

Nastasha Salame da Silva

Estimação de Estados Generalizada e Análise de
Observabilidade Numérica via Método de Givens

Curitiba

2010

Nastasha Salame da Silva

Estimação de Estados Generalizada e Análise de Observabilidade Numérica via Método de Givens

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof^a Dr^a Elizete Maria Lourenço

Co-orientador: Prof^o Dr. Antonio J. A. Simões Costa

Curitiba

Fevereiro de 2010

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças e me guiar durante toda esta jornada. À minha mãe por sempre ter acreditado na minha capacidade. À minha família, por seu amor, apoio e encorajamento, pela imensa compreensão durante os períodos de ausência e de dedicação à escrita deste documento. Vocês são a minha alegria e meu porto seguro! Ao David pelo carinho, incentivo e companhia.

À minha professora e orientadora Elizete Maria Lourenço pelo carinho, compreensão, dedicação e ajuda para concluir esta etapa. Ao professor Antonio Simões Costa pela imensa paciência, dedicação e sugestões para fazer deste um documento muito melhor. Aos professores Thelma Solange Piazza Fernandes, Jean Viane Leite e Ariovaldo Verandio Garcia pelas sugestões e contribuições feitas em relação a este trabalho.

Enfim, agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para que eu chegasse até aqui.

Resumo

A desregulamentação da indústria energética aumentou a necessidade da automatização dos procedimentos relacionados à análise de operação do sistema de potência. Para tanto, é necessário estabelecer uma base de dados confiável que permita ao operador conhecer as condições de operação da rede, para que seja possível a execução confiável da análise da modelagem de operação do sistema elétrico.

Trabalhos foram desenvolvidos no nível de seção de barras, impulsionando a extensão de métodos tradicionais para a abordagem generalizada da rede. Considerando a importância do fluxo de potência para estudos conectados a estimação de estados generalizada e para algoritmos de chaveamento, o presente trabalho demonstra a viabilidade da utilização do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido para solucionar o problema estendido de fluxo de potência, permitindo a consolidação do método de representação de ramos chaveáveis em estudos de fluxo de potência.

Um sistema só é observável se possuir um conjunto de medidas adequadamente distribuídos na rede. Este trabalho aborda o problema de análise de observabilidade da rede, apresentando uma nova metodologia de análise de observabilidade puramente numérica via método de Givens com três multiplicadores, capaz de identificar a observabilidade ou não de uma rede, e detecção de ilhas observáveis. Os testes realizados para sistemas modelados no nível barra-ramo demonstram a validade do método ortogonal proposto para análise de observabilidade numérica, apresentando

uma incursão à observabilidade numérica no nível de seção de barra.

Palavras-chave: Modelagem no Nível de Seção de Barra, Fluxo de Potência, Método de Givens, Observabilidade Numérica.

Abstract

Energy industry deregulation has increased the needed for automation of power system operation analysis procedures. For this it is necessary to establish a reliable database that allows the operator to know the operational conditions of the network, allowing the implementation of reliable power system operation analysis.

Papers were developed at the section bus, driving the extension of traditional methods for the generalized approach of the network. Considering the importance of power flow studies connected to generalized state estimation algorithms and switching, this study demonstrated the feasibility of using the Newton-Raphson Fast Decoupled method to solve the extended power flow problem, allowing the consolidation of representations of switchable branches in studies of power flow.

A system is only observable if a set of measures appropriately distributed in the network is known. This paper addresses the problem of analyzing the observability of the network, presenting a new methodology for analysis of observability via purely numerical methods Givens with three multipliers, able to identify the observability or otherwise of a network, and detection of observable islands. The tests for systems modeled on industry-standard busses shows the validity of the method proposed for orthogonal analysis of numerical observability, with a foray into numerical observability-level of the section bus.

Keywords: Modeling at Bus Section Level, Power Flow, Givens Method, Numerical Observability,

SUMÁRIO

Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Siglas	xiv
1 Introdução	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão Bibliográfica	5
1.2.1 Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barra	5
1.2.2 Estimação de Estados Generalizada e Métodos Ortogonais	6
1.2.3 Observabilidade Numérica	8
1.3 Contribuições do Trabalho	10
1.4 Estrutura da Dissertação	12
2 Fluxo de Potência para Redes Modeladas no nível de Seção de Barra	13
2.1 Introdução	13
2.2 Modelagem da Rede	14

2.3	Fluxo de Potência Estendido via Método de Newton-Raphson	15
2.4	Solução via Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido	20
2.5	Conclusões	22
3	Estimação de Estados Convencional e Generalizada	23
3.1	Introdução	23
3.2	Estimação de Estados via Métodos Não-Ortogonais	24
3.3	Método sequencial-ortogonal via rotações de Givens	28
3.4	Estimação de Estados Generalizada	31
3.5	Conclusões	36
4	Análise de Observabilidade de Redes via Rotações de Givens com Três Multiplicadores	38
4.1	Introdução	38
4.2	Teoria da Observabilidade Numérica	39
4.2.1	Análise de Observabilidade Numérica em Termos da Matriz Ganho	40
4.2.2	Identificação de Ilhas Observáveis	42
4.2.3	Alocação de pseudo-medidas	43
4.2.4	Algoritmo Proposto por Monticelli e Wu [1,2]	44
4.3	Análise de Observabilidade Usando Rotações de Givens com 3 Multi- plicadores	45
4.3.1	Algoritmo Proposto	46
4.3.2	Exemplo	47
4.4	Análise de Observabilidade Generalizada via Givens com 3 Multipli- cadores	50
4.5	Conclusões	55
5	Resultados	57
5.1	Introdução	57

5.2	Fluxo de Potência para Redes Modeladas no Nível de Seção de Barra via Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido	58
5.2.1	Sistema IEEE 24 Barras	58
5.2.2	Sistema Teste IEEE 30 Barras	62
5.3	Observabilidade Numérica Convencional via Método de Givens	66
5.3.1	Sistema Teste de 4 barras e 5 ramos	67
5.3.2	Sistema IEEE 14 Barras	69
5.3.3	Sistema Teste IEEE 30 Barras	74
5.4	Observabilidade Numérica Generalizada via Método de Givens	75
5.5	Conclusões	80
6	Conclusões Gerais	82
6.1	Fluxo de Potência Desacoplado Rápido no Nível de Seção de Barra .	83
6.2	Observabilidade Numérica via Givens	83
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

Lista de Figuras

2.1	Chaves/disjuntores conectando uma barra a uma linha.	15
2.2	Sistema teste com 5 nós	21
2.3	Estrutura da matriz B'_{ext} cor-respondente	21
3.1	Representação da triangularização de U através de rotações de Givens	30
4.1	Triangularização da matriz ganho de um sistema não observável . . .	42
4.2	Representação da matriz H reordenada de acordo com as medidas de fluxo e de injeção de potência nas diferentes ilhas	43
4.3	Fluxograma do algoritmo proposto	48
4.4	Modelagem barra-ramo	49
4.5	Modelagem generalizada simplificada do sistema apresentado na Fig. 2.2	51
5.1	Sistema IEEE 24 Barras	59
5.2	Modelagem das Subestações 14 e 16 do Sistema IEEE 24 Barras - Caso A	59
5.3	Fluxos de Potência através dos Disjuntores da Subestação 16 do Sis- tema IEEE 24 Barras - Caso A	61
5.4	Modelagem das Subestações 14 e 16 do Sistema IEEE 24 Barras - Caso B	62
5.5	Modelagem das Subestações 12 e 15 do Sistema IEEE 30 Barras . . .	64
5.6	Sistema Teste de 4 barras e 5 ramos	67

5.7	Sistema IEEE 14 Barras	69
5.8	Sistema IEEE 30 Barras	75
5.9	Modelagem generalizada simplificada do sistema apresentado na Fig. 2.2	76

Lista de Tabelas

4.1	Parâmetros e medidas do sistema da Figura 4.4	49
5.1	Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso A	60
5.2	Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso A	61
5.3	Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso B	63
5.4	Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso B	64
5.5	Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 30 Barras	65
5.6	Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 30 Barras	66
5.7	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A	67
5.8	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A	68
5.9	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B	68
5.10	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B	68
5.11	Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso A	70
5.12	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A	70
5.13	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B	71
5.14	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B	71
5.15	Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso C	72
5.16	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso C	73
5.17	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso C	73

5.18	Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso D	73
5.19	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso D	74
5.20	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso D	74
5.21	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema IEEE 30 Barras . . .	76
5.22	Plano de Medição para o Sistema IEEE 30 Barras	77
5.23	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema IEEE 30 barras	78
5.24	Plano de Medição para o Sistema Teste da Figura 5.9	78
5.25	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A1	79
5.26	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A1	79
5.27	Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A2	79
5.28	Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A2	80

Lista de Siglas

EESP: Estimação de Estados em Sistemas de Potência

EEG: Estimação de Estados Generalizada

MO: Métodos Ortogonais

MQP: Mínimos Quadrados Ponderados

IO: Ilhas Observáveis

MIF: Medidas de Injeção de Fronteira

MI: Medidas Irrelevantes

Introdução

1.1 Introdução

A desregulamentação da indústria energética aumentou a necessidade da automatização dos procedimentos relacionados à análise de operação do sistema de potência. Para tanto, é necessário estabelecer uma base de dados confiável que permita ao operador conhecer as condições de operação da rede, para que seja possível a execução confiável da análise da modelagem de operação do sistema elétrico.

