando uma determinada barra atinge o seu limite de geração de potência reativa.

O fenômeno da perda de controle de tensão ocorre no Caso 3 para a barra 2, Caso 16 para a barra 3, Caso 27 para barra 6 e Caso 28 para a barra 8, como observado na Tabela 5.2.

Na Tabela 5.2 apresenta-se, para as barras 1 a 8, o tipo de barra, permitindo observar a perda de controle de tensão que ocorre nas barras do tipo PV.

A Tabela 5.2 segue a referência do programa ANAREDE [14], onde:

1. Barra do tipo 2 é barra $V\Theta$, de referência ou swing.
2. Barras do tipo 1 é barra PQ.
3. Barras do tipo 0 é barra PV.
4. Barras do tipo -1 é barra PQ que perderam o controle de tensão.

Tabela 5.1: Análise da Barra 1 - Crescimento de Carga na Barra 2

| Casos | Tipo | PG_1 (MW) | QG_1 (Mvar) | V_1 (p.u.) | Θ_1 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV}^1 | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|------------|--|
| 1 | 2,0 | 232,4 | -16,5 | 1,06 | 0,0 | 0,0 | NaN | 21,290 |
| 2 | 2,0 | 237,0 | -17,5 | 1,06 | -0,0 | 20,0 | 27,5 | 21,271 |
| 3 | 2,0 | 241,6 | -17,1 | 1,06 | -0,0 | 40,0 | 24,8 | 8,403 |
| 4 | 2,0 | 246,2 | -15,3 | 1,06 | -0,0 | 60,0 | 23,3 | 8,393 |
| 5 | 2,0 | 250,8 | -13,4 | 1,06 | -0,0 | 80,0 | 21,5 | 8,383 |
| 6 | 2,0 | 255,4 | -11,6 | 1,06 | -0,0 | 100,0 | 19,8 | 8,372 |
| 7 | 2,0 | 260,0 | -9,7 | 1,06 | -0,0 | 120,0 | 18,8 | 8,362 |
| 8 | 2,0 | 264,6 | -7,8 | 1,06 | -0,0 | 140,0 | 17,6 | 8,350 |
| 9 | 2,0 | 269,2 | -5,9 | 1,06 | -0,0 | 160,0 | 16,3 | 8,339 |
| 10 | 2,0 | 273,9 | -4,0 | 1,06 | -0,0 | 180,0 | 14,8 | 8,327 |
| 11 | 2,0 | 278,5 | -2,0 | 1,06 | -0,0 | 200,0 | 12,9 | 8,315 |
| 12 | 2,0 | 283,2 | -0,0 | 1,06 | -0,0 | 220,0 | 11,0 | 8,302 |
| 13 | 2,0 | 287,9 | 2,0 | 1,06 | -0,0 | 240,0 | 10,1 | 8,289 |
| 14 | 2,0 | 292,5 | 4,0 | 1,06 | -0,0 | 260,0 | 8,9 | 8,276 |
| 15 | 2,0 | 297,2 | 6,0 | 1,06 | -0,0 | 280,0 | 7,6 | 8,262 |
| 16 | 2,0 | 301,9 | 8,3 | 1,06 | -0,0 | 300,0 | 6,3 | 4,073 |
| 17 | 2,0 | 306,6 | 11,2 | 1,06 | -0,0 | 320,0 | 5,2 | 4,054 |
| 18 | 2,0 | 311,3 | 14,1 | 1,06 | -0,0 | 340,0 | 4,1 | 4,034 |
| 19 | 2,0 | 316,1 | 17,1 | 1,06 | -0,0 | 360,0 | 3,9 | 4,013 |
| 20 | 2,0 | 320,8 | 20,1 | 1,06 | -0,0 | 380,0 | 3,7 | 3,991 |
| 21 | 2,0 | 325,5 | 23,1 | 1,06 | -0,0 | 400,0 | 3,2 | 3,970 |

| Casos | Tipo | PG_1 (MW) | QG_1 (Mvar) | V_1 (p.u.) | Θ_1 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 22 | 2,0 | 330,3 | 26,1 | 1,06 | -0,0 | 420,0 | 2,4 | 3,947 |
| 23 | 2,0 | 335,1 | 29,2 | 1,06 | -0,0 | 440,0 | 1,3 | 3,924 |
| 24 | 2,0 | 339,8 | 32,3 | 1,06 | -0,0 | 460,0 | 0,1 | 3,900 |
| 25 | 2,0 | 344,6 | 35,4 | 1,06 | -0,0 | 480,0 | 0,0 | 3,875 |
| 26 | 2,0 | 349,4 | 38,6 | 1,06 | -0,0 | 500,0 | 0,0 | 3,850 |
| 27 | 2,0 | 354,2 | 42,3 | 1,06 | -0,0 | 520,0 | 0,0 | 0,712 |
| 28 | 2,0 | 359,1 | 46,4 | 1,06 | -0,0 | 540,0 | 0,0 | -2,945 |
| 29 | 2,0 | 363,9 | 50,8 | 1,06 | -0,0 | 560,0 | 0,0 | -2,995 |
| 30 | 2,0 | 368,8 | 55,3 | 1,06 | -0,0 | 580,0 | -0,0 | -3,047 |
| 31 | 2,0 | 373,7 | 59,8 | 1,06 | -0,0 | 600,0 | -1,2 | -3,100 |
| 32 | 2,0 | 378,6 | 64,3 | 1,06 | -0,0 | 620,0 | -2,5 | -3,155 |
| 33 | 2,0 | 383,5 | 68,9 | 1,06 | -0,0 | 640,0 | -3,2 | -3,213 |
| 34 | 2,0 | 388,4 | 73,6 | 1,06 | -0,0 | 660,0 | -3,5 | -3,271 |
| 35 | 2,0 | 393,3 | 78,3 | 1,06 | -0,0 | 680,0 | -3,5 | -3,333 |
| 36 | 2,0 | 398,3 | 83,0 | 1,06 | -0,0 | 700,0 | -3,9 | -3,394 |
| 37 | 2,0 | 403,3 | 87,8 | 1,06 | -0,0 | 720,0 | -5,2 | -3,458 |
| 38 | 2,0 | 408,2 | 92,7 | 1,06 | -0,0 | 740,0 | -6,6 | -3,526 |
| 39 | 2,0 | 413,3 | 97,6 | 1,06 | -0,0 | 760,0 | -7,5 | -3,593 |
| 40 | 2,0 | 418,3 | 102,5 | 1,06 | -0,0 | 780,0 | -7,7 | -3,665 |
| 41 | 2,0 | 423,3 | 107,6 | 1,06 | -0,0 | 800,0 | -7,9 | -3,738 |
| 42 | 2,0 | 428,4 | 112,7 | 1,06 | -0,0 | 820,0 | -8,7 | -3,812 |
| 43 | 2,0 | 433,4 | 117,8 | 1,06 | -0,0 | 840,0 | -10,3 | -3,891 |
| 44 | 2,0 | 438,5 | 123,0 | 1,06 | -0,0 | 860,0 | -11,8 | -3,971 |
| 45 | 2,0 | 443,6 | 128,3 | 1,06 | -0,0 | 880,0 | -12,6 | -4,055 |
| 46 | 2,0 | 448,8 | 133,6 | 1,06 | -0,0 | 900,0 | -12,9 | -4,140 |
| 47 | 2,0 | 453,9 | 139,0 | 1,06 | -0,0 | 920,0 | -13,2 | -4,227 |
| 48 | 2,0 | 459,1 | 144,5 | 1,06 | -0,0 | 940,0 | -14,8 | -4,320 |
| 49 | 2,0 | 464,3 | 150,0 | 1,06 | -0,0 | 960,0 | -16,5 | -4,414 |
| 50 | 2,0 | 469,5 | 155,6 | 1,06 | -0,0 | 980,0 | -18,3 | -4,514 |
| 51 | 2,0 | 474,7 | 161,3 | 1,06 | -0,0 | 1000,0 | -19,0 | -4,614 |
| 52 | 2,0 | 480,0 | 167,1 | 1,06 | -0,0 | 1020,0 | -19,5 | -4,717 |
| 53 | 2,0 | 485,3 | 172,9 | 1,06 | -0,0 | 1040,0 | -20,5 | -4,828 |
| 54 | 2,0 | 490,6 | 178,8 | 1,06 | -0,0 | 1060,0 | -22,4 | -4,939 |
| 55 | 2,0 | 495,9 | 184,8 | 1,06 | -0,0 | 1080,0 | -24,5 | -5,058 |
| 56 | 2,0 | 501,3 | 190,9 | 1,06 | -0,0 | 1100,0 | -26,3 | -5,177 |
| 57 | 2,0 | 506,7 | 197,1 | 1,06 | -0,0 | 1120,0 | -27,0 | -5,301 |
| 58 | 2,0 | 512,1 | 203,4 | 1,06 | -0,0 | 1140,0 | -27,6 | -5,433 |
| 59 | 2,0 | 517,5 | 209,7 | 1,06 | -0,0 | 1160,0 | -29,8 | -5,567 |
| 60 | 2,0 | 523,0 | 216,2 | 1,06 | -0,0 | 1180,0 | -32,1 | -5,709 |
| 61 | 2,0 | 528,5 | 222,7 | 1,06 | -0,0 | 1200,0 | -34,4 | -5,853 |
| 62 | 2,0 | 534,0 | 229,4 | 1,06 | -0,0 | 1220,0 | -36,0 | -6,003 |
| 63 | 2,0 | 539,6 | 236,2 | 1,06 | -0,0 | 1240,0 | -37,0 | -6,164 |
| 64 | 2,0 | 545,2 | 243,0 | 1,06 | -0,0 | 1260,0 | -38,8 | -6,326 |

| Casos | Tipo | PG_1 (MW) | QG_1 (Mvar) | V_1 (p.u.) | Θ_1 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 65 | 2,0 | 550,8 | 250,0 | 1,06 | -0,0 | 1280,0 | -41,5 | -6,501 |
| 66 | 2,0 | 556,4 | 257,1 | 1,06 | -0,0 | 1300,0 | -44,3 | -6,677 |
| 67 | 2,0 | 562,2 | 264,4 | 1,06 | -0,0 | 1320,0 | -47,0 | -6,862 |
| 68 | 2,0 | 567,9 | 271,8 | 1,06 | -0,0 | 1340,0 | -48,4 | -7,060 |
| 69 | 2,0 | 573,7 | 279,3 | 1,06 | -0,0 | 1360,0 | -50,1 | -7,261 |
| 70 | 2,0 | 579,5 | 286,9 | 1,06 | -0,0 | 1380,0 | -53,3 | -7,479 |
| 71 | 2,0 | 585,4 | 294,7 | 1,06 | -0,0 | 1400,0 | -56,6 | -7,700 |
| 72 | 2,0 | 591,3 | 302,7 | 1,06 | -0,0 | 1420,0 | -59,8 | -7,932 |
| 73 | 2,0 | 597,2 | 310,8 | 1,06 | -0,0 | 1440,0 | -62,5 | -8,183 |
| 74 | 2,0 | 603,3 | 319,1 | 1,06 | -0,0 | 1460,0 | -64,5 | -8,439 |
| 75 | 2,0 | 609,3 | 327,6 | 1,06 | -0,0 | 1480,0 | -68,2 | -8,717 |
| 76 | 2,0 | 615,5 | 336,2 | 1,06 | -0,0 | 1500,0 | -72,1 | -9,002 |
| 77 | 2,0 | 621,6 | 345,1 | 1,06 | -0,0 | 1520,0 | -76,1 | -9,303 |
| 78 | 2,0 | 627,9 | 354,2 | 1,06 | -0,0 | 1540,0 | -80,2 | -9,632 |
| 79 | 2,0 | 634,2 | 363,5 | 1,06 | -0,0 | 1560,0 | -82,9 | -9,970 |
| 80 | 2,0 | 640,6 | 373,0 | 1,06 | -0,0 | 1580,0 | -87,1 | -10,341 |
| 81 | 2,0 | 647,1 | 382,8 | 1,06 | -0,0 | 1600,0 | -92,1 | -10,724 |
| 82 | 2,0 | 653,6 | 392,9 | 1,06 | -0,0 | 1620,0 | -97,1 | -11,134 |
| 83 | 2,0 | 660,3 | 403,3 | 1,06 | -0,0 | 1640,0 | -102,3 | -11,585 |
| 84 | 2,0 | 667,0 | 414,0 | 1,06 | -0,0 | 1660,0 | -106,8 | -12,057 |
| 85 | 2,0 | 673,8 | 425,1 | 1,06 | -0,0 | 1680,0 | -112,0 | -12,581 |
| 86 | 2,0 | 680,8 | 436,6 | 1,06 | -0,0 | 1700,0 | -118,4 | -13,132 |
| 87 | 2,0 | 687,9 | 448,4 | 1,06 | -0,0 | 1720,0 | -125,0 | -13,731 |
| 88 | 2,0 | 695,1 | 460,8 | 1,06 | -0,0 | 1740,0 | -131,9 | -14,406 |
| 89 | 2,0 | 702,5 | 473,6 | 1,06 | -0,0 | 1760,0 | -138,8 | -15,126 |
| 90 | 2,0 | 710,0 | 487,1 | 1,06 | -0,0 | 1780,0 | -146,0 | -15,948 |
| 91 | 2,0 | 717,7 | 501,2 | 1,06 | -0,0 | 1800,0 | -154,8 | -16,838 |
| 92 | 2,0 | 725,7 | 516,1 | 1,06 | -0,0 | 1820,0 | -164,3 | -17,839 |
| 93 | 2,0 | 733,9 | 531,8 | 1,06 | -0,0 | 1840,0 | -174,4 | -19,015 |
| 94 | 2,0 | 742,4 | 548,6 | 1,06 | -0,0 | 1860,0 | -185,4 | -20,334 |
| 95 | 2,0 | 751,3 | 566,7 | 1,06 | -0,0 | 1880,0 | -196,9 | -21,933 |
| 96 | 2,0 | 760,7 | 586,4 | 1,06 | -0,0 | 1900,0 | -211,1 | -23,803 |
| 97 | 2,0 | 770,7 | 608,2 | 1,06 | -0,0 | 1920,0 | -227,3 | -26,125 |
| 98 | 2,0 | 781,5 | 633,0 | 1,06 | -0,0 | 1940,0 | -246,1 | -29,250 |
| 99 | 2,0 | 793,7 | 662,3 | 1,06 | -0,0 | 1960,0 | -269,5 | -33,541 |
| 100 | 2,0 | 808,4 | 700,2 | 1,06 | -0,0 | 1980,0 | -373,8 | -40,912 |
| 101 | 2,0 | 834,8 | 778,8 | 1,06 | -0,0 | 2000,0 | -378,4 | -67,093 |
| 102 | 2,0 | 836,2 | 783,5 | 1,06 | -0,0 | 2000,0 | 0,0 | -69,728 |
| 103 | 2,0 | 838,4 | 791,2 | 1,06 | -0,0 | 2001,0 | 0,0 | 44,069 |
| 104 | 2,0 | 840,6 | 798,8 | 1,06 | -0,0 | 2000,0 | 0,0 | -80,455 |
| 105 | 2,0 | 842,7 | 806,3 | 1,06 | -0,0 | 2000,0 | 0,0 | -84,133 |
| 106 | 2,0 | 844,7 | 813,8 | 1,06 | -0,0 | 1999,0 | 0,0 | -92,071 |
| 107 | 2,0 | 846,7 | 821,1 | 1,06 | -0,0 | 1998,0 | 0,0 | -98,439 |

| Casos | Tipo | PG_1 (MW) | QG_1 (Mvar) | V_1 (p.u.) | Θ_1 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 108 | 2,0 | 848,5 | 828,4 | 1,06 | -0,0 | 1997,0 | 0,0 | -106,327 |
| 109 | 2,0 | 850,3 | 835,6 | 1,06 | -0,0 | 1996,0 | 0,0 | -115,602 |
| 110 | 2,0 | 852,0 | 842,6 | 1,06 | -0,0 | 1994,0 | 0,0 | -126,617 |
| 111 | 2,0 | 853,6 | 849,6 | 1,06 | -0,0 | 1992,0 | 0,0 | -138,024 |
| 112 | 2,0 | 855,2 | 856,4 | 1,06 | -0,0 | 1990,0 | 0,0 | -154,438 |
| 113 | 2,0 | 856,6 | 863,2 | 1,06 | -0,0 | 1987,0 | 0,0 | -175,006 |
| 114 | 2,0 | 858,0 | 869,8 | 1,06 | -0,0 | 1985,0 | 0,0 | -199,235 |
| 115 | 2,0 | 859,3 | 876,3 | 1,06 | -0,0 | 1982,0 | 0,0 | -231,018 |
| 116 | 2,0 | 860,6 | 882,7 | 1,06 | -0,0 | 1979,0 | 0,0 | -271,474 |
| 117 | 2,0 | 861,7 | 889,0 | 1,06 | -0,0 | 1975,0 | 0,0 | -336,412 |
| 118 | 2,0 | 862,8 | 895,2 | 1,06 | -0,0 | 1972,0 | 0,0 | -434,130 |
| 119 | 2,0 | 863,8 | 901,3 | 1,06 | -0,0 | 1968,0 | 0,0 | -614,829 |
| 120 | 2,0 | 864,7 | 907,2 | 1,06 | -0,0 | 1964,0 | 0,0 | -1061,634 |
| 121 | 2,0 | 865,6 | 913,0 | 1,06 | -0,0 | 1960,0 | 0,0 | -3411,609 |
| 122 | 2,0 | 866,4 | 918,7 | 1,06 | -0,0 | 1956,0 | 0,0 | 3066,509 |
| 123 | 2,0 | 867,1 | 924,2 | 1,06 | -0,0 | 1951,0 | 0,0 | 995,112 |
| 124 | 2,0 | 867,7 | 929,6 | 1,06 | -0,0 | 1947,0 | 136,4 | 617,935 |
| 125 | 2,0 | 868,3 | 934,9 | 1,06 | -0,0 | 1942,0 | 118,4 | 437,469 |
| 126 | 2,0 | 868,8 | 940,0 | 1,06 | -0,0 | 1937,0 | 108,0 | 345,282 |
| 127 | 2,0 | 869,2 | 945,0 | 1,06 | -0,0 | 1932,0 | 100,4 | 283,616 |
| 128 | 2,0 | 869,5 | 949,8 | 1,06 | -0,0 | 1927,0 | 94,4 | 239,289 |
| 129 | 2,0 | 869,8 | 954,5 | 1,06 | -0,0 | 1922,0 | 89,4 | 207,681 |
| 130 | 2,0 | 870,0 | 959,1 | 1,06 | -0,0 | 1916,0 | 85,1 | 182,574 |
| 131 | 2,0 | 870,2 | 963,5 | 1,06 | -0,0 | 1911,0 | 81,3 | 163,128 |
| 132 | 2,0 | 870,2 | 967,7 | 1,06 | -0,0 | 1905,0 | 78,0 | 147,573 |
| 133 | 2,0 | 870,2 | 971,8 | 1,06 | -0,0 | 1899,0 | 75,0 | 134,162 |
| 134 | 2,0 | 870,2 | 975,8 | 1,06 | -0,0 | 1894,0 | 72,3 | 123,073 |
| 135 | 2,0 | 870,0 | 979,5 | 1,06 | -0,0 | 1887,0 | 187,5 | 113,221 |
| 136 | 2,0 | 869,8 | 983,2 | 1,06 | -0,0 | 1882,0 | 172,3 | 105,199 |
| 137 | 2,0 | 869,5 | 986,6 | 1,06 | -0,0 | 1876,0 | 161,6 | 97,850 |
| 138 | 2,0 | 869,2 | 989,9 | 1,06 | -0,0 | 1869,0 | 153,0 | 91,400 |
| 139 | 2,0 | 868,8 | 993,0 | 1,06 | -0,0 | 1864,0 | 145,9 | 85,949 |
| 140 | 2,0 | 868,3 | 995,9 | 1,06 | -0,0 | 1857,0 | 139,7 | 80,567 |

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ da barra 1 passa por zero entre os casos 27 e 28, pois nesse caso operativo deixa de existir barras do tipo PV, ou seja, todas as barras perderam a capacidade de controle de tensão, exceto a própria barra 1. É importante lembrar que, no cálculo do índice da barra 1, assume-se temporariamente que essa barra é PQ. Assim, não há nenhuma barra com potência reativa livre para variar e as variações infinitesimais em P1 e Q1 devem ser absorvidas por variações de geração ativa e de perdas ativas e

Tabela 5.2: Tipos das Barras - Crescimento de Carga na Barra 2

| Casos | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | Barra 4 | Barra 5 | Barra 6 | Barra 7 | Barra 8 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 11 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 12 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 14 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 15 | 2 | -1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 16 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 17 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 18 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 19 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 20 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 21 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 22 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 23 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 24 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 25 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 26 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 27 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | 1 |
| 28 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 29 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 30 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 31 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 32 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 33 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 34 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 35 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 36 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 37 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 38 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 39 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |

reativas. É de se esperar que o índice passe por zero e se torne negativo nos casos seguintes.