A estimação de estados em sistemas de potência (EESP) é uma ferramenta fundamental para análise da modelagem e operação do sistema em tempo real, sendo utilizada para análise de segurança. Tradicionalmente, a EESP utiliza a modelagem barra-ramo da rede, onde os arranjos das subestações são previamente identificados e um conjunto de nós/seções de barra eletricamente conectados através de chaves seccionadoras e disjuntores fechados são definidos como uma *barra* do sistema. Este procedimento evita a representação explícita de dispositivos chaveáveis e os consequentes problemas numéricos advindos da utilização de valores significativamente pequenos e grandes de impedâncias para representar os *status* dos mesmos. Além disso, as matrizes de rede básicas empregadas em estudos de regime permanente,

podem ser diretamente contruídas a partir deste modelo.

No entanto, o uso da modelagem barra-ramo nos estudos de estimação de estados impede a representação dos arranjos das subestações e informações relacionadas a dispositivos internos das mesmas, como medida de fluxo de potência através de disjuntores, são perdidas.

Em vista dessas dificuldades, Monticelli e Garcia [3,4] propuseram uma modelagem exata para representar chaves e disjuntores na EESP. Nessa abordagem, os fluxos através dos ramos chaveáveis são incluídos como novas variáveis de estado, juntamente com as tensões complexas em todas as barras do sistema. Adicionalmente, informações operacionais relativas aos status dos dispositivos são incluídas ao problema de forma similar às barras de injeção nula, ou seja, como restrições de igualdade ou pseudomedida. Com isso, deve-se acrescentar novos nós ao sistema para a inclusão dos ramos chaveáveis, aumentando assim a dimensão da rede modelada.

Essa nova abordagem deu origem à Estimação de Estados Generalizada (EEG) [5], que permite que subestações selecionadas da rede sejam representadas no nível de seção de barras, onde chaves e disjuntores são explicitamente representados. Este trabalho foi muito importante para a continuidade dos estudos em estimação de estados, em especial para o processamento de erros de topologia, uma vez que possibilita a modelagem integral da rede, utilizando artifícios já existentes no problema de estimação.

A partir dos esforços apresentados em [3,5], novos trabalhos foram desenvolvidos no nível de seção de barras, impulsionando a extensão de métodos tradicionais para a abordagem generalizada da rede [6–9] e subsidiando uma série de novos algoritmos de identificação de erros de topologia [7,10–12].

Mais recentemente, a modelagem no nível de seção de barra foi estendida para estudos de fluxo de potência [13–15], possibilitando a representação de chaves e disjuntores, ou ramos chaveáveis, na formulação do problema.

O problema de fluxo de potência estendido foi abordado inicialmente considerando a solução via método de Newton-Raphson [13–15]. Considerando a im-

portância da ferramenta para estudos conectados a EEG e para algoritmos de chaveamento [15] o presente trabalho demonstra a viabilidade da utilização do método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido para solucionar o problema estendido de fluxo de potência, permitindo a consolidação do método de representação de ramos chaveáveis em estudos de fluxo de potência.

Retornando ao tópico referente à estimação de estados, para garantir que os estados do sistema possam ser estimados é necessário haver um conjunto redundante e bem distribuído de medidas. Os estudos para garantir que as medidas disponíveis ao estimador possibilitam a estimação de estados são referidos como análise de observabilidade. Um sistema só é observável se possuir um conjunto de medidas adequadamente distribuídos na rede, com os quais é possível realizar a EESP.

Os sistemas elétricos de potência operam em sua maioria em condições observáveis de operação. Estudos sobre a análise de observabilidade de uma rede focam na importância desta ferramenta para condições críticas de operação, falhas nos medidores e equipamentos, nas quais o sistema perde sua observabilidade, tornando inviável a estimação de estados. Ramos observáveis são aqueles nos quais existe ao menos uma medida de fluxo de potência e/ou injeção de potência nas extremidades da linha.

Historicamente, existem duas vertentes para análise de observabilidade: a vertente topológica e a numérica. A vertente topológica foi a que primeiro apresentou resultados consistentes e operacionais. Em 1975, Clements e Wollenberg [16] introduziram conceitos teóricos importantes e propuseram o primeiro algoritmo, de base heurística, capaz de resolver o problema.

Posteriormente, Allemong et al. [17] apontaram que o algoritmo proposto em [16] poderia apresentar resultados conservadores e sugeriram um novo algoritmo, ainda de base heurística, na tentativa de corrigir o problema. O primeiro método topológico de base teórica realmente sólida surgiu em 1980, quando Krumpholz, Clements e Davis [18] apresentaram um arcabouço teórico consistente para o problema, introduziram o conceito de árvore geradora observável, e propuseram a a-

plicação de um algoritmo de fluxo em redes para a busca de árvores com estas características para determinar a observabilidade topológica de uma rede elétrica.

Um algoritmo alternativo para análise da observabilidade topológica, porém baseado na teoria de interseção de matróides e apresentando melhor desempenho computacional foi proposto por Quintana, Simões Costa e Mandel [19, 20], sendo posteriormente estendido para tratar o problema de medidas e conjuntos críticos [21]. Em [22], Van Cutsem e Gailly mostraram extensões de algoritmos de observabilidade topológica visando o tratamento de medidas de magnitude de tensão.

O primeiro algoritmo para análise de observabilidade numérica com fundamentos teóricos sólidos foi apresentado em [1, 2]. Posteriormente, os mesmos autores estenderam a sua metodologia aplicando métodos ortogonais [23]. Neste particular, entretanto, Monticelli e Wu não exploraram todas as propriedades das rotações de Givens, já que utilizaram estas rotações basicamente para a fatoração da matriz ganho, em substituição à eliminação de Gauss.

Mais recentemente, os métodos numéricos de observabilidade voltaram a ser abordados pela literatura [24–27] ou de forma híbrida [28, 29], demonstrando que este é um tópico relevante e que apresenta possibilidades de aprimoramento.

Os métodos de análise de observabilidade topológica propostos em [19–21] foram estendidos para o contexto da EEG [7, 30], onde a rede é representada no nível de seção de barra.

Este trabalho aborda o problema de análise de observabilidade da rede, propondo o desenvolvimento de uma nova metodologia de análise de observabilidade puramente numérica via método de Givens com três multiplicadores, capaz de identificar a observabilidade ou não de uma rede, e detecção de ilhas observáveis. A metodologia proposta considera inicialmente a modelagem barra-ramo da rede, apresentando também estudos iniciais a respeito da extensão da ferramenta proposta para a análise de observabilidade generalizada. Testes e simulações apresentados na literatura com os sistemas-teste de 14 e 30 barras do IEEE são reproduzidos para validar o algoritmo proposto.

1.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica mais detalhada sobre os aspectos estudados em sistemas elétricos de potência que motivaram o desenvolvimento desta dissertação. Referências bibliográficas relevantes envolvendo a representação da rede no nível de seção de barras, a estimação de estados generalizada e, por fim, a análise da observabilidade do sistema para estudos de estimação de estados são brevemente discutidos.

1.2.1 Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barra

A modelagem no nível de seção de barras foi abordada no início da década de 90 por Monticelli e Garcia [3, 31]. Nela, a modelagem de ramos de impedância nula é analisada para a solução de problemas de estimação de estados, tornando possível a representação explícita destes dispositivos no modelo da rede, através do uso de restrições operacionais do sistema.

Depois da estimação de estados generalizada, a formulação estendida do problema de fluxo de potência foi abordada em 2005 por Ribeiro [13, 14]. Esses trabalhos propuseram a análise no nível de seção de barras na modelagem da rede elétrica para estudos de fluxo de potência, utilizando como base o Método de Newton-Raphson, sendo adaptada às novas condições do modelo, ou seja, aplicando as restrições operacionais impostas pela presença de ramos de impedância nula ao sistema. Esta modelagem evitou os problemas numéricos causados pela inclusão de ramos chaveáveis no sistema, modificando a solução do fluxo de potência via Método de Newton-Raphson. A ferramenta proposta resolveu o problema de fluxo de potência incluindo a representação detalhada de determinadas subestações (escolhidas pelo operador), sem que seja necessário a aplicação de etapas adicionais de pós processamento como acontece quando se aplica a formulação convencional do Fluxo de Potência.

Os resultados obtidos em [13, 14] motivaram a continuidade dos estudos quanto a aplicação da modelagem de redes no nível de subestações em outras ferramentas de análise em regime permanente [15, 32–34]. Em [32, 33], a modelagem

no nível de seção de barras foi utilizada para estudos de fluxo de potência ótimo, no qual os status dos dispositivos chaveáveis são tratados como novas variáveis de estados além de sua modelagem ser incluída no conjunto de restrições de igualdade.

Em 2009, mais duas extensões sobre a modelagem no nível de seção de barra foram apresentadas [15, 34]. Lourenço, Simões Costa e Ribeiro [15] abordaram a viabilidade da modelagem para estudos de estimação de estados generalizada de forma a provar a validade da ferramenta para estudos de fluxo de potência. A abordagem proposta gerou uma ferramenta eficiente para a determinação direta da distribuição do fluxo de potência em uma determinada subestação da rede, utilizando uma extensão da solução via Método de Newton-Raphson. A metodologia proposta abordou ainda o tratamento de configurações particulares da rede, envolvendo laços formados por disjuntores fechados.

Lourenço, Silva e Simões Costa [34] desenvolveram uma ferramenta que é uma continuação dos estudos anteriores, propondo uma abordagem via Método Desacoplado Rápido para a modelagem generalizada do sistema. Sendo assim, o vetor de estados foi expandido de forma a incluir as novas variáveis de estado provenientes da modelagem dos ramos chaveáveis, e informações relativas aos status dos dispositivos foram colocadas como novas equações lineares a serem resolvidas junto com as equações convencionais de fluxo de potência.

1.2.2 Estimação de Estados Generalizada e Métodos Ortogonais

A abordagem adotada nesse trabalho baseia-se em esforços prévios apresentados na literatura relacionados a representação de dispositivos chaveáveis na estimação de estados de sistemas elétricos de potência (EESP) [3, 31], que deu origem ao conceito de Estimação de Estados Generalizada (EEG) [5], já bem difundido na literatura.

Em [6], Monticelli tratou da EESP de modo amplo, abordando a estimação convencional e generalizada. Nele a estimação foi abordada em todos seus aspectos,

trabalhando com estimador baseado no método MQP. As variáveis de estado foram apresentadas, levando à formulação matemática do problema, com suas restrições representadas por equações e inequações. Com isso, o autor abordou as diferentes metodologias para solução do problema, entre elas o uso de métodos ortogonais, que serão usados neste trabalho. Aspectos relacionados à observabilidade do sistema também foram abordados.

Seguindo a linha da maior parte dos artigos estudados durante o desenvolvimento deste trabalho, a referência [8] apresentou um algoritmo robusto para estimação de estados generalizada, fazendo uso de variáveis de decisão binárias. A rede apresentada como exemplo neste artigo será usada para a modelagem e testes de validação para o algoritmos propostos nesta dissertação.

O uso de métodos ortogonais (MO) para estudos de EESP é motivado principalmente pela robustez numérica que estes apresentam [35]. Monticelli e Wu [23] apresentaram um estudo sobre a análise de observabilidade baseado no uso de MO para estimação de estados híbrida (combinação das características de esparsidade apresentadas pela equação normal e a robustez numérica apresentada pelos MO). Como em problemas de EESP, a matriz de observação armazena em cada linha as informações referentes a cada uma das medidas, o uso de MO se torna atraente, por operar com linhas ao invés de trabalhar com colunas. Em [36], Simões Costa e Salgado descreveram detalhadamente os MO, focando nas rotações de Givens.

A aplicação dos MO a estudos de EEG foi proposta em [11], onde foram apresentadas as vantagens de se usar um estimador ortogonal baseado nas rotações de Givens, uma vez que este opera por linhas e não por variantes que operam por colunas. Este método foi aplicado à matriz de observação, pois ela contém informações de cada medida ou restrição de igualdade com respeito às variáveis de estado. Outro ponto relevante, foi o uso das rotações de Givens sem raízes quadradas, que reduz o esforço computacional para estimação de estados.

1.2.3 Observabilidade Numérica

A formulação do problema de observabilidade numérica de redes elétricas e a proposição de algoritmos de análise numérica de observabilidade com resultados consistentes foram inicialmente abordados por Monticelli e Wu [1,2]. Em [1] é apresentada a teoria sobre observabilidade da rede, desde os conceitos básicos relacionados a ramos não-observáveis e ilhas observáveis. Também são apresentadas maneiras simples e eficientes para se desenvolver em algoritmos de análise de observabilidade da rede, identificação de ilhas observáveis e adição de pseudo-medidas para garantir a observabilidade. Já em [2] são apresentados dois algoritmos, um para análise de observabilidade da rede e outro para identificação de ilhas observáveis quando o sistema é não observável, ambos baseados na triangularização da matriz ganho.

Devido a problemas de condicionamento numérico apresentados por vezes pela matriz ganho, Monticelli e Wu [23] desenvolvem uma metodologia baseada no uso de métodos ortogonais para análise de observabilidade numérica da rede. Para tal, utiliza uma abordagem híbrida, onde combinam-se a esparsidade apresentada pelo Método da Equação Normal de Gauss e a robustez numérica das transformações ortogonais. Com isso, pode-se resolver as equações normais através das transformações ortogonais da matriz Jacobiana e também realizar a análise de observabilidade do sistema.

Em seu livro [37], Monticelli apresenta detalhadamente a análise da observabilidade, abordando esta questão tanto do ponto de vista topológico quanto numérico. O algoritmo desenvolvido para a observabilidade numérica é baseado na fatoração triangular da matriz ganho e identificação de pivôs nulos durante tal fatoração. De acordo com o método, a existência de um único pivô nulo indica que o sistema é observável. Em caso contrário, tais pivôs são substituídos por pseudo-medidas de ângulo para a determinação das ilhas não-observáveis.

Gou e Abur [24] apresentam um método algébrico direto com uso de triangulação da matriz ganho para a determinação das ilhas observáveis do sistema de potência. Ele é baseado em um algoritmo não-iterativo cuja dificuldade se encontra

na fatoração triangular esparsa e procedimentos de substituição "direta/inversa". A metodologia é estendida para determinar pseudo-medidas capazes de tornar o sistema observável.

Dando continuidade ao artigo citado acima, Gou e Abur [25] desenvolvem uma ferramenta mais rápida para trabalhar com sistemas ditos não-observáveis. Para tal, utiliza-se um teste para matriz cuja dimensão é determinada pela deficiência da matriz ganho, dada por D oriunda da transformação $G = LDL^t$. Com isso, é criada uma matriz teste para identificar as ilhas observáveis. Em seguida é criada uma *lista de candidatas*, que são pseudo-medidas geradas pelo posto de D , onde as medidas de injeção que conectam duas diferentes ilhas observáveis são alocadas ao sistema de forma a tornar a matriz ganho com posto completo. O algoritmo proposto pelos autores contorna o problema de se adicionar mais iterações, permitindo alocações simultâneas do menor número possível de pseudo-medidas capazes de tornar o sistema novamente observável.