A partir do Caso 28 os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ passam a apresentar valores negativos, muito antes da carga máxima de carregamento.

Os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ continuam a indicar a operação do sistema no lado esquerdo da curva QV e no modo não usual de operação até o Caso 102 quando a carga máxima é atingida.

Entre os Casos 102 e 105, a carga é máxima. A margem M_{QV} vai a zero e o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ continua negativo pela razão já explicada. O Caso 103 apresenta anomalia no cálculo do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$. Provavelmente é um problema numérico já que a região é de alta não linearidade.

Na Figura 5.2 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga na barra 2. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga na barra 2 e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de controle de tensão nas barras do tipo PV.

A partir do Caso 106 a carga passa a diminuir e já não há interesse prático. Até o Caso 123 M_{QV} é nula e até o Caso 121 $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ é negativo. A partir daí não é possível explicar as mudanças de sinal e as variações de valores. Seria necessário estudar a lógica do algoritmo utilizado para o FPC, o que está fora do escopo desse trabalho.

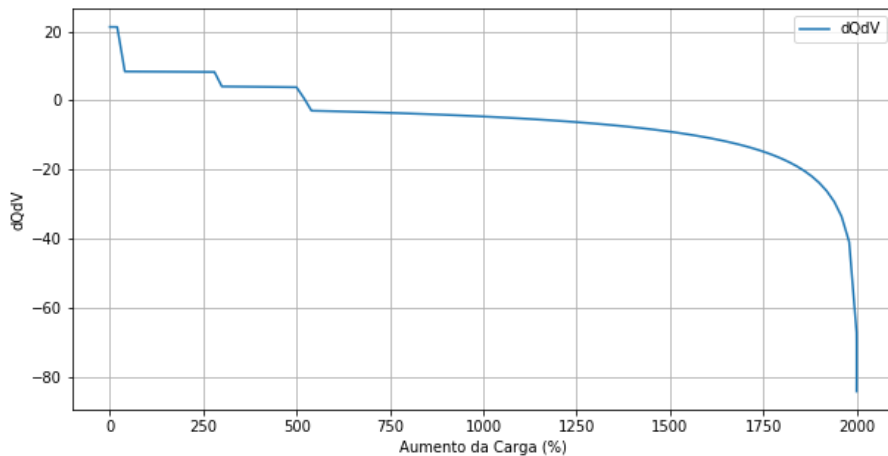


Figura 5.2: Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 1

5.2.1.2

Análise da Barra 2

A análise da barra 2 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos no patamar de carga na barra 2.

Na Tabela 5.3 apresentam-se potência reativa gerada, potência ativa e reativa de carga, tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.3.

A barra 2 é do tipo PV e, portanto, a potência ativa não muda. Essa barra tem tensão controlada, até atingir seu limite de geração de potência reativa no ponto de operação 3.

O Caso 1 correspondente ao caso-base do sistema e possui potência ativa de carga na barra 2 igual a 21,7 MW e tensão de 1,045 p.u.. Os Casos 98 ao 105 são os casos de máximo carregamento do sistema, o Caso 104 possui potência reativa de carga de 266,7 Mvar e tensão de 0,639 p.u.. A partir do Caso 105 os índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) tem valores negativos. Para a barra 2 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ não captura a descontinuidade quando ocorre perda de controle de tensão na própria barra 2. Mas essa descontinuidade é percebida nos Casos 16, 27 e 28, na perda de controle de tensão em outras barras.

Tabela 5.3: Análise da Barra 2 - Crescimento de Carga na Barra 2

| Casos | Tipo | QG_2 (Mvar) | PL_2 (MW) | QL_2 (Mvar) | V_2 (p.u.) | Θ_2 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 1 | 1,0 | 43,6 | 21,7 | 12,7 | 1,045 | -5,0 | 0,0 | 484,5 | 30,200 |
| 2 | 1,0 | 47,8 | 26,0 | 15,2 | 1,045 | -5,1 | 20,0 | 484,9 | 30,214 |
| 3 | -1,0 | 50,0 | 30,4 | 17,8 | 1,044 | -5,2 | 40,0 | 483,3 | 30,184 |
| 4 | -1,0 | 50,0 | 34,7 | 20,3 | 1,043 | -5,3 | 60,0 | 479,4 | 30,110 |
| 5 | -1,0 | 50,0 | 39,1 | 22,9 | 1,041 | -5,4 | 80,0 | 475,6 | 30,033 |
| 6 | -1,0 | 50,0 | 43,4 | 25,4 | 1,040 | -5,6 | 100,0 | 471,6 | 29,958 |
| 7 | -1,0 | 50,0 | 47,7 | 27,9 | 1,039 | -5,7 | 120,0 | 467,7 | 29,882 |
| 8 | -1,0 | 50,0 | 52,1 | 30,5 | 1,037 | -5,8 | 140,0 | 463,8 | 29,804 |
| 9 | -1,0 | 50,0 | 56,4 | 33,0 | 1,036 | -5,9 | 160,0 | 459,9 | 29,727 |
| 10 | -1,0 | 50,0 | 60,8 | 35,6 | 1,034 | -6,0 | 180,0 | 456,0 | 29,647 |
| 11 | -1,0 | 50,0 | 65,1 | 38,1 | 1,033 | -6,1 | 200,0 | 452,0 | 29,570 |
| 12 | -1,0 | 50,0 | 69,4 | 40,6 | 1,031 | -6,2 | 220,0 | 448,0 | 29,492 |
| 13 | -1,0 | 50,0 | 73,8 | 43,2 | 1,030 | -6,3 | 240,0 | 443,9 | 29,410 |
| 14 | -1,0 | 50,0 | 78,1 | 45,7 | 1,028 | -6,4 | 260,0 | 439,9 | 29,331 |
| 15 | -1,0 | 50,0 | 82,5 | 48,3 | 1,027 | -6,5 | 280,0 | 435,9 | 29,249 |
| 16 | -1,0 | 50,0 | 86,8 | 50,8 | 1,025 | -6,7 | 300,0 | 431,8 | 23,449 |

| Casos | Tipo | QG_2 (Mvar) | PL_2 (MW) | QL_2 (Mvar) | V_2 (p.u.) | Θ_2 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 17 | -1,0 | 50,0 | 91,1 | 53,3 | 1,023 | -6,8 | 320,0 | 427,7 | 23,368 |
| 18 | -1,0 | 50,0 | 95,5 | 55,9 | 1,021 | -6,9 | 340,0 | 423,6 | 23,284 |
| 19 | -1,0 | 50,0 | 99,8 | 58,4 | 1,020 | -7,0 | 360,0 | 419,4 | 23,201 |
| 20 | -1,0 | 50,0 | 104,2 | 61,0 | 1,018 | -7,1 | 380,0 | 415,3 | 23,115 |
| 21 | -1,0 | 50,0 | 108,5 | 63,5 | 1,016 | -7,2 | 400,0 | 411,1 | 23,032 |
| 22 | -1,0 | 50,0 | 112,8 | 66,0 | 1,014 | -7,3 | 420,0 | 406,9 | 22,947 |
| 23 | -1,0 | 50,0 | 117,2 | 68,6 | 1,012 | -7,4 | 440,0 | 402,7 | 22,859 |
| 24 | -1,0 | 50,0 | 121,5 | 71,1 | 1,010 | -7,5 | 460,0 | 398,4 | 22,774 |
| 25 | -1,0 | 50,0 | 125,9 | 73,7 | 1,008 | -7,7 | 480,0 | 394,2 | 22,684 |
| 26 | -1,0 | 50,0 | 130,2 | 76,2 | 1,006 | -7,8 | 500,0 | 389,9 | 22,597 |
| 27 | -1,0 | 50,0 | 134,5 | 78,7 | 1,004 | -7,9 | 520,0 | 385,6 | 20,641 |
| 28 | -1,0 | 50,0 | 138,9 | 81,3 | 1,001 | -8,0 | 540,0 | 381,3 | 18,552 |
| 29 | -1,0 | 50,0 | 143,2 | 83,8 | 0,999 | -8,1 | 560,0 | 376,9 | 18,457 |
| 30 | -1,0 | 50,0 | 147,6 | 86,4 | 0,996 | -8,2 | 580,0 | 372,6 | 18,357 |
| 31 | -1,0 | 50,0 | 151,9 | 88,9 | 0,994 | -8,3 | 600,0 | 368,2 | 18,259 |
| 32 | -1,0 | 50,0 | 156,2 | 91,4 | 0,991 | -8,4 | 620,0 | 363,8 | 18,160 |
| 33 | -1,0 | 50,0 | 160,6 | 94,0 | 0,989 | -8,6 | 640,0 | 359,3 | 18,057 |
| 34 | -1,0 | 50,0 | 164,9 | 96,5 | 0,986 | -8,7 | 660,0 | 354,9 | 17,956 |
| 35 | -1,0 | 50,0 | 169,3 | 99,1 | 0,984 | -8,8 | 680,0 | 350,5 | 17,851 |
| 36 | -1,0 | 50,0 | 173,6 | 101,6 | 0,981 | -8,9 | 700,0 | 345,9 | 17,748 |
| 37 | -1,0 | 50,0 | 177,9 | 104,1 | 0,979 | -9,0 | 720,0 | 341,4 | 17,644 |
| 38 | -1,0 | 50,0 | 182,3 | 106,7 | 0,976 | -9,2 | 740,0 | 336,9 | 17,535 |
| 39 | -1,0 | 50,0 | 186,6 | 109,2 | 0,973 | -9,3 | 760,0 | 332,3 | 17,429 |
| 40 | -1,0 | 50,0 | 191,0 | 111,8 | 0,971 | -9,4 | 780,0 | 327,7 | 17,317 |
| 41 | -1,0 | 50,0 | 195,3 | 114,3 | 0,968 | -9,5 | 800,0 | 323,1 | 17,208 |
| 42 | -1,0 | 50,0 | 199,6 | 116,8 | 0,965 | -9,6 | 820,0 | 318,5 | 17,098 |
| 43 | -1,0 | 50,0 | 204,0 | 119,4 | 0,962 | -9,8 | 840,0 | 313,8 | 16,983 |
| 44 | -1,0 | 50,0 | 208,3 | 121,9 | 0,960 | -9,9 | 860,0 | 309,2 | 16,870 |
| 45 | -1,0 | 50,0 | 212,7 | 124,5 | 0,957 | -10,0 | 880,0 | 304,5 | 16,752 |
| 46 | -1,0 | 50,0 | 217,0 | 127,0 | 0,954 | -10,1 | 900,0 | 299,8 | 16,636 |
| 47 | -1,0 | 50,0 | 221,3 | 129,5 | 0,951 | -10,3 | 920,0 | 295,0 | 16,518 |
| 48 | -1,0 | 50,0 | 225,7 | 132,1 | 0,948 | -10,4 | 940,0 | 290,3 | 16,396 |
| 49 | -1,0 | 50,0 | 230,0 | 134,6 | 0,945 | -10,5 | 960,0 | 285,5 | 16,275 |
| 50 | -1,0 | 50,0 | 234,4 | 137,2 | 0,942 | -10,7 | 980,0 | 280,6 | 16,149 |
| 51 | -1,0 | 50,0 | 238,7 | 139,7 | 0,939 | -10,8 | 1000,0 | 275,8 | 16,025 |
| 52 | -1,0 | 50,0 | 243,0 | 142,2 | 0,936 | -10,9 | 1020,0 | 271,0 | 15,900 |
| 53 | -1,0 | 50,0 | 247,4 | 144,8 | 0,933 | -11,1 | 1040,0 | 266,0 | 15,769 |
| 54 | -1,0 | 50,0 | 251,7 | 147,3 | 0,930 | -11,2 | 1060,0 | 261,1 | 15,639 |
| 55 | -1,0 | 50,0 | 256,1 | 149,9 | 0,927 | -11,3 | 1080,0 | 256,2 | 15,504 |
| 56 | -1,0 | 50,0 | 260,4 | 152,4 | 0,924 | -11,5 | 1100,0 | 251,2 | 15,371 |
| 57 | -1,0 | 50,0 | 264,7 | 154,9 | 0,921 | -11,6 | 1120,0 | 246,3 | 15,236 |
| 58 | -1,0 | 50,0 | 269,1 | 157,5 | 0,918 | -11,8 | 1140,0 | 241,3 | 15,095 |
| 59 | -1,0 | 50,0 | 273,4 | 160,0 | 0,914 | -11,9 | 1160,0 | 236,2 | 14,956 |

| Casos | Tipo | QG_2 (Mvar) | PL_2 (MW) | QL_2 (Mvar) | V_2 (p.u.) | Θ_2 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|------------------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 60 | -1,0 | 50,0 | 277,8 | 162,6 | 0,911 | -12,0 | 1180,0 | 231,2 | 14,810 |
| 61 | -1,0 | 50,0 | 282,1 | 165,1 | 0,908 | -12,2 | 1200,0 | 226,1 | 14,666 |
| 62 | -1,0 | 50,0 | 286,4 | 167,6 | 0,904 | -12,3 | 1220,0 | 220,9 | 14,520 |
| 63 | -1,0 | 50,0 | 290,8 | 170,2 | 0,901 | -12,5 | 1240,0 | 215,8 | 14,366 |
| 64 | -1,0 | 50,0 | 295,1 | 172,7 | 0,897 | -12,6 | 1260,0 | 210,6 | 14,215 |
| 65 | -1,0 | 50,0 | 299,5 | 175,3 | 0,894 | -12,8 | 1280,0 | 205,5 | 14,056 |
| 66 | -1,0 | 50,0 | 303,8 | 177,8 | 0,890 | -13,0 | 1300,0 | 200,3 | 13,899 |
| 67 | -1,0 | 50,0 | 308,1 | 180,3 | 0,887 | -13,1 | 1320,0 | 195,0 | 13,739 |
| 68 | -1,0 | 50,0 | 312,5 | 182,9 | 0,883 | -13,3 | 1340,0 | 189,8 | 13,570 |
| 69 | -1,0 | 50,0 | 316,8 | 185,4 | 0,879 | -13,4 | 1360,0 | 184,4 | 13,404 |
| 70 | -1,0 | 50,0 | 321,2 | 188,0 | 0,875 | -13,6 | 1380,0 | 179,1 | 13,228 |
| 71 | -1,0 | 50,0 | 325,5 | 190,5 | 0,872 | -13,8 | 1400,0 | 173,8 | 13,055 |
| 72 | -1,0 | 50,0 | 329,8 | 193,0 | 0,868 | -13,9 | 1420,0 | 168,4 | 12,878 |
| 73 | -1,0 | 50,0 | 334,2 | 195,6 | 0,864 | -14,1 | 1440,0 | 163,0 | 12,690 |
| 74 | -1,0 | 50,0 | 338,5 | 198,1 | 0,860 | -14,3 | 1460,0 | 157,5 | 12,505 |
| 75 | -1,0 | 50,0 | 342,9 | 200,7 | 0,855 | -14,5 | 1480,0 | 152,2 | 12,309 |
| 76 | -1,0 | 50,0 | 347,2 | 203,2 | 0,851 | -14,7 | 1500,0 | 146,6 | 12,114 |
| 77 | -1,0 | 50,0 | 351,5 | 205,7 | 0,847 | -14,8 | 1520,0 | 141,2 | 11,914 |
| 78 | -1,0 | 50,0 | 355,9 | 208,3 | 0,842 | -15,0 | 1540,0 | 135,5 | 11,702 |
| 79 | -1,0 | 50,0 | 360,2 | 210,8 | 0,838 | -15,2 | 1560,0 | 130,1 | 11,491 |
| 80 | -1,0 | 50,0 | 364,6 | 213,4 | 0,833 | -15,4 | 1580,0 | 124,4 | 11,267 |
| 81 | -1,0 | 50,0 | 368,9 | 215,9 | 0,829 | -15,6 | 1600,0 | 118,8 | 11,043 |
| 82 | -1,0 | 50,0 | 373,2 | 218,4 | 0,824 | -15,8 | 1620,0 | 113,1 | 10,812 |
| 83 | -1,0 | 50,0 | 377,6 | 221,0 | 0,819 | -16,0 | 1640,0 | 107,5 | 10,566 |
| 84 | -1,0 | 50,0 | 381,9 | 223,5 | 0,814 | -16,3 | 1660,0 | 101,8 | 10,318 |
| 85 | -1,0 | 50,0 | 386,3 | 226,1 | 0,808 | -16,5 | 1680,0 | 96,0 | 10,054 |
| 86 | -1,0 | 50,0 | 390,6 | 228,6 | 0,803 | -16,7 | 1700,0 | 90,3 | 9,787 |
| 87 | -1,0 | 50,0 | 394,9 | 231,1 | 0,797 | -16,9 | 1720,0 | 84,4 | 9,509 |
| 88 | -1,0 | 50,0 | 399,3 | 233,7 | 0,792 | -17,2 | 1740,0 | 78,7 | 9,209 |
| 89 | -1,0 | 50,0 | 403,6 | 236,2 | 0,785 | -17,4 | 1760,0 | 72,8 | 8,904 |
| 90 | -1,0 | 50,0 | 408,0 | 238,8 | 0,779 | -17,7 | 1780,0 | 66,8 | 8,574 |
| 91 | -1,0 | 50,0 | 412,3 | 241,3 | 0,773 | -18,0 | 1800,0 | 61,0 | 8,234 |
| 92 | -1,0 | 50,0 | 416,6 | 243,8 | 0,766 | -18,3 | 1820,0 | 55,1 | 7,874 |
| 93 | -1,0 | 50,0 | 421,0 | 246,4 | 0,758 | -18,6 | 1840,0 | 49,1 | 7,477 |
| 94 | -1,0 | 50,0 | 425,3 | 248,9 | 0,751 | -18,9 | 1860,0 | 43,0 | 7,061 |
| 95 | -1,0 | 50,0 | 429,7 | 251,5 | 0,742 | -19,2 | 1880,0 | 36,9 | 6,594 |
| 96 | -1,0 | 50,0 | 434,0 | 254,0 | 0,733 | -19,6 | 1900,0 | 30,9 | 6,094 |
| 97 | -1,0 | 50,0 | 438,3 | 256,5 | 0,723 | -20,0 | 1920,0 | 24,8 | 5,531 |
| 98 | -1,0 | 50,0 | 442,7 | 259,1 | 0,712 | -20,4 | 1940,0 | 18,7 | 4,857 |
| 99 | -1,0 | 50,0 | 447,0 | 261,6 | 0,699 | -21,0 | 1960,0 | 12,6 | 4,061 |
| 100 | -1,0 | 50,0 | 451,4 | 264,2 | 0,682 | -21,6 | 1980,0 | 6,4 | 2,951 |
| 101 | -1,0 | 50,0 | 455,7 | 266,7 | 0,647 | -22,9 | 2000,0 | 0,1 | 0,477 |
| 102 | -1,0 | 50,0 | 455,8 | 266,7 | 0,645 | -23,0 | 2000,0 | 0,0 | 0,305 |

| Casos | Tipo | QG ₂ (Mvar) | PL ₂ (MW) | QL ₂ (Mvar) | V ₂ (p.u.) | Θ ₂ (°) | Δ Carga (%) | M _{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|--|
| 103 | -1,0 | 50,0 | 455,8 | 266,8 | 0,642 | -23,1 | 2001,0 | 0,0 | -29,279 |
| 104 | -1,0 | 50,0 | 455,8 | 266,7 | 0,639 | -23,3 | 2000,0 | 0,0 | -0,310 |
| 105 | -1,0 | 50,0 | 455,7 | 266,7 | 0,635 | -23,4 | 2000,0 | -0,1 | -0,494 |
| 106 | -1,0 | 50,0 | 455,5 | 266,6 | 0,632 | -23,5 | 1999,0 | -0,4 | -0,851 |
| 107 | -1,0 | 50,0 | 455,3 | 266,5 | 0,629 | -23,6 | 1998,0 | -0,6 | -1,105 |
| 108 | -1,0 | 50,0 | 455,1 | 266,3 | 0,626 | -23,7 | 1997,0 | -1,0 | -1,386 |
| 109 | -1,0 | 50,0 | 454,8 | 266,1 | 0,623 | -23,8 | 1996,0 | -1,5 | -1,677 |
| 110 | -1,0 | 50,0 | 454,4 | 265,9 | 0,620 | -23,9 | 1994,0 | -2,0 | -1,978 |
| 111 | -1,0 | 50,0 | 454,0 | 265,7 | 0,617 | -24,0 | 1992,0 | -2,6 | -2,247 |
| 112 | -1,0 | 50,0 | 453,5 | 265,4 | 0,614 | -24,1 | 1990,0 | -3,3 | -2,577 |
| 113 | -1,0 | 50,0 | 452,9 | 265,1 | 0,611 | -24,2 | 1987,0 | -4,1 | -2,915 |
| 114 | -1,0 | 50,0 | 452,4 | 264,7 | 0,608 | -24,3 | 1985,0 | -4,9 | -3,237 |
| 115 | -1,0 | 50,0 | 451,7 | 264,4 | 0,605 | -24,4 | 1982,0 | -5,8 | -3,567 |
| 116 | -1,0 | 50,0 | 451,1 | 264,0 | 0,603 | -24,5 | 1979,0 | -6,8 | -3,889 |
| 117 | -1,0 | 50,0 | 450,3 | 263,6 | 0,600 | -24,6 | 1975,0 | -7,8 | -4,257 |
| 118 | -1,0 | 50,0 | 449,6 | 263,1 | 0,597 | -24,6 | 1972,0 | -8,9 | -4,620 |
| 119 | -1,0 | 50,0 | 448,8 | 262,6 | 0,595 | -24,7 | 1968,0 | -10,0 | -5,002 |
| 120 | -1,0 | 50,0 | 447,9 | 262,1 | 0,592 | -24,8 | 1964,0 | -11,3 | -5,405 |
| 121 | -1,0 | 50,0 | 447,0 | 261,6 | 0,590 | -24,8 | 1960,0 | -12,6 | -5,806 |
| 122 | -1,0 | 50,0 | 446,1 | 261,1 | 0,588 | -24,9 | 1956,0 | -13,8 | -6,205 |
| 123 | -1,0 | 50,0 | 445,1 | 260,5 | 0,585 | -25,0 | 1951,0 | -15,2 | -6,665 |
| 124 | -1,0 | 50,0 | 444,2 | 259,9 | 0,583 | -25,0 | 1947,0 | -16,6 | -7,103 |
| 125 | -1,0 | 50,0 | 443,1 | 259,3 | 0,581 | -25,1 | 1942,0 | -18,1 | -7,604 |
| 126 | -1,0 | 50,0 | 442,1 | 258,7 | 0,579 | -25,1 | 1937,0 | -19,6 | -8,087 |
| 127 | -1,0 | 50,0 | 441,0 | 258,1 | 0,577 | -25,2 | 1932,0 | -21,1 | -8,613 |
| 128 | -1,0 | 50,0 | 439,9 | 257,4 | 0,575 | -25,2 | 1927,0 | -22,7 | -9,194 |
| 129 | -1,0 | 50,0 | 438,7 | 256,8 | 0,573 | -25,3 | 1922,0 | -24,3 | -9,793 |
| 130 | -1,0 | 50,0 | 437,5 | 256,1 | 0,571 | -25,3 | 1916,0 | -26,0 | -10,461 |
| 131 | -1,0 | 50,0 | 436,3 | 255,4 | 0,569 | -25,3 | 1911,0 | -27,7 | -11,167 |
| 132 | -1,0 | 50,0 | 435,1 | 254,7 | 0,568 | -25,3 | 1905,0 | -29,4 | -11,919 |
| 133 | -1,0 | 50,0 | 433,9 | 253,9 | 0,566 | -25,4 | 1899,0 | -31,1 | -12,773 |
| 134 | -1,0 | 50,0 | 432,6 | 253,2 | 0,565 | -25,4 | 1894,0 | -32,9 | -13,691 |
| 135 | -1,0 | 50,0 | 431,3 | 252,4 | 0,563 | -25,4 | 1887,0 | -34,6 | -14,751 |
| 136 | -1,0 | 50,0 | 430,0 | 251,7 | 0,562 | -25,4 | 1882,0 | -36,4 | -15,860 |
| 137 | -1,0 | 50,0 | 428,7 | 250,9 | 0,561 | -25,4 | 1876,0 | -38,3 | -17,166 |
| 138 | -1,0 | 50,0 | 427,4 | 250,1 | 0,559 | -25,4 | 1869,0 | -40,2 | -18,642 |
| 139 | -1,0 | 50,0 | 426,1 | 249,4 | 0,558 | -25,4 | 1864,0 | -42,1 | -20,238 |
| 140 | -1,0 | 50,0 | 424,7 | 248,6 | 0,557 | -25,4 | 1857,0 | -43,9 | -22,281 |

Na Figura 5.3 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga na barra 2. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga na barra 2 e as

descontinuidades que ocorrem quando da perda de controle de tensão nas barras do tipo PV.

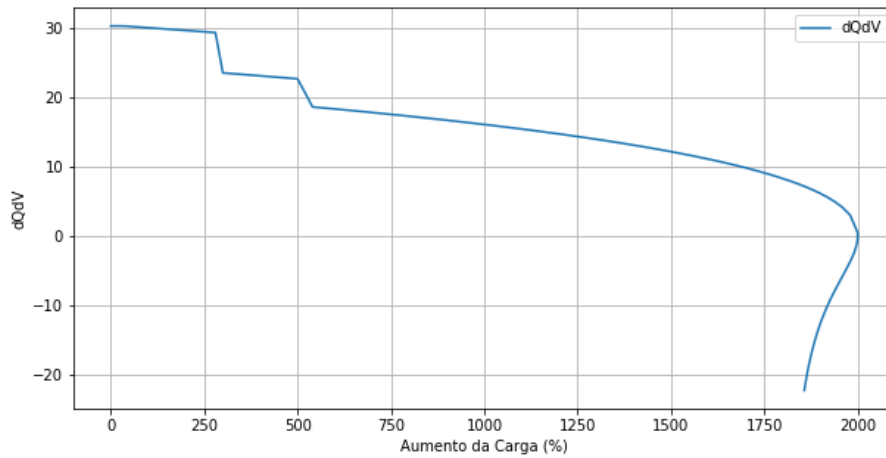


Figura 5.3: Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ na Barra 2

5.2.1.3

Análise da Barra 4

A análise da barra 4 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos no patamar de carga na barra 2.

Na Tabela 5.4 apresentam-se tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.4

A barra 4 é do tipo PQ e, portanto, a carga é constante com $PL = 47,8$ MW e $QL = -3,9$ Mvar. Essa barra não fornece geração para o sistema. O Caso 1 correspondente ao caso-base do sistema e possui potência ativa de carga na barra 2 igual a 21,7 MW e tensão de 1,018 p.u. na barra 4. Os Casos 98 ao 105 são os casos de máximo carregamento do sistema, o Caso 104 possui potência reativa de carga de 266,7 Mvar na barra 2 e tensão de 0,724 p.u. na barra 4. A partir do Caso 105, o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV (M_{QV}) indicam instabilidade do sistema com valores negativos.

Assim como para a barra 1, na barra 4 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ captura uma descontinuidade quando ocorre perda de controle de tensão nos Casos 3, 16, 27, 28.

Tabela 5.4: Análise da Barra 4 - Crescimento de Carga na Barra 2

| Casos | Tipo | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 1 | 0,0 | 1,018 | -10,3 | 0,0 | 238,0 | 24,836 |
| 2 | 0,0 | 1,018 | -10,4 | 20,0 | 236,7 | 24,835 |
| 3 | 0,0 | 1,017 | -10,5 | 40,0 | 235,4 | 22,091 |
| 4 | 0,0 | 1,017 | -10,6 | 60,0 | 234,1 | 22,075 |
| 5 | 0,0 | 1,016 | -10,7 | 80,0 | 232,8 | 22,059 |
| 6 | 0,0 | 1,016 | -10,8 | 100,0 | 231,5 | 22,043 |
| 7 | 0,0 | 1,015 | -10,9 | 120,0 | 230,2 | 22,027 |
| 8 | 0,0 | 1,015 | -11,0 | 140,0 | 228,8 | 22,010 |
| 9 | 0,0 | 1,014 | -11,1 | 160,0 | 227,5 | 21,994 |
| 10 | 0,0 | 1,013 | -11,3 | 180,0 | 226,1 | 21,976 |
| 11 | 0,0 | 1,013 | -11,4 | 200,0 | 224,8 | 21,960 |
| 12 | 0,0 | 1,012 | -11,5 | 220,0 | 223,4 | 21,943 |
| 13 | 0,0 | 1,012 | -11,6 | 240,0 | 222,0 | 21,925 |
| 14 | 0,0 | 1,011 | -11,7 | 260,0 | 220,6 | 21,908 |
| 15 | 0,0 | 1,010 | -11,8 | 280,0 | 219,2 | 21,891 |
| 16 | 0,0 | 1,010 | -11,9 | 300,0 | 217,8 | 16,520 |
| 17 | 0,0 | 1,009 | -12,0 | 320,0 | 216,4 | 16,495 |
| 18 | 0,0 | 1,007 | -12,1 | 340,0 | 214,9 | 16,468 |
| 19 | 0,0 | 1,006 | -12,2 | 360,0 | 213,5 | 16,442 |
| 20 | 0,0 | 1,005 | -12,3 | 380,0 | 212,0 | 16,415 |
| 21 | 0,0 | 1,004 | -12,5 | 400,0 | 210,6 | 16,388 |
| 22 | 0,0 | 1,003 | -12,6 | 420,0 | 209,1 | 16,361 |
| 23 | 0,0 | 1,002 | -12,7 | 440,0 | 207,6 | 16,334 |
| 24 | 0,0 | 1,001 | -12,8 | 460,0 | 206,1 | 16,306 |
| 25 | 0,0 | 0,999 | -12,9 | 480,0 | 204,6 | 16,278 |
| 26 | 0,0 | 0,998 | -13,0 | 500,0 | 203,1 | 16,250 |
| 27 | 0,0 | 0,997 | -13,1 | 520,0 | 201,5 | 12,782 |
| 28 | 0,0 | 0,995 | -13,3 | 540,0 | 199,9 | 9,531 |
| 29 | 0,0 | 0,993 | -13,4 | 560,0 | 198,4 | 9,496 |
| 30 | 0,0 | 0,991 | -13,5 | 580,0 | 196,8 | 9,460 |
| 31 | 0,0 | 0,988 | -13,6 | 600,0 | 195,2 | 9,425 |
| 32 | 0,0 | 0,986 | -13,7 | 620,0 | 193,6 | 9,389 |
| 33 | 0,0 | 0,984 | -13,8 | 640,0 | 192,0 | 9,351 |
| 34 | 0,0 | 0,982 | -14,0 | 660,0 | 190,3 | 9,314 |
| 35 | 0,0 | 0,979 | -14,1 | 680,0 | 188,7 | 9,275 |
| 36 | 0,0 | 0,977 | -14,2 | 700,0 | 187,0 | 9,237 |
| 37 | 0,0 | 0,975 | -14,3 | 720,0 | 185,3 | 9,199 |
| 38 | 0,0 | 0,973 | -14,4 | 740,0 | 183,6 | 9,159 |
| 39 | 0,0 | 0,970 | -14,6 | 760,0 | 181,9 | 9,119 |
| 40 | 0,0 | 0,968 | -14,7 | 780,0 | 180,1 | 9,078 |
| 41 | 0,0 | 0,965 | -14,8 | 800,0 | 178,4 | 9,037 |

| Casos | Tipo | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 42 | 0,0 | 0,963 | -14,9 | 820,0 | 176,6 | 8,996 |
| 43 | 0,0 | 0,961 | -15,1 | 840,0 | 174,8 | 8,953 |
| 44 | 0,0 | 0,958 | -15,2 | 860,0 | 173,0 | 8,911 |
| 45 | 0,0 | 0,956 | -15,3 | 880,0 | 171,2 | 8,866 |
| 46 | 0,0 | 0,953 | -15,5 | 900,0 | 169,3 | 8,823 |
| 47 | 0,0 | 0,951 | -15,6 | 920,0 | 167,4 | 8,779 |
| 48 | 0,0 | 0,948 | -15,7 | 940,0 | 165,5 | 8,732 |
| 49 | 0,0 | 0,945 | -15,9 | 960,0 | 163,6 | 8,686 |
| 50 | 0,0 | 0,943 | -16,0 | 980,0 | 161,7 | 8,638 |
| 51 | 0,0 | 0,940 | -16,1 | 1000,0 | 159,7 | 8,591 |
| 52 | 0,0 | 0,937 | -16,3 | 1020,0 | 157,7 | 8,543 |
| 53 | 0,0 | 0,935 | -16,4 | 1040,0 | 155,7 | 8,493 |
| 54 | 0,0 | 0,932 | -16,6 | 1060,0 | 153,7 | 8,443 |
| 55 | 0,0 | 0,929 | -16,7 | 1080,0 | 151,6 | 8,390 |
| 56 | 0,0 | 0,926 | -16,8 | 1100,0 | 149,5 | 8,339 |
| 57 | 0,0 | 0,923 | -17,0 | 1120,0 | 147,5 | 8,286 |
| 58 | 0,0 | 0,921 | -17,1 | 1140,0 | 145,3 | 8,231 |
| 59 | 0,0 | 0,918 | -17,3 | 1160,0 | 143,1 | 8,176 |
| 60 | 0,0 | 0,915 | -17,4 | 1180,0 | 140,9 | 8,119 |
| 61 | 0,0 | 0,912 | -17,6 | 1200,0 | 138,7 | 8,062 |
| 62 | 0,0 | 0,908 | -17,8 | 1220,0 | 136,4 | 8,004 |
| 63 | 0,0 | 0,905 | -17,9 | 1240,0 | 134,1 | 7,943 |
| 64 | 0,0 | 0,902 | -18,1 | 1260,0 | 131,8 | 7,882 |
| 65 | 0,0 | 0,899 | -18,3 | 1280,0 | 129,4 | 7,818 |
| 66 | 0,0 | 0,896 | -18,4 | 1300,0 | 127,0 | 7,754 |
| 67 | 0,0 | 0,892 | -18,6 | 1320,0 | 124,6 | 7,689 |
| 68 | 0,0 | 0,889 | -18,8 | 1340,0 | 122,0 | 7,621 |
| 69 | 0,0 | 0,886 | -18,9 | 1360,0 | 119,5 | 7,552 |
| 70 | 0,0 | 0,882 | -19,1 | 1380,0 | 117,0 | 7,480 |
| 71 | 0,0 | 0,879 | -19,3 | 1400,0 | 114,3 | 7,408 |
| 72 | 0,0 | 0,875 | -19,5 | 1420,0 | 111,7 | 7,334 |
| 73 | 0,0 | 0,871 | -19,7 | 1440,0 | 108,9 | 7,256 |
| 74 | 0,0 | 0,867 | -19,9 | 1460,0 | 106,2 | 7,177 |
| 75 | 0,0 | 0,864 | -20,1 | 1480,0 | 103,3 | 7,094 |
| 76 | 0,0 | 0,860 | -20,3 | 1500,0 | 100,5 | 7,010 |
| 77 | 0,0 | 0,856 | -20,5 | 1520,0 | 97,5 | 6,924 |
| 78 | 0,0 | 0,852 | -20,7 | 1540,0 | 94,6 | 6,832 |
| 79 | 0,0 | 0,847 | -20,9 | 1560,0 | 91,5 | 6,740 |
| 80 | 0,0 | 0,843 | -21,1 | 1580,0 | 88,4 | 6,641 |
| 81 | 0,0 | 0,839 | -21,4 | 1600,0 | 85,2 | 6,541 |
| 82 | 0,0 | 0,834 | -21,6 | 1620,0 | 81,9 | 6,437 |
| 83 | 0,0 | 0,829 | -21,8 | 1640,0 | 78,6 | 6,325 |
| 84 | 0,0 | 0,824 | -22,1 | 1660,0 | 75,1 | 6,212 |