Em [28], Korres e Katsikas propõem um método híbrido (topológico-numérico) para análise de observabilidade. Primeiramente, o sistema é particionado em áreas observáveis, representando cada área por nós e as linhas que interligam as áreas como ramos. Sendo assim, apenas os nós de fronteira e as injeções potência nas ilhas são mantidos para o processamento numérico. Após este pré-processamento, é realizado um teste de observabilidade das ilhas através do escalonamento da matriz teste retangular, que é baseada nas propriedades da teoria de redução dos grafos. Como a matriz teste é geralmente mais esparsa que a matriz ganho reduzida, o método proposto é mais rápido tanto no teste de observabilidade do sistema quanto na alocação de múltiplas medidas.

Seguindo a metodologia híbrida proposta acima, [29] propõe uma análise da observabilidade numérica baseada na teoria de grafos. Tal metodologia propõe o processamento topológico das medidas de fluxo nos ramos e remoção das medidas de injeção redundantes nos nós que são incidentes a ramos com medidas de fluxo ou a ramos que formam loops com ramos que possuem fluxo. Isso gera uma matriz

teste com menos elementos nulos que a Jacobiana ou a matriz ganho, resultando em menor esforço computacional.

Posteriormente, Bei Gou [27] volta a tratar da análise de observabilidade numérica com algoritmos para determinação de ilhas observáveis e alocação mínima de pseudo-medidas para transformar um sistema não-observável observável. Para tal, faz uso da matriz Jacobiana e o esforço computacional se limita a Métodos de Eliminação de Gauss, tornando o processo de análise de observabilidade do problema simples e efetiva. Dando continuidade a seu trabalho, [26] apresenta o estudo de análise de observabilidade do sistema, estendendo a metodologia proposta anteriormente para o uso da Matriz Aumentada de Hachtel.

Quando tratamos da estimação de estados generalizada, tem-se que o vetor de estados é estendido de modo a incluir as tensões nas seções de barras e também os fluxos de potência através dos disjuntores. Se seus valores podem ser estimados, podemos dizer que o sistema é observável [38].

Tomando como base o que foi dito nesta seção, em [39] é proposta uma abordagem baseada na estimação de estados generalizada para determinar a observabilidade ou não de um sistema, incluindo pontos como identificação do número máximo de ilhas observáveis de um sistema ou ainda a restauração da observabilidade quando o sistema é não observável. Para tal, o autor faz uma breve revisão sobre estimação de estados convencional, aprofundando a questão da estimação de estados generalizada e detalhando, através de um exemplo ilustrativo, a montagem da matriz Jacobiana associada [39]. Além disso, o autor utiliza técnicas de redução do modelo e introduz o conceito de *ilha de fluxo*.

1.3 Contribuições do Trabalho

Os trabalhos relacionados ao problema de fluxo de potência estendido abordam apenas a solução pelo método de Newton-Raphson. Considerando a importância do método desacoplado rápido, este trabalho investigou a viabilidade da aplicação da metodologia proposta em [13–15] considerando a solução pelo método desacoplado

rápido.

Sendo assim, esta dissertação aborda a análise em regime permanente do sistema elétrico de potência, apresentando uma nova proposta para o cálculo de fluxo de potência no nível de seção de barra, estendendo o método desacoplado rápido para torná-lo capaz de analisar redes modeladas com a representação explícita de ramos chaveáveis.

Com relação a análise de observabilidade, observa-se que a maior parte da literatura trabalha com a abordagem topológica, e a revisão apresentada na seção anterior mostra que para a análise de observabilidade numérica faz uso da matriz ganho e métodos não-ortogonais ou híbridos. A partir desta constatação, este trabalho propõe ainda uma metodologia para observabilidade puramente numérica baseada nas Rotações de Givens com três multiplicadores, aproveitando assim, todos os recursos e a robustez numérica que caracterizam estes métodos.

A metodologia proposta apresenta ainda duas características importantes: a primeira delas diz respeito à realização da análise de observabilidade sobre a matriz de observação do problema de EESP (que, no caso não-linear, corresponde à matriz Jacobiana) ao invés da matriz ganho, utilizada pela maioria das técnicas apresentadas na literatura. A segunda é a apresentação da formulação do método de Observabilidade via Givens para redes modeladas no nível barra-ramo e sua extensão para redes modeladas no nível de seção de barras, tornando-a capaz de subsidiar estudos de estimação de estados generalizada.

Objetivos

- Estender o Fluxo de Potência Desacoplado Rápido para modelagem de redes elétricas no nível de seção de barra;
- Desenvolver uma ferramenta de análise de observabilidade numérica inteiramente baseada nas rotações de Givens com três multiplicadores.

1.4 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta uma revisão a respeito da análise generalizada do sistema de potência. Ele é dividido em duas partes que refletem o caminho percorrido para a compreensão do estudo da análise generalizada da rede. Primeiramente, é abordada a modelagem convencional do sistema elétrico seguida pela inclusão de dispositivos chaveáveis, modelando a rede no nível de seção de barra. Em seguida é feita uma revisão sobre a extensão do cálculo de fluxo de potência utilizando ferramentas clássicas. Este capítulo é finalizado com a apresentação de uma nova abordagem para análise de fluxo de potência no nível de seção de barra.

O Capítulo 3 trata da estimação de estados convencional e generalizada, apresentando algumas de suas características. Por fim, a questão da observabilidade numérica generalizada é discutida, mostrando que há muito a ser trabalhado nesta área.

O Capítulo 4 apresenta a primeira contribuição deste trabalho na questão de observabilidade numérica. Nele é feita a análise numérica da observabilidade da rede via Método Ortogonal (neste caso, via Givens com 3 multiplicadores), considerando as medidas relevantes e irrelevantes do sistema. O capítulo apresenta ainda uma extensão do método proposto para a análise generalizada do sistema. São descritas as técnicas computacionais utilizadas para a implementação do problema, sendo finalizado com a apresentação do algoritmo proposto para a solução do problema.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados numéricos relativos às duas contribuições desta dissertação, ou seja: fluxo de potência estendido e ao nível de seção de barra e observabilidade numérica via rotação de Givens com 3 multiplicadores.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais obtidas por este trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Fluxo de Potência para Redes Modeladas no nível de Seção de Barra

2.1 Introdução

A crescente reestruturação da indústria energética nos últimos anos fez aumentar a necessidade de automatizar as análises dos sistemas elétricos de potência. O modelo tradicional de modelagem do sistema, também conhecido como modelo barra-ramo, omite informações relativas aos ramos chaveáveis presentes no sistema, ficando nas mãos do operador decisões relativas às configurações das subestações existentes e, em situações de emergência, deixando o operador decidir por conta própria, sem que haja ferramentas para auxiliá-lo.

No sentido de contornar essa falta de ferramentas de apoio ao operador, surge a formulação estendida do problema de fluxo de potência (FP), que permite o processamento de redes modeladas no nível de seção de barras.

Assim, este capítulo descreve o FP solucionado pelo método de Newton-

Raphson, conforme apresentado em [13, 14]. Na sequência, são apresentadas as técnicas propostas nesse trabalho que permitem estender os algoritmos de fluxo de potência via método desacoplado rápido.

2.2 Modelagem da Rede

Os métodos tradicionais de análise em regime permanente para sistemas elétricos de potência baseiam-se na modelagem convencional da rede elétrica, conhecida como modelagem barra-ramo. Nesses modelos, os arranjos das subestações são previamente identificados e um conjunto de nós/seções de barra eletricamente conectados através de chaves seccionadoras e disjuntores fechados são definidos como uma “barra” do sistema. Este procedimento evita a representação explícita de chaves e disjuntores e os consequentes problemas numéricos advindos da utilização de valores significativamente pequenos e grandes de impedâncias para representar posições abertas e fechadas desses dispositivos. Além disso, as matrizes de rede básicas empregadas em estudos de regime permanente, tais como a matriz admitância de barras, matrizes de incidência barra-ramo, etc., podem ser diretamente construídas a partir desse modelo. Entretanto, nessa abordagem todas as informações relacionadas com a topologia das subestações bem como as informações operacionais referentes aos componentes das subestações, tais como o fluxo de carga através de disjuntores, magnitude e ângulo das tensões em seções de barras, não podem ser diretamente determinados a partir das ferramentas de análise que se utilizam desse modelo. Como o conhecimento dessas grandezas é necessário em diversas situações de operação, os operadores precisam lançar mão de procedimentos adicionais para determinar esses valores.

A necessidade de uma representação mais detalhada da rede elétrica, onde o arranjo e a topologia de determinadas subestações possam ser explicitamente representadas, já é verificada na modelagem em tempo real, em estudos de estimação de estados. [3, 5, 31].

Mais recentemente, esforços preliminares no sentido de estender a aplicação

da representação de dispositivos chaveáveis apresentados em [3] para estudos de fluxo de potência foram apresentados na literatura [14, 15, 34].

A modelagem generalizada da rede é feita quando se modelam ramos chaveáveis. Tais elementos podem ser chaves ou disjuntores, que são dispositivos que permitem ligar ou desligar duas barras pertencentes à rede elétrica. Apesar de apresentarem a mesma função do ponto de vista lógico, possuem condições de operação bem distintas, pois disjuntores são dispositivos ligados ao sistema de proteção da rede e operam automaticamente quando algum evento é detectado. Já as chaves, podem ser manuais ou mecânicas e utilizadas em sua maioria para reconfigurar o sistema, inclusive para quando há atividades relacionadas à manutenção da rede. A Figura 2.1 [40] mostra a representação deste elementos no sistema.

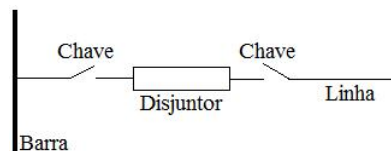


Fig. 2.1: Chaves/disjuntores conectando uma barra a uma linha.

Se uma das chaves ou o disjuntor estiverem abertos, o conjunto todo também estará. Por isso, os três dispositivos podem ser vistos como um único dispositivo lógico, que estará fechado apenas se os três elementos estiverem fechados.

Este fato é importante para se entender o porquê se representa apenas um dispositivo chaveável quando se pode ter mais do que um elemento presente no ramo.

2.3 Fluxo de Potência Estendido via Método de Newton-Raphson

Em [13], Ribeiro mostra que é possível expandir o modelo convencional barra-ramo da rede para uma análise generalizada, onde chaves e disjuntores podem ser explicitamente modelados. Esse trabalho teve como objetivo apresentar o cálculo

do fluxo de potência para a análise de operação em regime permanente de um sistema elétrico de potência incluindo ou não subestações.

Tal abordagem é apresentada em [14] de maneira mais objetiva. Um estudo mais aprofundado para solução do fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestações é apresentado em [15]. Nesse artigo, detalha-se a formulação do problema desde a modelagem barra-ramo da rede, representada pelas equações nodais clássicas, até estudos de casos particulares, como formação de *loops* nas subestações.

Relembrando, as equações de injeção de potência ativa e reativa são:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.2)$$

onde:

K : conjunto de barras adjacentes à barra k , incluindo a barra k ;

V_k, V_m : magnitude das tensões nos terminais das barras do ramo $k - m$;

θ_k, θ_m : ângulos das tensões nas barras k e m ;

$G_{km} + jB_{km} = Y_{km}$: entrada (k, m) da admitância nodal;

P_k : injeção de potência ativa na barra k ;

Q_k : injeção de potência reativa na barra k .

Sendo que as equações 2.1 e 2.2 podem ser representadas da seguinte forma:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.3)$$

$$Q_k = -Q_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (2.4)$$

onde:

Ω_k : conjunto de barras adjacentes à barra k (barra k não está inclusa);

Q_k^{sh} : componente da injeção de potência reativa referente ao elemento shunt

da barra k , dado por:

$$Q_k^{sh} = b_k^{sh} V_k^2 \quad (2.5)$$

b_k^{sh} : susceptância da barra k .

Resumidamente, a formulação básica do fluxo de potência é dada por um conjunto de equações não lineares representadas por 2.1 e 2.2 (ou ainda 2.3 e 2.4) e inequações devido aos limites superior e inferior de geração e transmissão das barras. Na abordagem convencional, que considera a modelagem barra-ramo da rede, tem-se que o vetor de variáveis de estado do problema de fluxo de potência é dado por:

$$x = [\theta^T \quad V^T] \quad (2.6)$$

onde:

θ : vetor dos ângulos das tensões;

V : vetor das magnitudes das tensões.

O conjunto de equação não-lineares do fluxo de potência, representado pelos desvios de potência ativa e reativa, pode ser expresso por:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(V, \theta) \\ Q^{esp} - Q(V, \theta) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.7)$$

onde P^{esp} e Q^{esp} são os valores especificados das injeções de potência ativa e reativa, e P e Q são os vetores das equações não-lineares de potência ativa e reativa representadas nas equações 2.3 e 2.4, respectivamente, de acordo com a classificação da barras da formulação clássica de fluxo de potência.

A análise via Método de Newton-Raphson aplicada à equação 2.7, resulta em:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J(x^v) \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

onde a matriz Jacobiana é dada por:

$$J(x^v) = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^v = \begin{bmatrix} \frac{\delta P}{\delta \theta} & \frac{\delta P}{\delta V} \\ \frac{\delta Q}{\delta \theta} & \frac{\delta Q}{\delta V} \end{bmatrix}^v \quad (2.9)$$

Com isso, o fluxo de potência pode ser resolvido iterativamente resolvendo-se a equação 2.8, onde as variáveis de estado são atualizadas por $\theta^{v+1} = \theta^v + \Delta \theta$ e $V^{v+1} = V^v + \Delta V$, até que a condição de convergência seja atingida.

Ao se fazer a análise generalizada do sistema, deve-se fazer as modificações necessárias para permitir a modelagem explícita de chaves e disjuntores na formulação do fluxo de carga. Isso é feito adicionando-se os fluxos de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis, bem como as diferenças de tensão e ângulo nas barras correspondentes ao dispositivo que se deseja modelar, como novas variáveis de estado. Resultando no seguinte vetor de estados estendido:

$$\bar{x} = [\theta^t \quad V^t \quad t^t \quad u^t]^t \quad (2.10)$$

onde θ e V são os vetores dos ângulos e magnitude das tensões nas barras, respectivamente, e t e u são os vetores dos fluxos de potência ativa e reativa dos ramos chaveáveis, respectivamente.

Adicionalmente, as informações referentes aos *status* desses dispositivos chaveáveis são incluídas na formação do problema de fluxo de potência como novas equações, que são resolvidas simultaneamente com as equações estáticas do problema convencional de fluxo de potência. Desta forma, se um ramo chaveável conectado entre os nós k e m está fechado, então a diferença angular $f_{\theta,km}$ e a diferença de potencial $f_{v,km}$ entre seus terminais serão nulas, ou seja:

$$f_{\theta,km} = \theta_k - \theta_m = 0 \quad e \quad f_{v,km} = v_k - v_m = 0 \quad (2.11)$$

onde o conjunto de equações acima representam as *condições de operação de disjuntor fechado*. Assumindo que N_{fd} ramos chaveáveis explicitamente modelados estão fechados, essas condições podem ser expressas pelo vetor de dimensão $2N_{fd}$ abaixo:

$$f_o^{fd}(\theta, V) = \begin{bmatrix} f_{\theta}^{fd}(\theta) \\ f_v^{fd}(V) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.12)$$

onde $f_{\theta}^{fd}(\theta)$ e $f_v^{fd}(V)$ são os vetores correspondentes às expressões das condições de disjuntor fechado representadas pela equação 2.11.

De forma similar, se o dispositivo estiver aberto, os fluxos de potência ativa e reativa através dele serão nulos, ou seja:

$$t_{km} = 0 \quad e \quad u_{km} = 0 \quad (2.13)$$

Se N_{at} é o número de dispositivos abertos, as *condições de operação de disjuntor aberto* podem ser compactamente expressas pelo seguinte vetor de dimensão $2N_{at}$:

$$f_o^{at}(t, u) = \begin{bmatrix} t^{at}(t) \\ u^{at}(u) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.14)$$

onde $t^{at}(t)$ e $u^{at}(u)$ são vetores de dimensão N_{at} correspondentes às condições operacionais ativa e reativa de disjuntores abertos, respectivamente.

A modelagem da rede no nível de seção de barra através das alterações propostas no conjunto de variáveis de estado (2.10), e da inclusão das novas equações (2.12 e 2.14), têm impacto direto nas equações estáticas do problema de fluxo de potência.