| Casos | Tipo | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 85 | 0,0 | 0,819 | -22,3 | 1680,0 | 71,6 | 6,089 |
| 86 | 0,0 | 0,814 | -22,6 | 1700,0 | 68,0 | 5,964 |
| 87 | 0,0 | 0,809 | -22,9 | 1720,0 | 64,3 | 5,832 |
| 88 | 0,0 | 0,803 | -23,2 | 1740,0 | 60,6 | 5,689 |
| 89 | 0,0 | 0,797 | -23,5 | 1760,0 | 56,7 | 5,540 |
| 90 | 0,0 | 0,791 | -23,8 | 1780,0 | 52,7 | 5,377 |
| 91 | 0,0 | 0,785 | -24,1 | 1800,0 | 48,6 | 5,207 |
| 92 | 0,0 | 0,778 | -24,4 | 1820,0 | 44,4 | 5,023 |
| 93 | 0,0 | 0,771 | -24,8 | 1840,0 | 40,0 | 4,816 |
| 94 | 0,0 | 0,763 | -25,2 | 1860,0 | 35,6 | 4,596 |
| 95 | 0,0 | 0,755 | -25,6 | 1880,0 | 31,0 | 4,343 |
| 96 | 0,0 | 0,746 | -26,1 | 1900,0 | 26,2 | 4,064 |
| 97 | 0,0 | 0,736 | -26,6 | 1920,0 | 21,3 | 3,741 |
| 98 | 0,0 | 0,724 | -27,2 | 1940,0 | 16,3 | 3,342 |
| 99 | 0,0 | 0,710 | -27,9 | 1960,0 | 11,1 | 2,851 |
| 100 | 0,0 | 0,692 | -28,9 | 1980,0 | 5,7 | 2,129 |
| 101 | 0,0 | 0,653 | -30,9 | 2000,0 | 0,1 | 0,364 |
| 102 | 0,0 | 0,651 | -31,0 | 2000,0 | 0,0 | 0,233 |
| 103 | 0,0 | 0,647 | -31,2 | 2001,0 | 0,0 | -157,501 |
| 104 | 0,0 | 0,643 | -31,4 | 2000,0 | 0,0 | -0,240 |
| 105 | 0,0 | 0,639 | -31,6 | 2000,0 | -0,1 | -0,383 |
| 106 | 0,0 | 0,635 | -31,8 | 1999,0 | -0,3 | -0,663 |
| 107 | 0,0 | 0,632 | -32,0 | 1998,0 | -0,5 | -0,864 |
| 108 | 0,0 | 0,628 | -32,2 | 1997,0 | -0,9 | -1,088 |
| 109 | 0,0 | 0,624 | -32,4 | 1996,0 | -1,3 | -1,322 |
| 110 | 0,0 | 0,620 | -32,6 | 1994,0 | -1,8 | -1,564 |
| 111 | 0,0 | 0,616 | -32,8 | 1992,0 | -2,4 | -1,781 |
| 112 | 0,0 | 0,613 | -33,0 | 1990,0 | -3,0 | -2,047 |
| 113 | 0,0 | 0,609 | -33,2 | 1987,0 | -3,6 | -2,321 |
| 114 | 0,0 | 0,605 | -33,4 | 1985,0 | -4,4 | -2,581 |
| 115 | 0,0 | 0,602 | -33,6 | 1982,0 | -5,2 | -2,848 |
| 116 | 0,0 | 0,598 | -33,8 | 1979,0 | -6,0 | -3,106 |
| 117 | 0,0 | 0,594 | -33,9 | 1975,0 | -6,9 | -3,399 |
| 118 | 0,0 | 0,591 | -34,1 | 1972,0 | -7,9 | -3,685 |
| 119 | 0,0 | 0,587 | -34,3 | 1968,0 | -8,9 | -3,983 |
| 120 | 0,0 | 0,584 | -34,5 | 1964,0 | -9,9 | -4,294 |
| 121 | 0,0 | 0,580 | -34,7 | 1960,0 | -11,0 | -4,596 |
| 122 | 0,0 | 0,577 | -34,8 | 1956,0 | -12,2 | -4,893 |
| 123 | 0,0 | 0,573 | -35,0 | 1951,0 | -13,3 | -5,226 |
| 124 | 0,0 | 0,570 | -35,2 | 1947,0 | -14,5 | -5,535 |
| 125 | 0,0 | 0,566 | -35,3 | 1942,0 | -15,7 | -5,877 |
| 126 | 0,0 | 0,563 | -35,5 | 1937,0 | -17,0 | -6,196 |
| 127 | 0,0 | 0,560 | -35,6 | 1932,0 | -18,3 | -6,531 |

| Casos | Tipo | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 128 | 0,0 | 0,556 | -35,8 | 1927,0 | -19,5 | -6,885 |
| 129 | 0,0 | 0,553 | -35,9 | 1922,0 | -20,9 | -7,232 |
| 130 | 0,0 | 0,550 | -36,1 | 1916,0 | -22,2 | -7,599 |
| 131 | 0,0 | 0,547 | -36,2 | 1911,0 | -23,6 | -7,965 |
| 132 | 0,0 | 0,544 | -36,4 | 1905,0 | -24,9 | -8,329 |
| 133 | 0,0 | 0,541 | -36,5 | 1899,0 | -26,3 | -8,715 |
| 134 | 0,0 | 0,538 | -36,6 | 1894,0 | -27,7 | -9,096 |
| 135 | 0,0 | 0,535 | -36,7 | 1887,0 | -29,2 | -9,499 |
| 136 | 0,0 | 0,532 | -36,9 | 1882,0 | -30,6 | -9,881 |
| 137 | 0,0 | 0,529 | -37,0 | 1876,0 | -31,9 | -10,286 |
| 138 | 0,0 | 0,526 | -37,1 | 1869,0 | -33,4 | -10,693 |
| 139 | 0,0 | 0,523 | -37,2 | 1864,0 | -34,8 | -11,080 |
| 140 | 0,0 | 0,521 | -37,3 | 1857,0 | -36,2 | -11,510 |

Na Figura 5.4 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga na barra 4. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga na barra 2 e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de controle de tensão nas barras do tipo PV.

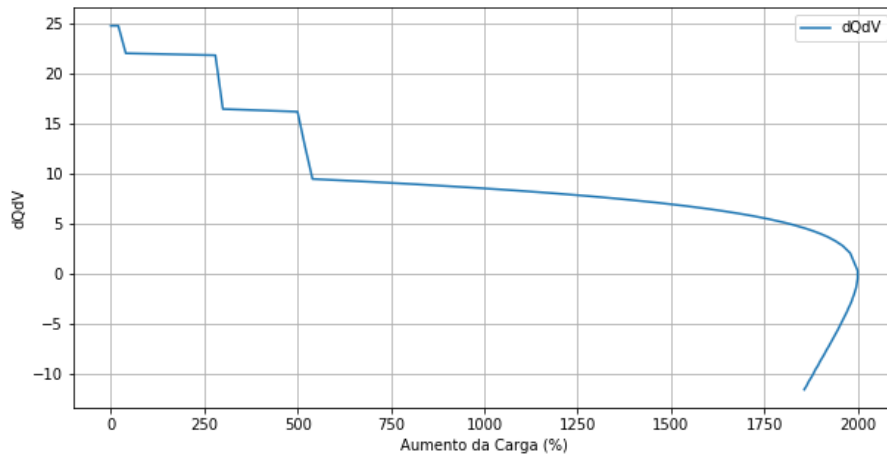


Figura 5.4: Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 4

5.2.1.4

Análise da Barra 5

A análise da barra 5 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos no

patamar de carga na barra 2.

Na Tabela 5.5 apresentam-se tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.5.

A barra 5 é do tipo PQ e, portanto, a carga é constante com $PL = 7,6$ MW e $QL = 1,6$ Mvar. Essa barra não fornece geração. O Caso 1 correspondente ao caso-base do sistema e possui potência ativa de carga na barra 2 igual a 21,7 MW e tensão de 1,02 p.u. na barra 5. Os Casos 98 ao 105 são os casos de máximo carregamento do sistema, o Caso 104 possui potência reativa de carga de 266,7 Mvar na barra 2 e tensão de 0,672 p.u. na barra 5. A partir do Caso 105 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) tem valores negativos. Assim como para a barra 1, na barra 5 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ captura uma descontinuidade quando ocorre perda de controle de tensão nos Casos 3, 16, 27, 28.

Tabela 5.5: Análise da Barra 5 - Crescimento de Carga na Barra 2

| Casos | Tipo | V_5 (p.u.) | Θ_5 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 1 | 0,0 | 1,020 | -8,8 | 0,0 | 259,4 | 24,294 |
| 2 | 0,0 | 1,019 | -8,9 | 20,0 | 258,0 | 24,293 |
| 3 | 0,0 | 1,019 | -9,0 | 40,0 | 256,6 | 21,563 |
| 4 | 0,0 | 1,019 | -9,1 | 60,0 | 255,2 | 21,546 |
| 5 | 0,0 | 1,018 | -9,1 | 80,0 | 253,8 | 21,529 |
| 6 | 0,0 | 1,017 | -9,2 | 100,0 | 252,4 | 21,511 |
| 7 | 0,0 | 1,017 | -9,3 | 120,0 | 251,0 | 21,494 |
| 8 | 0,0 | 1,016 | -9,4 | 140,0 | 249,6 | 21,476 |
| 9 | 0,0 | 1,016 | -9,5 | 160,0 | 248,1 | 21,458 |
| 10 | 0,0 | 1,015 | -9,6 | 180,0 | 246,7 | 21,440 |
| 11 | 0,0 | 1,014 | -9,7 | 200,0 | 245,3 | 21,422 |
| 12 | 0,0 | 1,014 | -9,8 | 220,0 | 243,8 | 21,404 |
| 13 | 0,0 | 1,013 | -9,9 | 240,0 | 242,3 | 21,385 |
| 14 | 0,0 | 1,013 | -10,0 | 260,0 | 240,8 | 21,367 |
| 15 | 0,0 | 1,012 | -10,1 | 280,0 | 239,3 | 21,348 |
| 16 | 0,0 | 1,011 | -10,2 | 300,0 | 237,8 | 18,193 |
| 17 | 0,0 | 1,010 | -10,3 | 320,0 | 236,3 | 18,166 |
| 18 | 0,0 | 1,009 | -10,4 | 340,0 | 234,8 | 18,139 |
| 19 | 0,0 | 1,008 | -10,5 | 360,0 | 233,2 | 18,112 |
| 20 | 0,0 | 1,007 | -10,6 | 380,0 | 231,6 | 18,083 |
| 21 | 0,0 | 1,006 | -10,7 | 400,0 | 230,1 | 18,056 |
| 22 | 0,0 | 1,005 | -10,8 | 420,0 | 228,5 | 18,028 |
| 23 | 0,0 | 1,004 | -10,9 | 440,0 | 226,8 | 17,999 |
| 24 | 0,0 | 1,003 | -11,0 | 460,0 | 225,2 | 17,970 |
| 25 | 0,0 | 1,002 | -11,1 | 480,0 | 223,6 | 17,941 |

| Casos | Tipo | V_5 (p.u.) | Θ_5 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 26 | 0,0 | 1,001 | -11,2 | 500,0 | 221,9 | 17,912 |
| 27 | 0,0 | 0,999 | -11,3 | 520,0 | 220,3 | 13,179 |
| 28 | 0,0 | 0,998 | -11,4 | 540,0 | 218,6 | 10,505 |
| 29 | 0,0 | 0,996 | -11,5 | 560,0 | 216,9 | 10,469 |
| 30 | 0,0 | 0,994 | -11,6 | 580,0 | 215,2 | 10,430 |
| 31 | 0,0 | 0,992 | -11,7 | 600,0 | 213,5 | 10,393 |
| 32 | 0,0 | 0,990 | -11,8 | 620,0 | 211,7 | 10,355 |
| 33 | 0,0 | 0,988 | -11,9 | 640,0 | 210,0 | 10,315 |
| 34 | 0,0 | 0,986 | -12,0 | 660,0 | 208,2 | 10,276 |
| 35 | 0,0 | 0,984 | -12,1 | 680,0 | 206,4 | 10,235 |
| 36 | 0,0 | 0,981 | -12,2 | 700,0 | 204,6 | 10,195 |
| 37 | 0,0 | 0,979 | -12,3 | 720,0 | 202,8 | 10,155 |
| 38 | 0,0 | 0,977 | -12,4 | 740,0 | 200,9 | 10,112 |
| 39 | 0,0 | 0,975 | -12,5 | 760,0 | 199,1 | 10,071 |
| 40 | 0,0 | 0,973 | -12,7 | 780,0 | 197,1 | 10,027 |
| 41 | 0,0 | 0,971 | -12,8 | 800,0 | 195,2 | 9,984 |
| 42 | 0,0 | 0,968 | -12,9 | 820,0 | 193,3 | 9,940 |
| 43 | 0,0 | 0,966 | -13,0 | 840,0 | 191,4 | 9,895 |
| 44 | 0,0 | 0,964 | -13,1 | 860,0 | 189,4 | 9,850 |
| 45 | 0,0 | 0,962 | -13,2 | 880,0 | 187,4 | 9,803 |
| 46 | 0,0 | 0,959 | -13,3 | 900,0 | 185,4 | 9,757 |
| 47 | 0,0 | 0,957 | -13,4 | 920,0 | 183,4 | 9,710 |
| 48 | 0,0 | 0,955 | -13,5 | 940,0 | 181,3 | 9,660 |
| 49 | 0,0 | 0,952 | -13,7 | 960,0 | 179,2 | 9,612 |
| 50 | 0,0 | 0,950 | -13,8 | 980,0 | 177,1 | 9,561 |
| 51 | 0,0 | 0,947 | -13,9 | 1000,0 | 174,9 | 9,510 |
| 52 | 0,0 | 0,945 | -14,0 | 1020,0 | 172,7 | 9,459 |
| 53 | 0,0 | 0,942 | -14,1 | 1040,0 | 170,5 | 9,406 |
| 54 | 0,0 | 0,940 | -14,3 | 1060,0 | 168,3 | 9,353 |
| 55 | 0,0 | 0,937 | -14,4 | 1080,0 | 166,1 | 9,297 |
| 56 | 0,0 | 0,935 | -14,5 | 1100,0 | 163,8 | 9,242 |
| 57 | 0,0 | 0,932 | -14,6 | 1120,0 | 161,5 | 9,186 |
| 58 | 0,0 | 0,929 | -14,8 | 1140,0 | 159,1 | 9,127 |
| 59 | 0,0 | 0,926 | -14,9 | 1160,0 | 156,7 | 9,069 |
| 60 | 0,0 | 0,924 | -15,0 | 1180,0 | 154,3 | 9,007 |
| 61 | 0,0 | 0,921 | -15,2 | 1200,0 | 151,9 | 8,946 |
| 62 | 0,0 | 0,918 | -15,3 | 1220,0 | 149,3 | 8,884 |
| 63 | 0,0 | 0,915 | -15,4 | 1240,0 | 146,8 | 8,819 |
| 64 | 0,0 | 0,912 | -15,6 | 1260,0 | 144,3 | 8,754 |
| 65 | 0,0 | 0,909 | -15,7 | 1280,0 | 141,6 | 8,685 |
| 66 | 0,0 | 0,906 | -15,8 | 1300,0 | 139,0 | 8,617 |
| 67 | 0,0 | 0,903 | -16,0 | 1320,0 | 136,3 | 8,548 |
| 68 | 0,0 | 0,900 | -16,1 | 1340,0 | 133,5 | 8,474 |

| Casos | Tipo | V_5 (p.u.) | Θ_5 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 69 | 0,0 | 0,897 | -16,3 | 1360,0 | 130,8 | 8,400 |
| 70 | 0,0 | 0,894 | -16,4 | 1380,0 | 127,9 | 8,323 |
| 71 | 0,0 | 0,890 | -16,6 | 1400,0 | 125,0 | 8,245 |
| 72 | 0,0 | 0,887 | -16,7 | 1420,0 | 122,1 | 8,166 |
| 73 | 0,0 | 0,884 | -16,9 | 1440,0 | 119,0 | 8,081 |
| 74 | 0,0 | 0,880 | -17,1 | 1460,0 | 116,0 | 7,997 |
| 75 | 0,0 | 0,877 | -17,2 | 1480,0 | 112,9 | 7,907 |
| 76 | 0,0 | 0,873 | -17,4 | 1500,0 | 109,7 | 7,817 |
| 77 | 0,0 | 0,869 | -17,6 | 1520,0 | 106,5 | 7,723 |
| 78 | 0,0 | 0,865 | -17,7 | 1540,0 | 103,2 | 7,624 |
| 79 | 0,0 | 0,862 | -17,9 | 1560,0 | 99,8 | 7,524 |
| 80 | 0,0 | 0,858 | -18,1 | 1580,0 | 96,4 | 7,417 |
| 81 | 0,0 | 0,853 | -18,3 | 1600,0 | 92,8 | 7,309 |
| 82 | 0,0 | 0,849 | -18,5 | 1620,0 | 89,2 | 7,196 |
| 83 | 0,0 | 0,845 | -18,7 | 1640,0 | 85,5 | 7,075 |
| 84 | 0,0 | 0,840 | -18,9 | 1660,0 | 81,8 | 6,952 |
| 85 | 0,0 | 0,836 | -19,1 | 1680,0 | 77,9 | 6,818 |
| 86 | 0,0 | 0,831 | -19,3 | 1700,0 | 73,9 | 6,682 |
| 87 | 0,0 | 0,826 | -19,5 | 1720,0 | 69,9 | 6,538 |
| 88 | 0,0 | 0,821 | -19,7 | 1740,0 | 65,8 | 6,381 |
| 89 | 0,0 | 0,815 | -20,0 | 1760,0 | 61,5 | 6,219 |
| 90 | 0,0 | 0,810 | -20,2 | 1780,0 | 57,1 | 6,040 |
| 91 | 0,0 | 0,804 | -20,5 | 1800,0 | 52,6 | 5,854 |
| 92 | 0,0 | 0,797 | -20,8 | 1820,0 | 48,0 | 5,652 |
| 93 | 0,0 | 0,791 | -21,1 | 1840,0 | 43,2 | 5,425 |
| 94 | 0,0 | 0,784 | -21,4 | 1860,0 | 38,3 | 5,182 |
| 95 | 0,0 | 0,776 | -21,7 | 1880,0 | 33,4 | 4,902 |
| 96 | 0,0 | 0,767 | -22,1 | 1900,0 | 28,2 | 4,593 |
| 97 | 0,0 | 0,758 | -22,5 | 1920,0 | 23,0 | 4,235 |
| 98 | 0,0 | 0,747 | -22,9 | 1940,0 | 17,4 | 3,791 |
| 99 | 0,0 | 0,735 | -23,5 | 1960,0 | 11,9 | 3,242 |
| 100 | 0,0 | 0,718 | -24,2 | 1980,0 | 6,1 | 2,429 |
| 101 | 0,0 | 0,682 | -25,6 | 2000,0 | 0,1 | 0,419 |
| 102 | 0,0 | 0,680 | -25,7 | 2000,0 | 0,0 | 0,268 |
| 103 | 0,0 | 0,676 | -25,9 | 2001,0 | 0,0 | 1,523 |
| 104 | 0,0 | 0,672 | -26,0 | 2000,0 | 0,0 | -0,278 |
| 105 | 0,0 | 0,669 | -26,2 | 2000,0 | -0,1 | -0,443 |
| 106 | 0,0 | 0,665 | -26,3 | 1999,0 | -0,4 | -0,769 |
| 107 | 0,0 | 0,662 | -26,4 | 1998,0 | -0,6 | -1,003 |
| 108 | 0,0 | 0,658 | -26,6 | 1997,0 | -1,0 | -1,266 |
| 109 | 0,0 | 0,654 | -26,7 | 1996,0 | -1,4 | -1,539 |
| 110 | 0,0 | 0,651 | -26,8 | 1994,0 | -1,9 | -1,824 |
| 111 | 0,0 | 0,647 | -27,0 | 1992,0 | -2,5 | -2,081 |

| Casos | Tipo | V_5 (p.u.) | Θ_5 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 112 | 0,0 | 0,644 | -27,1 | 1990,0 | -3,2 | -2,397 |
| 113 | 0,0 | 0,641 | -27,2 | 1987,0 | -3,9 | -2,722 |
| 114 | 0,0 | 0,637 | -27,4 | 1985,0 | -4,7 | -3,033 |
| 115 | 0,0 | 0,634 | -27,5 | 1982,0 | -5,6 | -3,353 |
| 116 | 0,0 | 0,630 | -27,6 | 1979,0 | -6,5 | -3,664 |
| 117 | 0,0 | 0,627 | -27,7 | 1975,0 | -7,4 | -4,020 |
| 118 | 0,0 | 0,624 | -27,8 | 1972,0 | -8,4 | -4,368 |
| 119 | 0,0 | 0,620 | -27,9 | 1968,0 | -9,6 | -4,734 |
| 120 | 0,0 | 0,617 | -28,1 | 1964,0 | -10,7 | -5,116 |
| 121 | 0,0 | 0,614 | -28,2 | 1960,0 | -11,8 | -5,491 |
| 122 | 0,0 | 0,611 | -28,3 | 1956,0 | -13,0 | -5,861 |
| 123 | 0,0 | 0,608 | -28,4 | 1951,0 | -14,3 | -6,279 |
| 124 | 0,0 | 0,604 | -28,5 | 1947,0 | -15,6 | -6,670 |
| 125 | 0,0 | 0,601 | -28,6 | 1942,0 | -16,9 | -7,106 |
| 126 | 0,0 | 0,598 | -28,7 | 1937,0 | -18,2 | -7,517 |
| 127 | 0,0 | 0,595 | -28,8 | 1932,0 | -19,6 | -7,950 |
| 128 | 0,0 | 0,592 | -28,9 | 1927,0 | -21,1 | -8,413 |
| 129 | 0,0 | 0,589 | -28,9 | 1922,0 | -22,5 | -8,872 |
| 130 | 0,0 | 0,586 | -29,0 | 1916,0 | -23,9 | -9,362 |
| 131 | 0,0 | 0,583 | -29,1 | 1911,0 | -25,4 | -9,855 |
| 132 | 0,0 | 0,581 | -29,2 | 1905,0 | -26,8 | -10,352 |
| 133 | 0,0 | 0,578 | -29,2 | 1899,0 | -28,4 | -10,883 |
| 134 | 0,0 | 0,575 | -29,3 | 1894,0 | -29,9 | -11,416 |
| 135 | 0,0 | 0,572 | -29,4 | 1887,0 | -31,4 | -11,986 |
| 136 | 0,0 | 0,570 | -29,4 | 1882,0 | -32,9 | -12,535 |
| 137 | 0,0 | 0,567 | -29,5 | 1876,0 | -34,4 | -13,125 |
| 138 | 0,0 | 0,564 | -29,5 | 1869,0 | -36,0 | -13,726 |
| 139 | 0,0 | 0,562 | -29,6 | 1864,0 | -37,6 | -14,308 |
| 140 | 0,0 | 0,559 | -29,6 | 1857,0 | -39,1 | -14,965 |

Na Figura 5.5 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga na barra 5. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga na barra 2 e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de controle de tensão nas barras do tipo PV.