De acordo com a nova modelagem, os fluxos de potência através de ramos convencionais e ramos chaveáveis são calculados de forma distinta. O fluxo de potência através dos ramos convencionais é calculado da mesma forma adotada na formulação barra-ramo, porém, os fluxos de potência através de ramos chaveáveis, são expressos diretamente em função das novas variáveis de estado. Sendo assim, as equações de injeção de potência ativa e reativa em uma dada barra k , na modelagem estendida, são expressas por:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} t_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (2.15)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \Omega_k} u_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} + Q_k^{sh}(V_k) \quad (2.16)$$

onde Ω_k é o conjunto de barras que estão conectadas a barra/seção de barra k através de ramos convencionais; Γ_k é o conjunto de barras conectadas a barra/seção de barra k através de ramos chaveáveis; e Q_k^{sh} é o fluxo de potência reativo através de elementos shunt (banco de capacitores ou reatores) incidentes à barra k .

Dessa forma, a nova função para o problema generalizado se dá da mesma forma que do método convencional, aplicando as devidas modificações à matriz Jacobiana, que agora contém também as derivadas em relação à t e u , conforme ilustrado

na equação 2.17.

$$\bar{f}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} P^{esp} - P(\theta, V, t) \\ Q^{esp} - Q(\theta, V, u) \\ f_o^{fd}(\theta, V) \\ f_o^{at}(t, u) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.17)$$

Ao se aplicar o método de Newton-Raphson à equação 2.17, obtem-se:

$$\bar{J}(\bar{x}^v) \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \\ \Delta t \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(\theta^v, V^v, t^v) \\ \Delta Q(\theta^v, V^v, u^v) \\ f_o^{fd}(\theta^v, V^v) \\ f_o^{at}(t^v, u^v) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

onde:

$$\bar{J}(\bar{x}^v) = \begin{bmatrix} H & N & T & 0 \\ M & L & 0 & U \\ C & D & 0 & 0 \\ 0 & 0 & O & P \end{bmatrix}^v \triangleq \begin{bmatrix} \frac{\delta P}{\delta \theta} & \frac{\delta P}{\delta V} & \frac{\delta P}{\delta t} & \frac{\delta P}{\delta u} \\ \frac{\delta Q}{\delta \theta} & \frac{\delta Q}{\delta V} & \frac{\delta Q}{\delta t} & \frac{\delta Q}{\delta u} \\ \frac{\delta f_o^{fd}}{\delta \theta} & \frac{\delta f_o^{fd}}{\delta V} & \frac{\delta f_o^{fd}}{\delta t} & \frac{\delta f_o^{fd}}{\delta u} \\ \frac{\delta f_o^{at}}{\delta \theta} & \frac{\delta f_o^{at}}{\delta V} & \frac{\delta f_o^{at}}{\delta t} & \frac{\delta f_o^{at}}{\delta u} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

As variáveis são atualizadas do mesmo modo proposto pela convencional.

2.4 Solução via Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido

Este trabalho demonstra as alterações necessárias nos algoritmos existentes para que o problema de fluxo de potência estendido representado pela equação 2.17 possa ser resolvido pelo Método Desacoplado Rápido.

Considera-se que as condições básicas para o desacoplamento $P - \theta/Q - V$ são satisfeitas, ou seja, a relação X/R para os ramos convencionais é suficientemente elevada. Além disso, supõe-se que as condições de operação requeridas para a aplicação da versão rápida do método desacoplado [41] são igualmente satisfeitas. Dessa forma, a solução para o sistema da equação 2.17 pode ser obtida através de

um algoritmo iterativo que resolve sequencialmente dois sistemas lineares correspondentes aos problemas $P - \theta$ e $Q - V$, expressos por:

$$B'_{ext} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(\theta^v, V^v, t^v)/V^v \\ f_{\theta}^{fd}(\theta^v) \\ f^{at}(t^v) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$B''_{ext} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q(\theta^{v+1}, V^v, u^v)/V^v \\ f_v^{fd}(V^v) \\ u^{at}(u^v) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

onde B'_{ext} e B''_{ext} são as matrizes de coeficiente (constantes) do método desacoplado rápido [41], utilizando a estrutura matricial $XFDPF$, estendidas de forma a contemplar as restrições operacionais impostas pela inclusão dos ramos chaveáveis. As Figuras 2.2 e 2.3 ilustram as modificações necessárias nas matrizes para a solução deste problema [34].

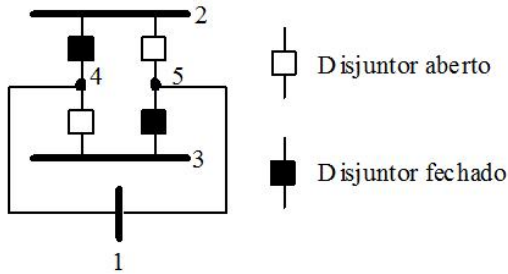


Fig. 2.2: Sistema teste com 5 nós

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	t_{24}	t_{25}	t_{34}	t_{35}
P_1	*	0	0	*	*	0	0	0	0
P_2	0	0	0	0	0	1	1	0	0
P_3	0	0	0	0	0	0	0	1	1
P_4	*	0	0	*	0	-1	0	-1	0
P_5	*	0	0	0	*	0	-1	0	-1
$\theta_2 - \theta_4$	0	1	0	-1	0	0	0	0	0
$\theta_3 - \theta_5$	0	0	1	0	-1	0	0	0	0
t_{25}	0	0	0	0	0	0	1	0	0
t_{34}	0	0	0	0	0	0	0	1	0

Fig. 2.3: Estrutura da matriz B'_{ext} correspondente

Como resultado, esta abordagem é capaz de resolver problemas de fluxo de potência modelados em seção de barra sem acréscimo no número de iterações exigidas para o cálculo do fluxo de potência, já que as novas equações, acrescentadas ao problema para representar chaves e disjuntores no modelo da rede, são lineares.

2.5 Conclusões

Este capítulo descreve detalhadamente as modelagens barra-ramo e no nível de seção de barras para estudos em regime permanente de sistemas elétricos de potência, bem como a extensão do problema de fluxo de potência.

A importância deste capítulo está em apresentar o desenvolvimento da análise generalizada da rede para fluxo de potência, que é utilizada na etapa seguinte desse trabalho, uma vez que nos fornece um banco de dados em regime permanente. São fornecidos assim subsídios importantes para o entendimento do algoritmo proposto no Capítulo 4.

Este capítulo introduz também uma metodologia que estende a formulação do fluxo de potência desacoplado rápido, permitindo sua aplicação a sistemas elétricos modelados no nível de seção de barra. A abordagem proposta permite que dispositivos chaveáveis de subestações de interesse, previamente selecionadas, possam ser explicitamente representados, de forma que os fluxos de potência ativa e reativa através dos mesmos são obtidos diretamente como parte da solução do problema de fluxo de potência.

As mudanças necessárias para a representação de chaves e disjuntores na formulação do fluxo de potência desacoplado rápido estão baseadas na definição de novas variáveis de estado associadas a esses elementos, conforme descrito neste capítulo. Uma característica importante da metodologia proposta é que as condições operacionais definidas para representar os *status* dos ramos chaveáveis são lineares. Com isso, o processo de convergência do método desacoplado rápido não é afetado pela inclusão da representação de dispositivos chaveáveis em problemas de fluxo de potência.

Resultados obtidos com a aplicação do método proposto serão apresentados no Capítulo 5 desta dissertação.

Estimação de Estados Convencional e Generalizada

3.1 Introdução

O desempenho das funções básicas de avaliação de segurança da operação de sistemas elétricos de potência, Monitoração de Segurança e Análise de Segurança, depende da disponibilidade de informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema. Sendo assim, é fundamental a existência de ferramentas capazes de fornecer em tempo real o banco de dados do sistema.

Visando esta análise em tempo real da rede elétrica, criou-se a *Estimação de Estados em Sistemas de Potência* (EESP), que possibilita a atualização das variáveis relevantes do sistema, estimando os estados a partir do plano de medição existente.

O desenvolvimento de diferentes métodos para estimação de estados (EE) em um sistema elétrico de potência, fornece ao operador da rede uma melhor ferramenta de auxílio. A escolha do método de EE adotado implica diretamente no esforço computacional exigido para o processo de estimação.

Assim, este capítulo descreve de forma sucinta os conceitos básicos necessários

para melhor se entender o problema de EESP, apresentando as principais metodologias empregadas presentes na literatura, dando um enfoque ao uso de métodos ortogonais que é a ferramenta de análise deste trabalho.