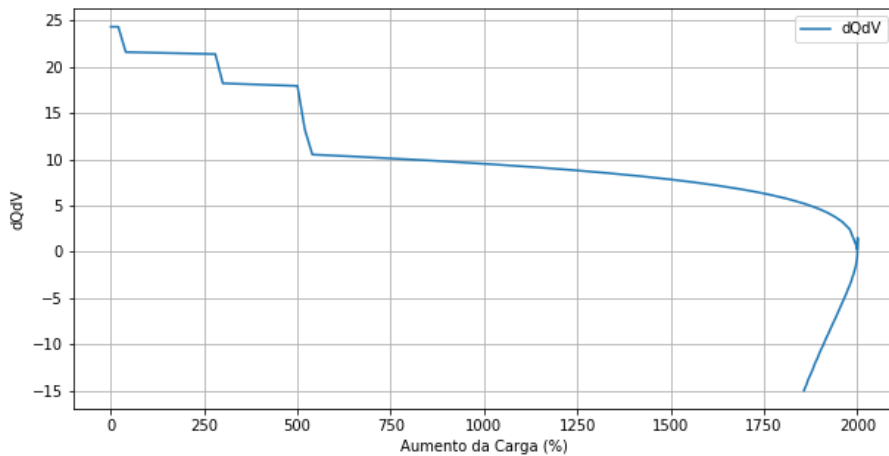


Figura 5.5: Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ na Barra 5

5.2.1.5

Conclusão

Para a barra 1 existem regiões de operação em que o índice de margem da curva QV é nulo, mas o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ não. Essa divergência de resultados nos índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ ocorre entre os Casos 25 ao 30, entre os Casos 102 ao 123, já de pouco interesse prático.

Nas demais barras analisadas (2, 4 e 5) não foi detectada essa divergência de resultados entre os índices.

5.2.2

Estudos com Crescimento de Carga e Geração em Múltiplas Barras

Nessa Seção é utilizado, mais uma vez, o sistema de teste IEEE 14 barras [16] para avaliação dos índices de estabilidade de tensão.

Porém, agora o aumento de carga ocorre nas barras 4 e 5, enquanto o gerador responsável por acompanhar o aumento de carga é o da barra 2. A barra 1 é barra swing do sistema, responsável por absorver as perdas de potência ativa. Com o aumento de carga em múltiplas barras espera-se atingir o lado esquerdo da curva QV em um menor número de pontos de operação.

O FPC do programa ANAREDE é utilizado, assim como na Seção 5.2.1. Nesse estudo são gerados 124 casos com diferentes patamares de carga.

Os índices de sensibilidade $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e a margem da curva QV também serão analisados para cada patamar de carga do FPC nas barras 1, 2, 4 e 5 nas próximas seções. E conforme definido na Seção 4.3, a margem da curva QV informa a distância em MW do ponto de máximo carregamento.

5.2.2.1

Análise da Barra 1

A análise da barra 1 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos de 20 % no patamar de carga nas barras 4 e 5.

Na Tabela 5.6 apresentam-se potência ativa e reativa gerada, tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.6.

A barra 1 é a barra de referência do sistema e, portanto, V e Θ são constantes nessa barra. Essa barra absorve as perdas de potência ativa e, junto com as barras PV, as perdas reativa do sistema.

O Caso 1 corresponde ao caso-base do sistema e possui potência ativa na barra 1 igual a 232,4 MW e tensão de 1,06 p.u. A M_{QV} não é calculada pelo FPC do programa ANAREDE no Caso 1.

Tabela 5.6: Análise na Barra 1 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5

| Casos | Tipo | PG ₁ (MW) | QG ₁ (Mvar) | V ₁ (p.u.) | Θ ₁ (°) | Δ Carga (%) | M _{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|--|
| 1 | 2,0 | 232,4 | -16,5 | 1,06 | 0,0 | 0,0 | NaN | 21,290 |
| 2 | 2,0 | 233,0 | -15,7 | 1,06 | 0,0 | 20,0 | 30,9 | 21,295 |
| 3 | 2,0 | 233,7 | -14,9 | 1,06 | -0,0 | 40,0 | 29,8 | 21,301 |
| 4 | 2,0 | 234,4 | -14,1 | 1,06 | -0,0 | 60,0 | 28,1 | 21,305 |
| 5 | 2,0 | 235,2 | -13,2 | 1,06 | -0,0 | 80,0 | 27,6 | 21,310 |
| 6 | 2,0 | 236,1 | -12,4 | 1,06 | -0,0 | 100,0 | 26,6 | 21,315 |
| 7 | 2,0 | 237,0 | -11,5 | 1,06 | -0,0 | 120,0 | 24,4 | 21,319 |
| 8 | 2,0 | 237,9 | -10,6 | 1,06 | -0,0 | 140,0 | 22,9 | 21,324 |
| 9 | 2,0 | 239,0 | -9,7 | 1,06 | -0,0 | 160,0 | 21,8 | 21,328 |
| 10 | 2,0 | 240,0 | -8,7 | 1,06 | -0,0 | 180,0 | 19,2 | 21,332 |
| 11 | 2,0 | 241,2 | -7,8 | 1,06 | -0,0 | 200,0 | 16,1 | 21,336 |
| 12 | 2,0 | 242,4 | -6,8 | 1,06 | -0,0 | 220,0 | 15,2 | 21,340 |
| 13 | 2,0 | 243,6 | -5,8 | 1,06 | -0,0 | 240,0 | 12,6 | 21,344 |
| 14 | 2,0 | 245,0 | -4,6 | 1,06 | -0,0 | 260,0 | 9,1 | 21,019 |
| 15 | 2,0 | 246,4 | -3,2 | 1,06 | -0,0 | 280,0 | 5,4 | 20,879 |
| 16 | 2,0 | 247,9 | -1,5 | 1,06 | -0,0 | 300,0 | 1,7 | 20,884 |
| 17 | 2,0 | 249,5 | 0,1 | 1,06 | -0,0 | 320,0 | 0,0 | 20,888 |
| 18 | 2,0 | 251,1 | 4,3 | 1,06 | -0,0 | 340,0 | 0,0 | -4,177 |
| 19 | 2,0 | 253,0 | 10,6 | 1,06 | -0,0 | 360,0 | 0,0 | -4,454 |
| 20 | 2,0 | 255,0 | 17,3 | 1,06 | -0,0 | 380,0 | 0,0 | -4,752 |
| 21 | 2,0 | 257,0 | 24,5 | 1,06 | -0,0 | 400,0 | 0,0 | -5,091 |
| 22 | 2,0 | 259,3 | 32,2 | 1,06 | -0,0 | 420,0 | -1,8 | -5,475 |
| 23 | 2,0 | 261,7 | 40,4 | 1,06 | -0,0 | 440,0 | -6,0 | -5,909 |

| Casos | Tipo | PG_1 (MW) | QG_1 (Mvar) | V_1 (p.u.) | Θ_1 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 24 | 2,0 | 264,3 | 49,3 | 1,06 | -0,0 | 460,0 | -6,5 | -6,426 |
| 25 | 2,0 | 267,0 | 59,0 | 1,06 | -0,0 | 480,0 | -7,1 | -7,009 |
| 26 | 2,0 | 270,0 | 69,4 | 1,06 | -0,0 | 500,0 | -9,4 | -7,703 |
| 27 | 2,0 | 273,3 | 80,8 | 1,06 | -0,0 | 520,0 | -16,6 | -8,535 |
| 28 | 2,0 | 276,9 | 93,4 | 1,06 | -0,0 | 540,0 | -18,5 | -9,541 |
| 29 | 2,0 | 280,9 | 107,4 | 1,06 | -0,0 | 560,0 | -20,8 | -10,853 |
| 30 | 2,0 | 285,4 | 123,2 | 1,06 | -0,0 | 580,0 | -32,1 | -12,507 |
| 31 | 2,0 | 290,5 | 141,3 | 1,06 | -0,0 | 600,0 | -38,9 | -14,797 |
| 32 | 2,0 | 296,6 | 162,8 | 1,06 | -0,0 | 620,0 | -46,0 | -18,198 |
| 33 | 2,0 | 304,1 | 189,6 | 1,06 | -0,0 | 640,0 | -68,5 | -23,917 |
| 34 | 2,0 | 314,6 | 227,6 | 1,06 | -0,0 | 660,0 | -91,6 | -38,064 |
| 35 | 2,0 | 323,1 | 258,3 | 1,06 | -0,0 | 670,0 | -113,4 | -60,617 |
| 36 | 2,0 | 337,1 | 299,3 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | -151,2 | -202,858 |
| 37 | 2,0 | 338,7 | 305,0 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | -156,9 | -202,871 |
| 38 | 2,0 | 339,2 | 306,9 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | 0,0 | -202,844 |
| 39 | 2,0 | 340,7 | 312,4 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | 0,0 | -413,371 |
| 40 | 2,0 | 342,2 | 317,9 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | 0,0 | -413,307 |
| 41 | 2,0 | 343,5 | 323,4 | 1,06 | -0,0 | 675,0 | 0,0 | -862,080 |

O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ apresenta descontinuidade quando ocorre perda de controle de tensão, ou seja, quando uma determinada barra atinge o seu limite de geração de potência reativa. Isso ocorre no Caso 14 para as barras 4 e 6, Caso 15 para a barra 3, Caso 18 para barra 2.

Na Tabela 5.7 apresenta-se o tipo de barra, da barra 1 à barra 8. Pode-se observar a perda de controle de tensão que ocorre nas barras do tipo PV.

Ao comparar a perda de continuidade nos índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ obtidos nessa seção com o ocorrido na Seção 5.2.1, percebe-se que aqui as barras 6 e 8 são as que primeiro sofrem com a perda de continuidade. Isso ocorre, pois, essas barras são as mais próximas das barras 4 e 5, onde ocorre o aumento de carga.

O índice da barra 1 passa por zero entre os Casos 17 e 18, pois neste caso deixam de existir barras com controle de tensão, como já explicado na Seção 5.2.1.

O comportamento geral do índice M_{QV} indica sua diminuição com o aumento da carga do sistema, balisando sua aproximação ao lado esquerdo da curva QV. A partir do Caso 17 os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ apresentam valores abaixo de zero, atuando como indicação de que o SEE opera fora da região de operação normal.

O índice M_{QV} diminui com o aumento da carga, indicando a aproximação ao lado esquerdo da curva QV.

Tabela 5.7: Tipos das Barras - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5

| Casos | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | Barra 4 | Barra 5 | Barra 6 | Barra 7 | Barra 8 |
|-------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 2 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 5 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 8 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 10 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 11 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 12 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 14 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 15 | 2 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 16 | 2 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 17 | 2 | 1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 18 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 19 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 20 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 21 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 22 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 23 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 24 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 25 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 26 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 27 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 28 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 29 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 30 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 31 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 32 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 33 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 34 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 35 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 36 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 37 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 38 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |
| 39 | 2 | -1 | -1 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1 |

A carga máxima ocorre nos Casos 36 a 40 quando ambos os índices são negativos. A partir daí o interesse prático é pequeno.

Na Figura 5.6 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ versus o aumento de carga nas barras 4 e 5. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ com o aumento dos patamares de carga e as discontinuidades que ocorrem quando da perda de tensão controlada nas barras do tipo PV.

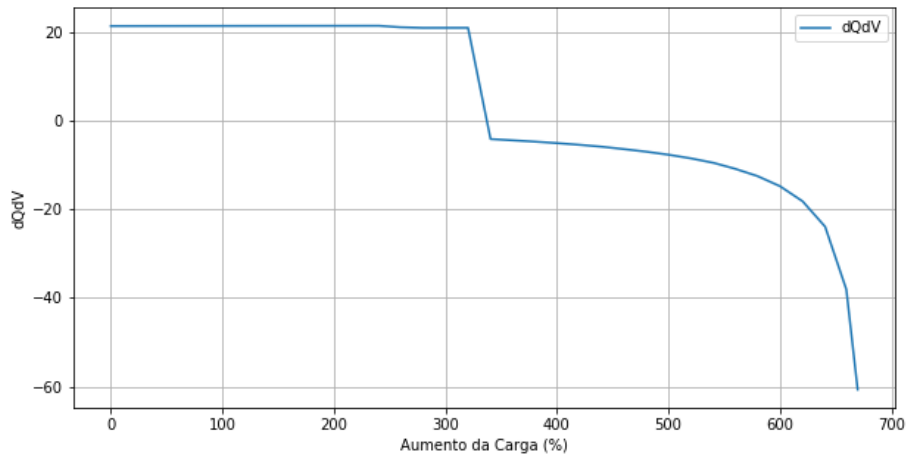


Figura 5.6: Índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ na Barra 1

5.2.2.2

Análise da Barra 2

A análise da barra 2 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos de 20 % no patamar de carga nas barras 4 e 5.

Na Tabela 5.8 apresentam-se potência ativa e reativa gerada, tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.8.

A barra 2 é configurada através do comando do comando DGER do ANAREDE para compensar o aumento da demanda de potência ativa nas barras 4 e 5.

O Caso 1 corresponde ao caso-base, possuindo potência ativa na barra 2 igual a 40,0 MW, potência reativa de 43,6 Mvar, e tensão de 1,045 p.u..

Tabela 5.8: Análise na Barra 2 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5

| Casos | Tipo | P_{G_2} (MW) | Q_{G_2} (Mvar) | V_2 (p.u.) | Θ_2 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-------------------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 1 | 1,0 | 40,0 | 43,6 | 1,045 | -5,0 | 0,0 | 484,5 | 30,200 |
| 2 | 1,0 | 51,1 | 42,6 | 1,045 | -4,9 | 20,0 | 477,9 | 30,166 |
| 3 | 1,0 | 62,2 | 41,7 | 1,045 | -4,9 | 40,0 | 471,2 | 30,131 |
| 4 | 1,0 | 73,2 | 41,0 | 1,045 | -4,8 | 60,0 | 463,9 | 30,096 |
| 5 | 1,0 | 84,3 | 40,3 | 1,045 | -4,8 | 80,0 | 456,1 | 30,059 |
| 6 | 1,0 | 95,4 | 39,8 | 1,045 | -4,7 | 100,0 | 448,0 | 30,021 |
| 7 | 1,0 | 106,5 | 39,3 | 1,045 | -4,7 | 120,0 | 439,4 | 29,982 |
| 8 | 1,0 | 117,6 | 39,0 | 1,045 | -4,6 | 140,0 | 430,3 | 29,942 |
| 9 | 1,0 | 128,6 | 38,8 | 1,045 | -4,6 | 160,0 | 420,8 | 29,901 |
| 10 | 1,0 | 139,7 | 38,7 | 1,045 | -4,6 | 180,0 | 410,8 | 29,858 |
| 11 | 1,0 | 150,8 | 38,7 | 1,045 | -4,5 | 200,0 | 400,4 | 29,815 |
| 12 | 1,0 | 161,9 | 38,8 | 1,045 | -4,5 | 220,0 | 389,5 | 29,769 |
| 13 | 1,0 | 173,0 | 39,0 | 1,045 | -4,4 | 240,0 | 378,1 | 29,723 |
| 14 | 1,0 | 184,0 | 39,9 | 1,045 | -4,4 | 260,0 | 366,7 | 27,572 |
| 15 | 1,0 | 195,1 | 41,7 | 1,045 | -4,4 | 280,0 | 355,8 | 19,258 |
| 16 | 1,0 | 206,2 | 45,0 | 1,045 | -4,3 | 300,0 | 345,6 | 19,161 |
| 17 | 1,0 | 217,3 | 48,4 | 1,045 | -4,3 | 320,0 | 335,1 | 19,058 |
| 18 | -1,0 | 228,4 | 50,0 | 1,044 | -4,3 | 340,0 | 322,1 | 18,900 |
| 19 | -1,0 | 239,4 | 50,0 | 1,042 | -4,2 | 360,0 | 307,0 | 18,676 |
| 20 | -1,0 | 250,5 | 50,0 | 1,040 | -4,2 | 380,0 | 291,1 | 18,444 |
| 21 | -1,0 | 261,6 | 50,0 | 1,037 | -4,1 | 400,0 | 275,1 | 18,188 |
| 22 | -1,0 | 272,7 | 50,0 | 1,034 | -4,0 | 420,0 | 258,4 | 17,909 |
| 23 | -1,0 | 283,8 | 50,0 | 1,032 | -4,0 | 440,0 | 240,9 | 17,607 |
| 24 | -1,0 | 294,8 | 50,0 | 1,028 | -3,9 | 460,0 | 223,2 | 17,260 |
| 25 | -1,0 | 305,9 | 50,0 | 1,025 | -3,9 | 480,0 | 204,9 | 16,891 |
| 26 | -1,0 | 317,0 | 50,0 | 1,021 | -3,8 | 500,0 | 186,0 | 16,475 |
| 27 | -1,0 | 328,1 | 50,0 | 1,017 | -3,8 | 520,0 | 166,8 | 16,006 |
| 28 | -1,0 | 339,2 | 50,0 | 1,012 | -3,7 | 540,0 | 146,8 | 15,478 |
| 29 | -1,0 | 350,2 | 50,0 | 1,007 | -3,7 | 560,0 | 126,7 | 14,841 |
| 30 | -1,0 | 361,3 | 50,0 | 1,001 | -3,6 | 580,0 | 105,9 | 14,117 |
| 31 | -1,0 | 372,4 | 50,0 | 0,995 | -3,5 | 600,0 | 84,4 | 13,226 |
| 32 | -1,0 | 383,5 | 50,0 | 0,987 | -3,5 | 620,0 | 62,8 | 12,090 |
| 33 | -1,0 | 394,6 | 50,0 | 0,976 | -3,4 | 640,0 | 40,5 | 10,546 |
| 34 | -1,0 | 405,6 | 50,0 | 0,962 | -3,3 | 660,0 | 18,3 | 7,904 |
| 35 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,950 | -3,3 | 670,0 | 6,8 | 5,418 |
| 36 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,933 | -3,4 | 675,0 | 0,0 | 0,716 |
| 37 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,931 | -3,4 | 675,0 | 0,0 | 0,716 |
| 38 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,930 | -3,4 | 675,0 | 0,0 | 0,717 |
| 39 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,928 | -3,4 | 675,0 | 0,0 | -0,756 |
| 40 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,926 | -3,4 | 675,0 | 0,0 | -0,756 |
| 41 | -1,0 | 411,2 | 50,0 | 0,924 | -3,4 | 675,0 | -0,2 | -1,589 |

O índice M_{QV} diminui com o aumento da carga, indicando a aproximação ao lado esquerdo da curva QV. A partir do Caso 41 os índices M_{QV} e M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ passam a apresentar valores negativos, indicando operação fora da região normal.

Na barra 2 também é possível perceber a perda de continuidade do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ nos Casos 14, 15 e 18 quando ocorre perda de tensão controlada das barras do tipo PV.

Os Casos 36 a 41 representam a carga máxima e até o Caso 35 ambos os índices são positivos como esperado. No Caso 36 o índice M_{QV} fica nulo e entre os Casos 38 e 39 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ troca de sinal ficando negativo. A partir daí o interesse prático é pequeno.

Na Figura 5.7 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga nas barras 4 e 5. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de tensão controlada nas barras do tipo PV.

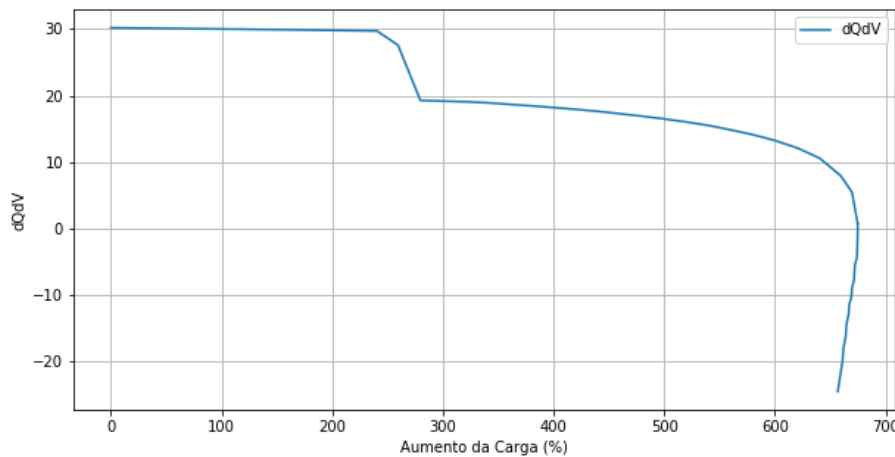


Figura 5.7: índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 2

5.2.2.3

Análise da Barra 4

A análise da barra 4 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos de 20 % no patamar de carga nas barras 4 e 5.

Na Tabela 5.9 apresentam-se potência ativa e reativa de carga, tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.9.

A barra 4 é configurada para realizar o aumento de carga do sistema em patamares de 20 %. O Caso 1 tem $PL = 47,8$ MW, $QL = -3,9$ Mvar e tensão de 1,018 p.u. Esses patamares de carga serão elevados até atingir a carga máxima.

Tabela 5.9: Análise na Barra 4 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5

| Casos | Tipo | PL_4 (MW) | QL_4 (Mvar) | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)^n$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 1 | 0,0 | 47,8 | -3,9 | 1,018 | -10,3 | 0,0 | 238,0 | 24,836 |
| 2 | 0,0 | 57,4 | -4,7 | 1,016 | -10,7 | 20,0 | 235,1 | 24,793 |
| 3 | 0,0 | 66,9 | -5,5 | 1,015 | -11,0 | 40,0 | 231,9 | 24,749 |
| 4 | 0,0 | 76,5 | -6,2 | 1,013 | -11,4 | 60,0 | 228,6 | 24,699 |
| 5 | 0,0 | 86,0 | -7,0 | 1,011 | -11,8 | 80,0 | 225,1 | 24,651 |
| 6 | 0,0 | 95,6 | -7,8 | 1,010 | -12,1 | 100,0 | 221,3 | 24,600 |
| 7 | 0,0 | 105,2 | -8,6 | 1,008 | -12,5 | 120,0 | 217,3 | 24,547 |
| 8 | 0,0 | 114,7 | -9,4 | 1,006 | -12,9 | 140,0 | 213,1 | 24,492 |
| 9 | 0,0 | 124,3 | -10,1 | 1,005 | -13,2 | 160,0 | 208,6 | 24,431 |
| 10 | 0,0 | 133,8 | -10,9 | 1,003 | -13,6 | 180,0 | 203,9 | 24,372 |
| 11 | 0,0 | 143,4 | -11,7 | 1,001 | -14,0 | 200,0 | 199,0 | 24,310 |
| 12 | 0,0 | 153,0 | -12,5 | 0,999 | -14,4 | 220,0 | 193,8 | 24,245 |
| 13 | 0,0 | 162,5 | -13,3 | 0,997 | -14,8 | 240,0 | 188,4 | 24,179 |
| 14 | 0,0 | 172,1 | -14,0 | 0,995 | -15,2 | 260,0 | 182,7 | 17,912 |
| 15 | 0,0 | 181,6 | -14,8 | 0,992 | -15,6 | 280,0 | 176,8 | 14,647 |
| 16 | 0,0 | 191,2 | -15,6 | 0,988 | -16,0 | 300,0 | 170,6 | 14,550 |
| 17 | 0,0 | 200,8 | -16,4 | 0,985 | -16,4 | 320,0 | 164,2 | 14,449 |
| 18 | 0,0 | 210,3 | -17,2 | 0,980 | -16,8 | 340,0 | 157,4 | 8,757 |
| 19 | 0,0 | 219,9 | -17,9 | 0,974 | -17,3 | 360,0 | 150,4 | 8,593 |
| 20 | 0,0 | 229,4 | -18,7 | 0,968 | -17,8 | 380,0 | 143,1 | 8,427 |
| 21 | 0,0 | 239,0 | -19,5 | 0,962 | -18,2 | 400,0 | 135,6 | 8,246 |
| 22 | 0,0 | 248,6 | -20,3 | 0,955 | -18,7 | 420,0 | 127,8 | 8,052 |
| 23 | 0,0 | 258,1 | -21,1 | 0,947 | -19,3 | 440,0 | 119,6 | 7,845 |
| 24 | 0,0 | 267,7 | -21,8 | 0,940 | -19,8 | 460,0 | 111,2 | 7,610 |
| 25 | 0,0 | 277,2 | -22,6 | 0,931 | -20,4 | 480,0 | 102,4 | 7,367 |
| 26 | 0,0 | 286,8 | -23,4 | 0,923 | -21,0 | 500,0 | 93,4 | 7,097 |
| 27 | 0,0 | 296,4 | -24,2 | 0,913 | -21,6 | 520,0 | 84,0 | 6,800 |
| 28 | 0,0 | 305,9 | -25,0 | 0,902 | -22,3 | 540,0 | 74,4 | 6,473 |
| 29 | 0,0 | 315,5 | -25,7 | 0,891 | -23,1 | 560,0 | 64,4 | 6,091 |
| 30 | 0,0 | 325,0 | -26,5 | 0,878 | -23,9 | 580,0 | 54,1 | 5,670 |
| 31 | 0,0 | 334,6 | -27,3 | 0,863 | -24,8 | 600,0 | 43,5 | 5,174 |
| 32 | 0,0 | 344,2 | -28,1 | 0,846 | -25,9 | 620,0 | 32,5 | 4,573 |
| 33 | 0,0 | 353,7 | -28,9 | 0,825 | -27,2 | 640,0 | 21,2 | 3,811 |
| 34 | 0,0 | 363,3 | -29,6 | 0,795 | -28,9 | 660,0 | 9,6 | 2,644 |
| 35 | 0,0 | 368,1 | -30,0 | 0,771 | -30,3 | 670,0 | 3,6 | 1,688 |
| 36 | 0,0 | 370,5 | -30,2 | 0,740 | -32,2 | 675,0 | 0,1 | 0,196 |
| 37 | 0,0 | 370,5 | -30,2 | 0,735 | -32,4 | 675,0 | 0,0 | 0,196 |

| Casos | Tipo | PL_4 (MW) | QL_4 (Mvar) | V_4 (p.u.) | Θ_4 (°) | Δ Carga (%) | M_{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|----------|--|
| 38 | 0,0 | 370,5 | -30,2 | 0,734 | -32,5 | 675,0 | 0,0 | 0,196 |
| 39 | 0,0 | 370,5 | -30,2 | 0,729 | -32,8 | 675,0 | 0,0 | -0,199 |
| 40 | 0,0 | 370,5 | -30,2 | 0,725 | -33,0 | 675,0 | -0,1 | -0,199 |
| 41 | 0,0 | 370,4 | -30,2 | 0,721 | -33,2 | 675,0 | -0,3 | -0,410 |

O índice M_{QV} diminui com o aumento da carga, indicando a aproximação ao lado esquerdo da curva QV. A partir do Caso 40 os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ passam a apresentar valores negativos, indicando operação fora da região normal.

Após o Caso 40 o índice M_{QV} continua diminuindo com o aumento da carga demandada pelo Sistema nas barras 4 e 5. A análise da barra 4 não sinaliza um retorno a zero do índice M_{QV} , portanto, não sinalizando a inversão da sensibilidade tensão/potência nessa barra.

A simulação de FPC diminui a carga até o Caso 86, quando o aumento de carga volta a ser positivo, ocorrendo o aumento da M_{QV} . No Caso 111 ocorre uma nova carga máxima.

Na barra 4 também é possível perceber a perda de continuidade do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ nos Casos 14, 15 e 18 quando ocorre perda de tensão controlada das barras do tipo PV.

Os Casos 36 a 41 representam a carga máxima e até o Caso 35 ambos os índices são positivos como esperado. No Caso 37 o índice M_{QV} fica nulo e entre os Casos 38 e 39 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ troca de sinal ficando negativo. A partir daí o interesse prático é pequeno.

Na Figura 5.8 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ versus o aumento de carga nas barras 4 e 5. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ com o aumento dos patamares de carga e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de tensão controlada nas barras do tipo PV.

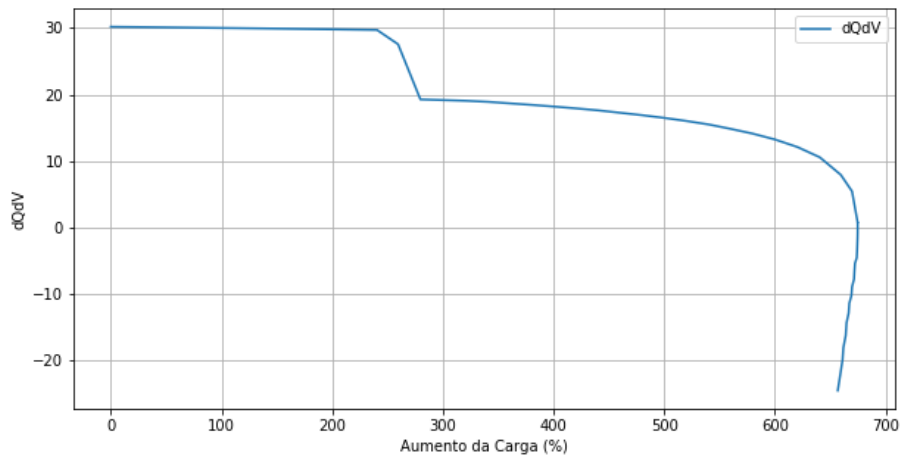


Figura 5.8: índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ na Barra 4

5.2.2.4

Análise da Barra 5

A análise da barra 5 tem como objetivo mostrar o comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$, a margem e o lado da curva QV após sucessivos aumentos de 20 % no patamar de carga nas barras 4 e 5.

Na Tabela 5.10 apresentam-se potência ativa e reativa de carga, tensão, ângulo, tipo da barra, e aumento percentual da carga. O índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e margem da curva QV (M_{QV}) também são apresentados na Tabela 5.10.

A barra 5 é configurada para realizar o aumento de carga do sistema em patamares de 20 %. O Caso 1 tem PL = 7,6 MW, QL = 1,6 Mvar e tensão de 1,02 p.u.. Esses patamares de carga serão elevados até atingir a carga máxima.

Tabela 5.10: Análise na Barra 5 - Crescimento de Carga nas Barras 4 e 5

| Casos | Tipo | PL ₅ (MW) | QL ₅ (Mvar) | V ₅ (p.u.) | Θ ₅ (°) | Δ Carga (%) | M _{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|--|
| 1 | 0,0 | 7,6 | 1,6 | 1,020 | -8,8 | 0,0 | 259,4 | 24,294 |
| 2 | 0,0 | 9,1 | 1,9 | 1,018 | -9,0 | 20,0 | 255,9 | 24,247 |
| 3 | 0,0 | 10,6 | 2,2 | 1,017 | -9,3 | 40,0 | 252,2 | 24,199 |
| 4 | 0,0 | 12,2 | 2,6 | 1,015 | -9,6 | 60,0 | 248,3 | 24,144 |
| 5 | 0,0 | 13,7 | 2,9 | 1,014 | -9,9 | 80,0 | 244,1 | 24,092 |
| 6 | 0,0 | 15,2 | 3,2 | 1,013 | -10,1 | 100,0 | 239,8 | 24,038 |
| 7 | 0,0 | 16,7 | 3,5 | 1,011 | -10,4 | 120,0 | 235,1 | 23,981 |
| 8 | 0,0 | 18,2 | 3,8 | 1,010 | -10,7 | 140,0 | 230,3 | 23,923 |
| 9 | 0,0 | 19,8 | 4,2 | 1,008 | -11,0 | 160,0 | 225,3 | 23,859 |
| 10 | 0,0 | 21,3 | 4,5 | 1,006 | -11,3 | 180,0 | 220,0 | 23,797 |

| Casos | Tipo | PL ₅ (MW) | QL ₅ (Mvar) | V ₅ (p.u.) | Θ ₅ (°) | Δ Carga (%) | M _{QV} | $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ |
|-------|------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-----------------|--|
| 11 | 0,0 | 22,8 | 4,8 | 1,005 | -11,5 | 200,0 | 214,4 | 23,731 |
| 12 | 0,0 | 24,3 | 5,1 | 1,003 | -11,8 | 220,0 | 208,6 | 23,664 |
| 13 | 0,0 | 25,8 | 5,4 | 1,002 | -12,1 | 240,0 | 202,6 | 23,595 |
| 14 | 0,0 | 27,4 | 5,8 | 0,999 | -12,4 | 260,0 | 196,3 | 17,304 |
| 15 | 0,0 | 28,9 | 6,1 | 0,997 | -12,7 | 280,0 | 189,7 | 15,490 |
| 16 | 0,0 | 30,4 | 6,4 | 0,994 | -13,0 | 300,0 | 182,8 | 15,389 |
| 17 | 0,0 | 31,9 | 6,7 | 0,990 | -13,3 | 320,0 | 175,7 | 15,284 |
| 18 | 0,0 | 33,4 | 7,0 | 0,986 | -13,6 | 340,0 | 168,4 | 9,628 |
| 19 | 0,0 | 35,0 | 7,4 | 0,981 | -14,0 | 360,0 | 160,7 | 9,452 |
| 20 | 0,0 | 36,5 | 7,7 | 0,975 | -14,3 | 380,0 | 152,7 | 9,273 |
| 21 | 0,0 | 38,0 | 8,0 | 0,970 | -14,7 | 400,0 | 144,5 | 9,080 |
| 22 | 0,0 | 39,5 | 8,3 | 0,963 | -15,0 | 420,0 | 136,0 | 8,871 |
| 23 | 0,0 | 41,0 | 8,6 | 0,957 | -15,4 | 440,0 | 127,1 | 8,649 |
| 24 | 0,0 | 42,6 | 9,0 | 0,950 | -15,8 | 460,0 | 118,0 | 8,397 |
| 25 | 0,0 | 44,1 | 9,3 | 0,943 | -16,2 | 480,0 | 108,6 | 8,136 |
| 26 | 0,0 | 45,6 | 9,6 | 0,935 | -16,6 | 500,0 | 98,9 | 7,846 |
| 27 | 0,0 | 47,1 | 9,9 | 0,926 | -17,1 | 520,0 | 88,9 | 7,526 |
| 28 | 0,0 | 48,6 | 10,2 | 0,916 | -17,6 | 540,0 | 78,6 | 7,175 |
| 29 | 0,0 | 50,2 | 10,6 | 0,906 | -18,1 | 560,0 | 67,9 | 6,762 |
| 30 | 0,0 | 51,7 | 10,9 | 0,894 | -18,7 | 580,0 | 57,0 | 6,307 |
| 31 | 0,0 | 53,2 | 11,2 | 0,881 | -19,3 | 600,0 | 45,7 | 5,769 |
| 32 | 0,0 | 54,7 | 11,5 | 0,866 | -20,0 | 620,0 | 34,1 | 5,114 |
| 33 | 0,0 | 56,2 | 11,8 | 0,846 | -20,9 | 640,0 | 22,2 | 4,279 |
| 34 | 0,0 | 57,8 | 12,2 | 0,819 | -22,1 | 660,0 | 10,0 | 2,988 |
| 35 | 0,0 | 58,5 | 12,3 | 0,798 | -23,0 | 670,0 | 3,8 | 1,919 |
| 36 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,769 | -24,2 | 675,0 | 0,1 | 0,225 |
| 37 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,765 | -24,3 | 675,0 | 0,0 | 0,225 |
| 38 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,764 | -24,4 | 675,0 | 0,0 | 0,225 |
| 39 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,760 | -24,5 | 675,0 | 0,0 | -0,229 |
| 40 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,756 | -24,7 | 675,0 | -0,1 | -0,229 |
| 41 | 0,0 | 58,9 | 12,4 | 0,752 | -24,8 | 675,0 | -0,3 | -0,473 |

O índice M_{QV} diminui com o aumento da carga, indicando a aproximação ao lado esquerdo da curva QV. A partir do Caso 40 os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ passam a apresentar valores negativos, indicando operação fora da região normal.

Após o Caso 40 o índice M_{QV} continua diminuindo com o aumento da carga demandada pelo Sistema nas barras 4 e 5. A análise da barra 5 não sinaliza um retorno a zero do índice M_{QV} , portanto, não apresentando a inversão da sensibilidade tensão/potência nessa barra.

A simulação de FPC diminui a carga até o Caso 86, quando o aumento de carga volta a ser positivo, ocorrendo o aumento da M_{QV} . No Caso 111 ocorre uma nova carga máxima.

Na barra 5 também é possível perceber a perda de continuidade do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ nos Casos 14, 15 e 18 quando ocorre perda de tensão controlada das barras do tipo PV.

Assim como ocorreu para a barra 4, os Casos 36 a 41 representam a carga máxima e até o Caso 35 ambos os índices são positivos como esperado. No Caso 37 o índice M_{QV} fica nulo e entre os Casos 38 e 39 o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ troca de sinal ficando negativo. A partir daí o interesse prático é pequeno.

Na Figura 5.9 observa-se o panorama geral do comportamento do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ versus o aumento de carga nas barras 4 e 5. Pode-se notar a deterioração do índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ com o aumento dos patamares de carga e as descontinuidades que ocorrem quando da perda de geração nas barras do tipo PV.