3.2 Estimação de Estados via Métodos Não-Ortogonais

Na estimação de estados convencional, a modelagem da rede em tempo real pode ser dividida no processamento lógico (*status* de ramos chaveados) e numérico (fluxo e injeção de potência, magnitude das tensões, etc) dos dados do sistema. Durante a análise de observabilidade e estimação de estados, a topologia e os parâmetros da rede são considerados conhecidos e os dados analógicos são processados usando a modelagem barra-ramo do sistema. Na abordagem convencional, dados lógicos do sistema são analisados pelo processador topológico e os numéricos pelo estimador de estados [6].

Sendo assim, a função do EESP é fornecer uma base de dados em tempo real confiável a partir das medidas redundantes da rede. O estimador processa tais medidas de forma a estimar valores para as tensões complexas em todas as barras.

Modelo de Medição

Dado um sistema de potência com N barras, m quantidade de medidas e $n = 2N - 1$ estados, tem-se o seguinte modelo de medição:

$$z_m = z_0 + \eta \quad (3.1)$$

onde z_m é o vetor de medidas que compõem o plano de medição, z_0 é o vetor com os valores reais das quantidades medidas e η é o vetor de erros aleatórios de medição.

Os valores reais das variáveis de estado do sistema são desconhecidos. Para se poder estimar tais valores deve-se fazer algumas suposições sobre o modelo de medição e utilizar a relação entre as quantidades medidas e os estados. Supõe-se

ento que o vetor de erros de medio η possua distribuio normal com média zero e a matriz de covarincia R , e que os erros de medio so no correlacionados, isto :

$$E(\eta) = 0 \quad e \quad E(\eta\eta^t) = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (3.2)$$

onde σ_i^2  a varincia da medida i e E  a esperana.

O vetor com os valores verdadeiros das quantidades medidas (z_0), pode ser expresso em termos das variveis de estado:

$$z_0 = h(x) \quad (3.3)$$

sendo $h(x)$ um vetor composto por m funes no-lineares do estado do sistema e x o vetor de estados.

Para que um sistema seja estimado, deve-se levar em considerao o grau de redundncia global das medidas obtidas na rede elétrica:

$$\rho \triangleq \frac{m}{n} = \frac{m}{2N - 1} \quad (3.4)$$

A equao 3.4 apresenta uma condio necessria, mas no suficiente para que os estados do sistema possam ser estimados, ou seja, $\rho \geq 1$.

Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Considerando o método clssico de estimaco de estados, o vetor de estados estimados \hat{x}  determinado de forma a minimizar a soma ponderada do quadrado dos resíduos. Os resíduos da estimaco podem ser definidos pela equao 3.5.

$$r = z_m - h_m(\hat{x}) \quad (3.5)$$

A utilizao do método MQP para estimar do vetor de estados, para o problema linearizado, tem como objetivo a minimizao da equao 3.6.

$$J(\hat{x}) = [z - h(\hat{x})]^t R_m^{-1} [z - h(\hat{x})] \quad (3.6)$$

A ponderao da funo objetivo  realizada pela matriz R_m^{-1} , cujos elementos diagonais so iguais ao inverso da varincia de cada medidor. Isso implica que quanto mais preciso for o medidor, menor ser o valor de σ_i e maior o valor de $R_{m,ii}^{-1}$.

Método da Equaco Normal

Também conhecida como Método de Gauss-Newton [36], por utilizar o método de Newton e a aproximao de Gaus para a matriz Hessiana do problema de otimizao.

Aplicando as condioes de otimalidade para o problema de minimizao da equaco 3.6, obtem-se:

$$\left. \frac{\delta J}{\delta x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad \Rightarrow \quad H^t(\hat{x})R^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (3.7)$$

onde $H(\hat{x}) = \left. \frac{\delta h(x)}{\delta x} \right|_{x=\hat{x}}$  a matriz de observao.

A equaco 3.7  composta por um conjunto de equacoes no-lineares de difícil soluo. Pode-se ento, simplificar o problema aplicando-se a linearizao das equacoes de $h(x)$, isto :

$$h(x) \approx h(\hat{x}^k) + H(\hat{x}^k)(x - \hat{x}^k) \quad (3.8)$$

Substituindo a equaco 3.8 na equaco 3.1, tem-se:

$$z - h(\hat{x}^k) = H(\hat{x}^k)(x - \hat{x}^k) + \eta \quad (3.9)$$

ou ainda:

$$\Delta z = H(\hat{x}^k)\Delta x + \eta \quad (3.10)$$

onde a equaco 3.10  o vetor de resíduos de medio.

Com isso, pode-se definir a forma linearizada da funo objetivo como:

$$J(\Delta x) = [\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta x]^t R^{-1}[\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta x] \quad (3.11)$$

Aplica-se novamente as condioes de otimalidade, agora para a equaco 3.11, obtendo:

$$\left. \frac{\delta J}{\delta x} \right|_{x=\hat{x}} = 0 \quad \Rightarrow \quad H^t(\hat{x})R^{-1}[\Delta z - H(\hat{x}^k)\Delta x] = 0 \quad (3.12)$$

podendo ser re-escrita da seguinte forma:

$$[H^t(\hat{x})R^{-1}H(\hat{x}^k)]\Delta x = H^t(\hat{x})R^{-1}\Delta z \quad (3.13)$$

A equação 3.13 é denominada *Equação Normal de Gauss*, representando o sistema linear a ser resolvido a cada iteração para a determinação do incremento do vetor de estado Δx .

Método de Tableau Esparso

Na tentativa de se melhorar a estabilidade numérica do método a ser utilizado para desenvolvimento de algoritmos de EESP, tem-se o Método de Tableau Esparso (também conhecido como Método da Matriz Aumentada), pois possui grau de estabilidade numérica intermediária entre as técnicas ortogonais e o da equação normal de Gauss.

A equação 3.5, descrita previamente, é levemente alterada, sendo re-escrita da forma:

$$r = z - h(x) \quad (3.14)$$

A parti de 3.14, o problema de estimação de estados é formulado como um problema de otimização restrito cuja função objetivo é minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos, ou seja:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar} && \frac{1}{2} r^t R^{-1} r \\ & \text{sujeito a} && z - h(x) - r = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

A função Lagrangeana do problema formulado na equação 3.15, é dado por:

$$\mathcal{L}(x, r, \lambda) = \frac{1}{2} r^t R^{-1} r + \lambda^t [z - h(x) - r] \quad (3.16)$$

onde λ é o vetor dos multiplicadores de Lagrange correspondente à equação que relaciona os resíduos às quantidades medidas e aos estados.

Aplicando-se as condições de otimalidade de primeira ordem, obtém-se o seguinte conjunto de equações não lineares:

$$\begin{aligned} \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta r} &= R^{-1} r - \lambda = 0 \\ \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta \lambda} &= z - h(x) - r = 0 \\ \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta x} &= -H^t(x) \lambda = 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Eliminando-se r :

$$\begin{aligned}\frac{\delta \mathcal{L}}{\delta \lambda} &= R\lambda - z + h(x) = 0 \\ \frac{\delta \mathcal{L}}{\delta x} &= -H^t(x)\lambda = 0\end{aligned}\tag{3.18}$$

A solução do sistema de equações 3.18 é obtido aplicando-se o método de Newton, sendo mostrada pela equação matricial 3.19.

$$\begin{bmatrix} R & H(x) \\ H^t(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z - h(x) \\ 0 \end{bmatrix}\tag{3.19}$$

O sistema é resolvido de forma iterativa, trazendo como benefício o fato de se evitar o cálculo explícito da matriz ganho, melhorando sensivelmente o condicionamento numérico.

3.3 Método sequencial-ortogonal via rotações de Givens

Devido a maior robustez numérica apresentada pelos métodos ortogonais em relação ao método da equação Normal de Gauss, ele é aplicado para solucionar problemas de EESP [11, 35, 36].

Trabalhando com um modelo de medição linear, tem-se o modelo de medição descrito pela equação 3.20.

$$z = Hx + \eta\tag{3.20}$$

onde z representa o vetor de medidas com dimensão $m \times 1$, x é o vetor de estados a serem estimados com a mesma dimensão de z , H representando a matriz de observação (matriz quadrada de dimensões $m \times m$) e η é o vetor de erros de medição.