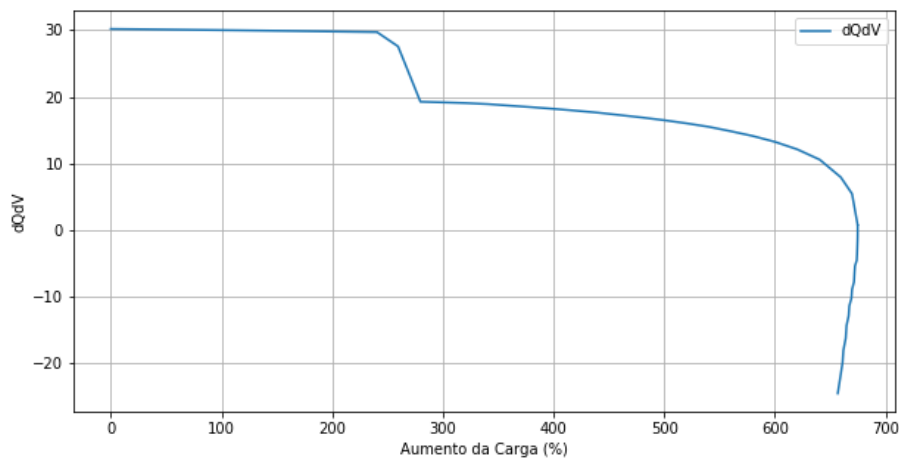


Figura 5.9: índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ na Barra 5

5.2.2.5

Conclusão

Para a barra 1 existe uma região de operação em que o índice de margem da curva QV é nulo, mas o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ não. Essa divergência de resultados nos índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ ocorre entre os Casos 17 ao 21 para a barra 1. A máxima carga só ocorre nos Casos 36 a 41.

Essa divergência nos resultados na barra 1 demonstra que em regiões de máximo carregamento a avaliação de estabilidade de tensão pode não ser conclusiva.

Nas demais barras analisadas (2, 4 e 5) não foi detectada essa divergência de resultados entre os índices.

Também é interessante notar que o FPC apresenta uma primeira carga máxima entre os Casos 36 a 41, após esse caso o carregamento nas barras 4 e 5 diminui até o Caso 86, quando a carga volta a aumentar até o segundo carregamento máximo no Caso 111.

As barras 2, 4 e 5 tem os índices M_{QV} e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ indicando que o sistema não opera na região usual a partir do Caso 41.

Porém, para a barra 1 os índices indicam operação fora da região usual desde o Caso 17, quando passam a apresentar resultados negativos.

5.3

Incongruência na Margem de Potência Reativa da Curva QV Obtida Através do Fluxo de Potência Continuado

O algoritmo do fluxo de potência continuado (FPC) inicia-se em um caso-base, e posteriormente aumenta-se o patamar de carga do sistema, obtendo-se um novo caso para execução do fluxo de potência. O procedimento é repetido diversas vezes, de tal forma que a simulação do FPC caminha para um ponto crítico denominado ponto de máximo carregamento [17].

O aumento de carga é definido por um determinado percentual de incremento e pode ser feito em uma ou mais barras. Para realização do FPC é utilizado o *software* ANAREDE [14].

E para todas tabelas dessa seção a Margem da Curva QV determina a distância em MW do ponto de máximo carregamento.

5.3.1

Comparação das Cargas Máximas da Curva QV

O sistema utilizado para simulação é o IEEE 14 barras definido na Seção 5.2. O FPC é configurado com um percentual de aumento de carga nas barras 4 e 5, e a barra 2 possui o papel de compensar o aumento de carga com sua geração, enquanto a barra 1 absorve as perdas de potência ativa.

Aqui o objetivo é avaliar a consistência e a robustez dos estudos de estabilidade de tensão utilizando a ferramenta do FPC. Para isso, na Tabela 5.11, apresenta-se uma comparação do ponto de carregamento máximo obtido para seis simulações do FPC com diferentes percentuais de aumento da carga do sistema.

Tabela 5.11: Comparação das Cargas Máximas da Curva QV

| Carga Máxima | | | | | | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Aumento de Carga (%) | 5,0 | 6,5 | 10,0 | 15,0 | 20,0 | 25,0 |
| Ativa (MW) | 360,83 | 360,82 | 462,22 | 462,68 | 462,43 | 462,17 |
| Reativa (Mvar) | -14,98 | -14,98 | -19,19 | -19,21 | -19,2 | -19,19 |

O resultado da Tabela 5.11 indica valores menores para o máximo carregamento do sistema quando o percentual de incremento da simulação de FPC é menor que 10%.

Nas Tabelas 5.12 e 5.13 são detalhados alguns casos de interesse da simulação de FPC para os percentuais de aumento de carga de 5% e 10%, respectivamente. Cada linha das tabelas corresponde a um caso com seu percentual de aumento de carga, e as cargas ativa e reativa correspondentes.

Nas Tabelas 5.12 e 5.13 é observado como a carga ativa e reativa aumentam em termos de valores absolutos e após atingir o caso de maior carregamento, o incremento de carga diminui até cessar. Na Tabela 5.12 a carga ativa máxima é de 360,83 MW (Caso 123). E na Tabela 5.13 a carga ativa máxima é de 462,22 MW (Caso 92).

Esse resultado demonstra que simulações com diferentes taxas percentuais de aumentos de carga levam a valores diferentes de carga máxima, o que vem a ser uma incongruência nesse estudo.

5.3.2

Comparação da Margem da Curva QV

Conforme definido na Seção 4.3, a margem da curva QV é um resultado importante da curva QV e avalia o nível de carregamento desse sistema.

Nas Tabelas 5.14, 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18 são apresentadas três simulações com o percentual de aumento de carga de 5%, 10% e 20% em cinco cenários (patamares de carga) diferentes. O estudo comparativo da margem da curva QV é composto pelas seguintes variáveis do caso simulado: carga ativa, o lado da curva QV, a margem da curva QV. Além disso, é informado a potência reativa injetada (Q injetada) no caso-base e a potência reativa no ponto de fronteira da curva QV (Q inflexão) para o caso simulado. Vale ressaltar que nas três simulações a carga ativa é idêntica.

A barra 1 é a escolhida para obter a curva QV, barra *swing*.

As cinco tabelas apresentadas são compostas pelo mesmo conjunto de informações, mas em cada tabela a carga ativa possui nível de carga diferente.

É verificado que a margem da curva QV na simulação com percentual de aumento de carga de 5% é diferente do apresentado nas simulações com percentual de aumento de carga de 10% e 20%. Isso ocorre mesmo com a carga ativa idêntica para todos os casos. Ou seja, para um mesmo sistema e mesma carga, a curva QV fornece diferentes valores para a margem da curva QV dependendo do percentual de incremento de carga empregado.

Por último, nota-se que a potência reativa injetada e a potência reativa no ponto de fronteira são diferentes para a simulação com aumento de carga de 5% e para as simulações com aumento de carga de 10% e 20%.

Essa diferença ocorre porque com 5% são necessários quatro aumentos de carga, enquanto com 10% são dois e com 20% um aumento é suficiente. Embora a carga ativa e reativa seja a mesma nos três casos, a potência reativa gerada pela barra 1 vai ficando diferente à medida que diferentes aumentos de carga são feitos e mais resoluções do problema de fluxo de carga são necessárias.

Tabela 5.12: Casos do FPC com percentual de aumento de carga de 5%

| Caso | Aumento de Carga (%) | Carga Reativa (Mvar) | Carga Ativa (MW) |
|------|----------------------|----------------------|------------------|
| 0 | 0,0 | -2,3 | 55,4 |
| 1 | 5,0 | -2,42 | 58,17 |
| 2 | 10,0 | -2,53 | 60,94 |
| 3 | 15,0 | -2,65 | 63,71 |
| 4 | 20,0 | -2,76 | 66,48 |
| 5 | 25,0 | -2,88 | 69,25 |
| 6 | 30,0 | -2,99 | 72,02 |
| 7 | 35,0 | -3,11 | 74,79 |
| 8 | 40,0 | -3,22 | 77,56 |
| 9 | 45,0 | -3,34 | 80,33 |
| 10 | 50,0 | -3,45 | 83,1 |
| 11 | 55,0 | -3,57 | 85,87 |
| 12 | 60,0 | -3,68 | 88,64 |
| 13 | 65,0 | -3,8 | 91,41 |
| 14 | 70,0 | -3,91 | 94,18 |
| 105 | 525,0 | -14,38 | 346,25 |
| 106 | 530,0 | -14,49 | 349,02 |
| 107 | 535,0 | -14,61 | 351,79 |
| 108 | 540,0 | -14,72 | 354,56 |
| 109 | 545,0 | -14,84 | 357,33 |
| 110 | 550,0 | -14,95 | 360,1 |
| 113 | 551,25 | -14,98 | 360,79 |
| 118 | 551,25 | -14,98 | 360,79 |
| 122 | 551,29 | -14,98 | 360,82 |
| 123 | 551,31 | -14,98 | 360,83 |
| 124 | 551,22 | -14,98 | 360,78 |
| 125 | 551,03 | -14,97 | 360,67 |
| 126 | 550,74 | -14,97 | 360,51 |
| 127 | 550,35 | -14,96 | 360,3 |
| 128 | 549,86 | -14,95 | 360,03 |
| 129 | 549,28 | -14,93 | 359,7 |
| 130 | 548,60 | -14,92 | 359,33 |
| 131 | 547,83 | -14,9 | 358,9 |
| 132 | 546,97 | -14,88 | 358,43 |
| 133 | 546,02 | -14,86 | 357,9 |
| 134 | 544,99 | -14,83 | 357,33 |
| 135 | 543,87 | -14,81 | 356,71 |
| 136 | 542,67 | -14,78 | 356,04 |
| 137 | 541,38 | -14,75 | 355,33 |
| 138 | 540,02 | -14,72 | 354,57 |

Tabela 5.13: Casos do FPC com percentual de aumento de carga de 10%

| Caso | Aumento de Carga (%) | Carga Reativa (Mvar) | Carga Ativa (MW) |
|------|----------------------|----------------------|------------------|
| 0 | 0 | -2,3 | 55,4 |
| 1 | 10 | -2,53 | 60,94 |
| 2 | 20 | -2,76 | 66,48 |
| 3 | 30 | -2,99 | 72,02 |
| 4 | 40 | -3,22 | 77,56 |
| 5 | 50 | -3,45 | 83,1 |
| 6 | 60 | -3,68 | 88,64 |
| 7 | 70 | -3,91 | 94,18 |
| 8 | 80 | -4,14 | 99,72 |
| 9 | 90 | -4,37 | 105,26 |
| 10 | 100 | -4,6 | 110,8 |
| 11 | 110 | -4,83 | 116,34 |
| 12 | 120 | -5,06 | 121,88 |
| 13 | 130 | -5,29 | 127,42 |
| 14 | 140 | -5,52 | 132,96 |
| 65 | 650 | -17,25 | 415,5 |
| 66 | 660 | -17,48 | 421,04 |
| 67 | 670 | -17,71 | 426,58 |
| 68 | 680 | -17,94 | 432,12 |
| 69 | 690 | -18,17 | 437,66 |
| 70 | 700 | -18,4 | 443,2 |
| 71 | 710 | -18,63 | 448,74 |
| 72 | 720 | -18,86 | 454,28 |
| 73 | 730 | -19,09 | 459,82 |
| 76 | 732,5 | -19,15 | 461,21 |
| 78 | 733,75 | -19,18 | 461,9 |
| 81 | 734,063 | -19,18 | 462,07 |
| 83 | 734,219 | -19,19 | 462,16 |
| 85 | 734,297 | -19,19 | 462,2 |
| 86 | 734,297 | -19,19 | 462,2 |
| 91 | 734,323 | -19,19 | 462,21 |
| 92 | 734,325 | -19,19 | 462,22 |
| 93 | 734,201 | -19,19 | 462,15 |
| 94 | 733,952 | -19,18 | 462,01 |
| 95 | 733,582 | -19,17 | 461,8 |
| 96 | 733,091 | -19,16 | 461,53 |
| 97 | 732,483 | -19,15 | 461,2 |
| 98 | 731,759 | -19,13 | 460,79 |
| 99 | 730,922 | -19,11 | 460,33 |
| 100 | 729,973 | -19,09 | 459,8 |

Tabela 5.14: Cenário 1 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20%

| Comparando curva QV | | | | | | |
|----------------------|------|------------------|---------------|----------|------------------|------------------|
| Aumento de Carga (%) | Caso | Carga Ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Qinjetada (Mvar) | Qinflexão (Mvar) |
| 5 | 4 | 66,48 | DIR | -26,6 | -18,1 | -44,7 |
| 10 | 2 | 66,48 | DIR | -35,1 | -13,3 | -48,36 |
| 20 | 1 | 66,48 | DIR | -35,1 | -13,3 | -48,36 |

Tabela 5.15: Cenário 2 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20%

| Comparando curva QV | | | | | | |
|----------------------|------|------------------|---------------|----------|------------------|------------------|
| Aumento de Carga (%) | Caso | Carga Ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Qinjetada (Mvar) | Qinflexão (Mvar) |
| 5 | 8 | 77,56 | DIR | -20,9 | -19,3 | -40,23 |
| 10 | 4 | 77,56 | DIR | -38,5 | -10 | -48,45 |
| 20 | 2 | 77,56 | DIR | -38,5 | -10 | -48,45 |

Tabela 5.16: Cenário 3 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20%

| Comparando curva QV | | | | | | |
|----------------------|------|------------------|---------------|----------|------------------|------------------|
| Aumento de Carga (%) | Caso | Carga Ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Qinjetada (Mvar) | Qinflexão (Mvar) |
| 5 | 16 | 99,72 | DIR | -14,4 | -17,3 | -31,7 |
| 10 | 8 | 99,72 | DIR | -44,5 | -3,1 | -47,57 |
| 20 | 4 | 99,72 | DIR | -44,5 | -3,1 | -47,57 |

Tabela 5.17: Cenário 4 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20%

| Comparando curva QV | | | | | | |
|----------------------|------|------------------|---------------|----------|------------------|------------------|
| Aumento de Carga (%) | Caso | Carga Ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Qinjetada (Mvar) | Qinflexão (Mvar) |
| 5 | 32 | 144,04 | DIR | -1,7 | -11,1 | -12,71 |
| 10 | 16 | 144,04 | DIR | -52,6 | 11,4 | -41,13 |
| 20 | 8 | 144,04 | DIR | -52,6 | 11,4 | -41,13 |

Tabela 5.18: Cenário 5 das simulação de FPC com aumento de carga de 5%, 10% e 20%

| Comparando curva QV | | | | | | |
|----------------------|------|------------------|---------------|----------|------------------|------------------|
| Aumento de Carga (%) | Caso | Carga Ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Qinjetada (Mvar) | Qinflexão (Mvar) |
| 5 | 64 | 232,68 | ESQ | -16,9 | 54,2 | 37,29 |
| 10 | 32 | 232,68 | DIR | -55,3 | 45,4 | -9,91 |
| 20 | 16 | 232,68 | DIR | -55,3 | 45,4 | -9,91 |

5.3.3

Margem da Curva QV para Diferentes Mecanismos de Aumento de Carga

O incremento de carga realizado no método de FPC pode ser realizado aplicando uma progressão aritmética ou geométrica à carga inicial do sistema estudado. A maneira que é escolhida para aumentar o patamar tem forte influência na rapidez com que o FPC atinge seu carregamento máximo.

Primeiramente, considera-se que o aumento de carga do FPC é realizado como uma progressão aritmética (PA), com um aumento de 10%. Se uma carga inicial de 10 MW é considerada para o caso-base (caso 0), tem-se para o caso 1 uma carga de 11 MW. Já para o caso 2, uma carga de 12 MW. E para o caso 3, uma carga de 13 MW e assim sucessivamente.

Por outro lado, considere-se o caso em que o aumento de carga do FPC é realizado como uma progressão geométrica (PG), com um aumento de 10%. Se uma carga inicial de 10 MW é considerada para o caso-base (caso 0), tem-se para o caso 1 uma carga de 11 MW. Para o caso 2, uma carga de 12,1 MW. E para o caso 3, uma carga de 13,31 MW e assim sucessivamente.

Em [15] é utilizado a versão 10.0.1 do ANAREDE, que implementa o aumento de carga do FPC com PG.

Com o objetivo de melhor compreender os resultados incongruentes para o FPC apresentados na SubSeção 5.3.2, comparam-se as margens de curva QV do FPC da versão 10.0.1 do ANAREDE com o FPC da versão 10.2.3 do ANAREDE. Na versão 10.2.3 o aumento de carga é feito através de PA.

Aqui novamente, assim como nos resultados da Seção 5.3.2, pretende-se analisar casos do FPC com a mesma carga ativa. E entre esses casos compara-se suas margens da curva QV, potências reativas injetadas e potências no ponto de fronteira da curva QV. Porém, nesse estudo tem-se um procedimento diferente para realizar o incremento de carga. Portanto, serão analisados dois casos com patamares de carga semelhantes, já que patamares idênticos é impossível.

Primeiramente foi estudado o FPC com percentual de aumento de carga de 5% para as duas versões do ANAREDE e os resultados podem ser vistos nas Tabelas 5.19, 5.20 e 5.21.

No Cenário 1, a margem da curva QV é aproximadamente a mesma para ambos os casos apresentados. No Cenário 2, com carga ativa maior, observa-se o mesmo comportamento. Já no Cenário 3, o que possui maior nível de carga dentre todos, os casos apresentam margem da curva QV diferente mesmo com níveis de carga ativa semelhante. Deve-se ressaltar que, quanto maior a carga, maior será o número de resoluções do fluxo de potência são executadas. Portanto, com o aumento de carga em PA é necessário executar maior número de resoluções de fluxo de potência do que com o aumento de carga em PG. Assim, as potências reativas geradas na barra 1 tornam-se, gradualmente, diferentes.

Tabela 5.19: Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 1 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 6 | 74,24 | DIR | -22,1 | -19,2 | -41,3 |
| 10.2.3 | 7 | 74,29 | DIR | -21,8 | -19,3 | -41,06 |

Tabela 5.20: Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 2 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 9 | 85,94 | DIR | -19,2 | -18,6 | -37,81 |
| 10.2.3 | 11 | 85,87 | DIR | -19,2 | -18,6 | -37,83 |

Tabela 5.21: Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 3 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 26 | 196,98 | DIR | 0 | -7,3 | -7,3 |
| 10.2.3 | 51 | 196,67 | ESQ | -5,4 | -21,2 | 15,74 |

No segundo estudo com o FPC, o percentual de aumento de carga é de 6,5% para as duas versões do ANAREDE. Os resultados podem ser vistos nas Tabelas 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25.

No Cenário 1, a margem da curva QV é aproximadamente a mesma para ambos os casos apresentados. No Cenário 2, com carga ativa maior, observa-se o mesmo comportamento. Já nos Cenários 3 e 4, o que possuem maior nível de carga, os casos apresentam margem da curva QV diferentes mesmo com níveis de carga ativa semelhante.

Nesse segundo estudo os Cenários comparativos apresentam potência reativas diferentes na barra 1 para os Cenários de maior carregamento (Cenários 3 e 4)

Tabela 5.22: Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 1 | | | | | | |
|--|--------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 7 | 80,61 | DIR | -20,5 | -19,1 | -39,58 |
| 10.2.3 | caso 6 | 80,64 | DIR | -20,5 | -19,1 | -39,58 |

Tabela 5.23: Cenário 2 das versões do ANARinEDE para aumento de carga do FPC com 6.5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 2 | | | | | | |
|--|---------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 10 | 91,41 | DIR | -17,7 | -18,1 | -35,84 |
| 10.2.3 | caso 8 | 91,69 | DIR | -19,2 | -18,7 | -37,89 |

Tabela 5.24: Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 3 | | | | | | |
|--|---------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 39 | 195,84 | ESQ | -4,9 | 20,5 | 15,54 |
| 10.2.3 | caso 20 | 195,21 | DIR | 0 | -10,5 | -10,46 |

Tabela 5.25: Cenário 4 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 6.5%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 4 | | | | | | |
|--|---------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 34 | 221,05 | ESQ | -10,6 | 42,7 | 32,12 |
| 10.2.3 | caso 20 | 221,41 | DIR | 0 | -1,8 | -1,8 |

Um terceiro estudo com o FPC com percentual de aumento de carga de 10% para as duas versões do ANAREDE e os resultados podem ser vistos nas Tabelas 5.26, 5.27, 5.28.

Nos Cenários 1, 2 e 3, as margens da curva QV são bem diferentes para as duas versões do programa.

Tabela 5.26: Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 1 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 14 | 210,38 | DIR | -5,5 | -3,2 | -8,68 |
| 10.2.3 | 28 | 210,52 | DIR | -56,4 | 35,8 | -20,63 |

Tabela 5.27: Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 2 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 16 | 254,56 | DIR | 0 | 10,4 | 10,4 |
| 10.2.3 | 36 | 254,84 | DIR | -52,6 | 55,4 | 2,75 |

Tabela 5.28: Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 10%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 3 | | | | | | |
|--|------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | 21 | 409,97 | ESQ | -68,6 | 189,7 | 121,14 |
| 10.2.3 | 64 | 409,96 | ESQ | -1 | 136,2 | 135,18 |

%endtable

No quarto e último estudo com o FPC o percentual de aumento é de 15% de carga para as duas versões do ANAREDE e os resultados podem ser vistos nas Tabelas 5.29, 5.30, 5.31.

Nos Cenários 1, 2 e 3, as margens da curva QV são bem diferentes para as duas versões do programa.

Tabela 5.29: Cenário 1 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 1 | | | | | | |
|--|--------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 4 | 96,89 | DIR | -27,9 | -13,5 | -41,36 |
| 10.2.3 | caso 5 | 96,95 | DIR | -43,9 | -4 | -47,88 |

Tabela 5.30: Cenário 2 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 2 | | | | | | |
|--|---------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 12 | 296,4 | ESQ | -5,9 | 38,3 | 32,41 |
| 10.2.3 | caso 29 | 296,39 | DIR | -42,9 | 74,9 | 32 |

Tabela 5.31: Cenário 3 das versões do ANAREDE para aumento de carga do FPC com 15%

| Comparando versões ANAREDE - Cenário 3 | | | | | | |
|--|---------|------------------|---------------|----------|-------------------|-------------------|
| versão | Caso | Carga ativa (MW) | Lado Curva QV | M_{QV} | Q injetada (Mvar) | Q inflexão (Mvar) |
| 10.0.1 | caso 15 | 421,39 | ESQ | -92,6 | 229,1 | 136,55 |
| 10.2.3 | caso 44 | 421,04 | ESQ | -15,4 | 156,1 | 140,71 |

Assim, versões diferentes do ANAREDE podem fornecer valores diferentes para a margem da curva QV. Ou seja, dependendo do uso da PG ou PA para aumento de carga, o índice de estabilidade de tensão extraída da curva QV pode mudar. Pode-se concluir que, quanto maior é o carregamento do sistema em estudo, maior é a diferença apresentada.

5.3.4 Conclusão

Os resultados da presente Seção demonstram que o FPC, ao efetuar o fluxo de potência diversas vezes e com alto carregamento, pode levar a resultados incoerentes nos índices de estabilidade da curva QV: lado da curva QV e a margem da curva QV.

5.4 Sumário do Capítulo

Os índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e M_{QV} indicam se o sistema opera no lado esquerdo ou direito da curva QV, ou seja, na região usual ou não usual de operação. Porém, ao obter o $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e M_{QV} durante o estudo com aumento de carga em múltiplas barras existe uma região operativa em que a margem M_{QV} fornece valores positivos e $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ fornece valores negativos.

Essa divergência nos resultados dos índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e M_{QV} permite concluir que existe uma região de operação, próxima a região de máximo carregamento, em que uma avaliação da estabilidade de tensão fornecer resultados incongruentes.

A possível discrepância nos resultados dos índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)''$ e M_{QV} foi apresentada na Seção 4.6. Ficando evidente que os dois índices possuem formas diferentes para serem calculados, portanto, poderiam apresentar resultados diferentes.

Logo após o estudo de incongruência no resultado dos índices, na Seção 5.3, é comparado os valores da margem M_{QV} calculada para duas versões distintas do ANAREDE. Essas versões apresentam diferentes mecanismos para realizar o aumento de carga: uma por PA e outra por PG.

Esse estudo comparativo da M_{QV} calculado para diferente versões do programa e diferentes patamares de carga, permite concluir que quando M_{QV} é obtida após efetuar-se o fluxo de potência diversas vezes no FPC, isso pode levar a valores incoerentes no lado da curva QV e na margem da curva QV.

6

Conclusões

O primeiro índice, a curva QV, é obtida executando-se o algoritmo de fluxo de potência diversas vezes. Portanto, a margem da curva QV representa uma variação de ΔV com ΔQ , onde ΔV e ΔQ são variações de magnitude finita.

O segundo índice estudado, $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$, é determinado em um ponto de operação específico, consistindo na variação infinitesimal das grandezas Q e V.

Conclui-se que, enquanto o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ avalia determinado ponto de operação, a margem da curva QV avalia um conjunto de pontos de operação.

As diferenças na maneira de se calcular e obter os dois índices são indicativos suficientes para se considerar a possível existência de divergências na interpretação dos resultados para esses dois índices.

A fim de verificar o comportamento dos índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV foi utilizado o sistema de testes IEEE 14 barras. O programa ANAREDE simulou o sistema teste com a ferramenta de Fluxo de Potência Continuado, obtendo-se pontos de operação próximos ao ponto crítico da curva QV, e na parte inferior dessa curva.

Pontos próximos da região de inflexão da curva QV são de grande interesse, pois permitem estudar o sistema perto do seu limite de estabilidade de tensão.

No primeiro estudo de aumento de carga realizado na Seção 5.2.1 são encontradas resultados não coerentes para os índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV. Há pontos de operação em que o índice de margem da curva QV é nulo, mas o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ não.

Um segundo estudo foi realizado com aumento de carga em duas barras (4 e 5), na Seção 5.2.2, sendo encontrados resultados não coerentes para os índices $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV. Novamente ocorrem pontos de operação em que o índice de margem da curva QV é nulo, mas o índice $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ não.

Percebeu-se que a proximidade do lado esquerdo da curva QV fornece resultados divergentes para os dois índices, esse fenômeno ocorre principalmente pela perda de controle de tensão nas demais barras do tipo

PV, e devido a problemas numéricos para cálculo do ponto de operação na região alta não linearidade.

O método do fluxo de potência continuado utilizado para obter regiões de operação no lado esquerdo da curva QV pode fornecer diferentes resultados para os pontos de máximo carregamento, quando o fluxo de potência é executado diversas vezes.

6.1

Trabalhos Futuros

Este trabalho mostrou a existência de resultados incongruentes ao aplicar os índices de estabilidade de tensão $\left(\frac{\partial Q}{\partial V}\right)$ e margem da curva QV para avaliação da estabilidade de tensão de sistemas elétricos. Os resultados incongruentes vêm ocorrendo quando o SEE opera próximos da região de alta não linearidade e alto carregamento.

O uso do fluxo de potência continuado para obter pontos de operação em regiões do lado esquerdo da curva QV resultaram em indagações no decorrer desse trabalho e devem ser fruto de um novo estudo para investigar detalhadamente a técnica para simulação do aumento de carga no sistema.

Recomenda-se, também, o emprego do mesmo estudo em sistemas elétricos de grande porte.

Referências bibliográficas

- [1] PRADA, R. B.; PALOMINO, E. G. C.; DOS SANTOS, J. O. R.; BIANCO, A. ; PILOTTO, L. A. S.. **Voltage stability assessment for real-time operation.** Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings, 149:175 – 181, 04 2002.
- [2] KUNDUR, P.. **Power system stability and control.** McGraw-Hill Professional Publishing, 1994.
- [3] ZAMBRONI DE SOUZA, A.; W. MOHN, F.; F. BORGES, I. ; OCARIZ, T.. **Using pv and qv curves with the meaning of static contingency screening and planning.** Lancet, 81:1491–1498, 07 2011.
- [4] ELGERD, O. I.. **Electric energy systems theory: an introduction.** McGraw-Hill Book Company, New York, NY, New York, 1982.
- [5] VIEIRA FILHO, X.. **Operação de sistema de potência com controle automático de geração.** Campus, 1984.
- [6] MONTICELLI, A. J.. **Fluxo de carga em redes de energia elétrica.** Editora Blucher, São Paulo, 1983.
- [7] BORGES, C. L. T.. **Apostila do curso de análise de sistemas de potência.** Departamento de Engenharia Elétrica - UFRJ, 2005.
- [8] PRADA, R. B.. **Notas da disciplina de estabilidade de tensão do mestrado da puc - rio.** Departamento de Engenharia Elétrica - PUC RIO, 2017.
- [9] CHOWDHURY, B. H.; TAYLOR, C. W.. **Voltage stability analysis: Vq power flow simulation versus dynamic simulation.** IEEE Transactions on Power Systems, 15(4):1354–1359, 2000.
- [10] GAO, B.; MORISON, G. ; KUNDUR, P.. **Voltage stability evaluation using modal analysis.** IEEE Transactions on Power Systems, 7(4):1529–1542, 1992.
- [11] POWERWORLD CORPORATION. **Steady-state power system security analysis with powerworld simulator, s7: Voltage**

- stability using qv curves. <https://www.powerworld.com/files/S07QVCurves.pdf>, 2008. [Online; Acesso em 10 Jun. 2019].
- [12] TAYLOR, C. W.. **Power system voltage stability**. McGraw-hill, 1994.
- [13] VAN CUTSEM, T.; VOURNAS, C.. **Voltage stability of electric power systems**. Springer Science & Business Media, 2007.
- [14] CEPEL. **Programa de Análise de Redes–ANAREDE V10-02-03-Manual do Usuário**. Relatório Técnico CEPEL, No. DP-DSE, 2017.
- [15] PRADA, R. B.; SANTOS, J. O. D. ; POMA, C. E. P.. **Avaliação das condições de estabilidade de tensão na supervisão e controle de sistemas elétricos em tempo real**. Departamento de Engenharia Elétrica - PUC RIO e Cepel, 2012.
- [16] UNIVERSITY OF WASHINGTON. **Power system test case archive. iee 14 bus**. https://labs.ece.uw.edu/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm. [Online; Acesso em 17 Jun. 2019].
- [17] AJJARAPU, V.; CHRISTY, C.. **The continuation power flow: a tool for steady state voltage stability analysis**. IEEE Transactions on Power Systems, 7(1):416–423, 1992.

A

Dados de Sistema IEEE 14 Barras

Nesse apêndice são apresentados os dados utilizados como referência para as simulações no Matlab e no ANAREDE para estudos do sistema IEEE 14 Barras. Os dados de rede são encontrados em [54] e seu diagrama unifilar do sistema é ilustrado na Figura A.1.

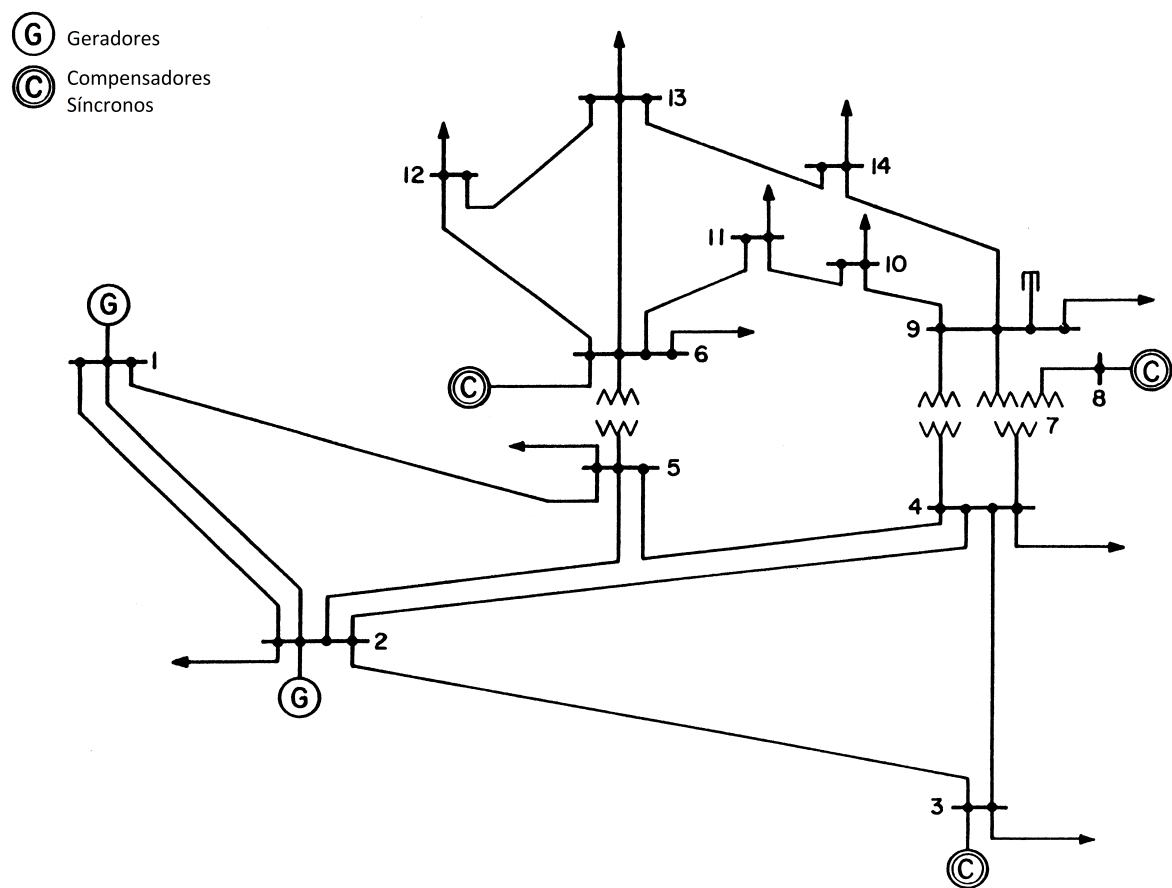


Figura A.1: Diagrama Unifilar do Sistema IEEE 14 Barras[16]

Os dados da rede também podem ser visualizados no formato de entrada para o ANAREDE no Arquivo A.

Arquivo A.1: Dados de configuração Anarede do Sistema IEEE 14 Barras [15]

TITU

IEEE 14 Bus Test Case - Winter 1962

DOPC IMPR

(Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E (Op) E

VLIM L CREM L CTAP L QLIM L NEWT L RCVG L FILE L 80CO L RBAR L BPSI L

IMPR L

99999

DBAR

| (Num) | OETGb | (nome) | G1 | (V) | (A) | (Pg) | (Qg) | (Qn) | (Qm) | (Bc) | (P1) | (Q1) | (Sh) | Are(Vf) |
|-------|-------|--------------|------|---------|--------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 2 | Barra-01--HV | 1060 | 0.0232 | 3-16.6 | -9999999999 | | | | 1 | | | | 11000 |
| 2 | 1 | Barra-02--HV | 1045 | -5. 40. | 43.37 | -40. 50. | | | | 2 | 21.7 | 12.7 | | 11000 |
| 3 | 1 | Barra-03--HV | 1010 | -13. 0. | 25.03 | 0. 40. | | | | 3 | 94.2 | 19. | | 11000 |
| 4 | 0 | Barra-04--HV | 1019 | -10. | | | | | | | 47.8 | -3.9 | | 11000 |
| 5 | 0 | Barra-05--HV | 1020 | -8.8 | | | | | | | 7.6 | 1.6 | | 11000 |
| 6 | 1 | Barra-06--LV | 1070 | -14. 0. | 12.65 | -6. 24. | | | | 6 | 11.2 | 7.5 | | 11000 |
| 7 | 0 | Barra-07--ZV | 1062 | -13. | | | | | | | | | | 11000 |
| 8 | 1 | Barra-08--TV | 1090 | -13. 0. | 17.58 | -6. 24. | | | | 8 | | | | 11000 |
| 9 | 0 | Barra-09--LV | 1056 | -15. | | | | | | | 29.5 | 16.6 | 19. | 11000 |
| 10 | 0 | Barra-10--LV | 1051 | -15. | | | | | | | 9. | 5.8 | | 11000 |
| 11 | 0 | Barra-11--LV | 1057 | -14. | | | | | | | 3.5 | 1.8 | | 11000 |
| 12 | 0 | Barra-12--LV | 1055 | -15. | | | | | | | 6.1 | 1.6 | | 11000 |
| 13 | 0 | Barra-13--LV | 1050 | -15. | | | | | | | 13.5 | 5.8 | | 11000 |
| 14 | 0 | Barra-14--LV | 1036 | -16. | | | | | | | 14.9 | 5. | | 11000 |

99999

DLIN

| (De) | d 0 | d(Pa) | NcEP | (R%) | (X%) | (Mvar) | (Tap) | (Tmn) | (Tmx) | (Phs) | (Bc) | (Cn) | (Ce) | Ns |
|-------|-----|--------|------|----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|----|
| 1 | | 2 | 1 | 1.938 | 5.917 | 5.28 | | | | | | | | |
| 1 | | 5 | 1 | 5.40322 | 3.04 | 4.92 | | | | | | | | |
| 2 | | 3 | 1 | 4.69919 | 7.97 | 4.38 | | | | | | | | |
| 2 | | 4 | 1 | 5.81117 | 6.32 | 3.40 | | | | | | | | |
| 2 | | 5 | 1 | 5.69517 | 3.88 | 3.46 | | | | | | | | |
| 3 | | 4 | 1 | 6.70117 | 1.03 | 1.28 | | | | | | | | |
| 4 | | 5 | 1 | 1.335 | 4.211 | | | | | | | | | |
| 4 | | 7 | 1 | 0.00020 | 9.12 | 0.978 | | | | | | | | |
| 4 | | 9 | 1 | 0.00055 | 6.18 | 0.969 | | | | | | | | |
| 5 | | 6 | 1 | 0.00025 | 2.02 | 0.932 | | | | | | | | |
| 6 | | 11 | 1 | 9.49819 | 8.90 | | | | | | | | | |
| 6 | | 12 | 1 | 12.29125 | 5.81 | | | | | | | | | |
| 6 | | 13 | 1 | 6.61513 | 0.27 | | | | | | | | | |
| 7 | | 8 | 1 | 0.00017 | 6.15 | | | | | | | | | |
| 7 | | 9 | 1 | 0.00011 | 0.01 | | | | | | | | | |
| 9 | | 10 | 1 | 3.181 | 8.450 | | | | | | | | | |
| 9 | | 14 | 1 | 12.71127 | 0.38 | | | | | | | | | |
| 10 | | 11 | 1 | 8.20519 | 2.07 | | | | | | | | | |
| 12 | | 13 | 1 | 22.09219 | 9.88 | | | | | | | | | |
| 13 | | 14 | 1 | 17.09334 | 8.02 | | | | | | | | | |

99999

FIM