O desempenho do estimador é diretamente relacionado com a quantidade de medidas disponíveis e quão distribuídas elas estão na rede elétrica [37]. Sendo assim, uma análise com relação à observabilidade do sistema se faz necessária para a EESP. Mesmo que um sistema não seja observável, é necessário analisar se há ilhas

observáveis, ou seja, se há conjuntos de medidas com as quais é possível estimar o estado de pelo menos uma parte do sistema.

Considerando z_1 uma nova medida a ser processada e que está relacionada ao vetor de estados x , a equação 3.6 torna-se:

$$\bar{J} = \left\| \begin{bmatrix} H^t \\ h_1^t \end{bmatrix} x - \begin{bmatrix} z \\ z_1 \end{bmatrix} \right\|^2 \quad (3.21)$$

onde H^t e z correspondem às partes já processadas do problema e h_1^t e z_1 às novas medidas a serem processadas e $\|\dots\|^2$ representa a Norma Euclidiana.

A vantagem de se utilizar métodos ortogonais está no fato de que ao se aplicar as transformações ortogonais, a norma Euclidiana não é alterada [11, 36]. Assim, ao se aplicar tais transformações à equação 3.21, não se altera o valor de $\bar{J}(x)$, que podem ser representadas pelas equações 3.22 e 3.23.

$$Q \begin{bmatrix} H^t \\ h_1^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

e

$$Q \begin{bmatrix} z \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ \tilde{e}_1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

onde a matriz U é uma matriz triangular superior, 0 é um vetor nulo (linha), w é um vetor e \tilde{e}_1 é um escalar.

Após a realização de todas as transformações ortogonais necessárias, o sistema a ser resolvido passa a ser representado pela equação 3.24, que é um sistema linear, podendo ser facilmente resolvido por substituição inversa.

$$U\hat{x} = w \quad (3.24)$$

onde \hat{x} é a estimativa do vetor de estados.

Para se estimarem os estados de um sistema de potência deve-se primeiramente realizar uma análise a respeito da observabilidade desta rede. Ao se examinar a equação 3.22, vislumbra-se a possibilidade de se avaliar a observabilidade através

da matriz de observação (H). Como a não-singularidade da matriz ganho é equivalente a que a matriz H apresente posto completo, os resultados obtidos a partir de H são válidos para a matriz ganho.

Estimação de Estados via Rotações de Givens

O algoritmo de Givens consiste em aplicar rotações sucessivas entre os elementos de um vetor linha p e as linhas de uma matriz triangular superior U até que os elementos de p sejam completamente zerados. A Figura 3.1 ilustra este procedimento [36].

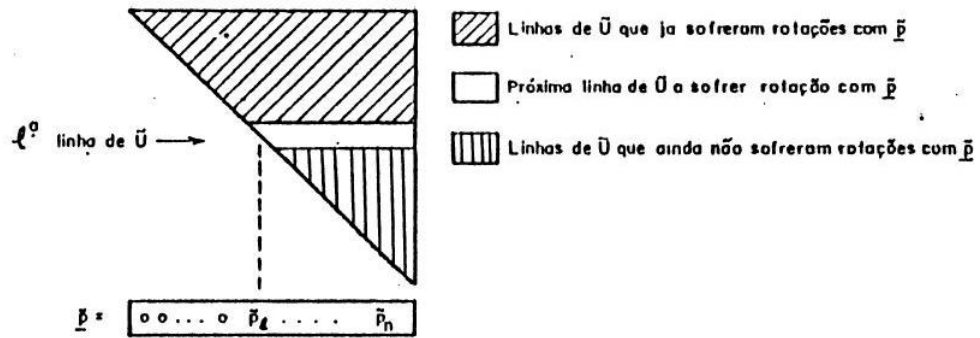


Fig. 3.1: Representação da triangularização de U através de rotações de Givens

Neste trabalho utiliza-se as rotações rápidas de Givens proposta primeiramente em [42] e posteriormente em [11], na qual a matriz U é decomposta da seguinte forma:

$$U = D^{\frac{1}{2}} \bar{U} \quad (3.25)$$

onde D é uma matriz diagonal e \bar{U} é a matriz triangular superior unitária.

Considerando a linha k da matriz U de 3.22 e o vetor p a nova linha da matriz de observação a ser processada, eles podem ser escritos conforme as equações 3.26 e 3.27.

$$u = \left[0 \ \dots \ 0 \ \sqrt{d} \ \dots \ \sqrt{d} \bar{u}_k \ \dots \ \sqrt{d} \bar{u}_{n+1} \right] \quad (3.26)$$

$$p = \left[0 \ \dots \ 0 \ \sqrt{w} p_i \ \dots \ \sqrt{w} p_k \ \dots \ \sqrt{w} p_{n+1} \right] \quad (3.27)$$

onde w representa o peso dado de cada linha da matriz de observação e d o peso de cada linha da matriz U (que é igual ao elemento diagonal correspondente da matriz D).

Aplicando as rotações em cada linha, de forma a zerar o i -ésimo elemento de p , as equações 3.26 e 3.27 podem ser reescritas da seguinte forma:

$$u = \left[0 \quad \dots \quad 0 \quad \sqrt{d'} \quad \dots \quad \sqrt{d'}\bar{u}'_k \quad \dots \quad \sqrt{d'}\bar{u}'_{n+1} \right] \quad (3.28)$$

$$p = \left[0 \quad \dots \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad \sqrt{w'}p'_k \quad \dots \quad \sqrt{w'}p'_{n+1} \right] \quad (3.29)$$

As equações que definem as relações entre as entradas originais e transformadas de u e p podem ser dadas por:

$$\begin{aligned} d' &= d + wp_i^2 \\ w' &= dw/d' \end{aligned} \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \bar{c} &= d/d' \\ \bar{s} &= wp_i/d' \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\left. \begin{aligned} p'_k &= p_k - p_i\bar{u}_k \\ \bar{u}_k &= \bar{c}\bar{u}_k + \bar{s}p_k \end{aligned} \right\}, \quad k = i + 1 \dots n + 1 \quad (3.32)$$

onde \bar{c} e \bar{s} são os parâmetros que definem cada rotação elementar.

Após o processamento de todas as linhas da matriz de observação, a solução do problema EESP pode ser facilmente obtida por substituição inversa com o uso da equação 3.24. Com isso, o problema de mínimos quadrados representado pela equação 3.21 é solucionado através da linha adicional de U , sem a necessidade de cálculos adicionais [35].

3.4 Estimação de Estados Generalizada

A generalização da estimação de estados permite a sua aplicação a sistemas modelados no nível de seção de barra, onde ramos chaveáveis são explicitamente re-

presentados. Com isso, os fluxos através destes dispositivos são incluídos no problema de estimação de estados.

Ao acrescentar os fluxos nos disjuntores como novas variáveis de estado, tem-se como consequência que eventuais medidas de fluxo de potência através destes elementos são expressas unicamente em termos das novas variáveis de estado. Desta forma, tais fluxos de potência ativa e reativa através de um dispositivo chaveável, cujos nós terminais são k e l , podem ser representados por:

$$z_{t_{kl}} = t_{kl} + \varepsilon_{t_{kl}} \quad (3.33)$$

$$z_{u_{kl}} = u_{kl} + \varepsilon_{u_{kl}} \quad (3.34)$$

onde $\varepsilon_{t_{kl}}$ e $\varepsilon_{u_{kl}}$ representam erros aleatórios das medidas de fluxo de potência ativa e reativa do disjuntor $k - l$, respectivamente.

Com isso, as expressões de injeção de potência ativa e reativa que envolvem ramos chaveáveis também são afetadas pelas novas variáveis de estado. Estas injeções são calculadas através do somatório dos fluxos de potência nos ramos incidentes à barra onde a injeção é medida. Para ramos convencionais, tais injeções continuam a ser calculadas convencionalmente, porém, para os ramos de impedância nula, estas injeções de potência passam a ser calculadas por:

$$P_k = \sum_{m \in \bar{\Omega}_k} t_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (3.35)$$

$$Q_k = \sum_{m \in \bar{\Omega}_k} u_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (3.36)$$

onde:

$\bar{\Omega}_k$: conjunto de barras conectadas à barra/seção de barra k através de ramos convencionais;

Γ_k : conjunto de barras conectadas à barra/seção de barra k através de ramos chaveáveis.

As modificações apresentadas pelas equações 3.35 e 3.36 levam a uma extensão do vetor de variáveis de estado, que agora apresenta os estados referentes aos

ramos chaveáveis:

$$\bar{x} = [\theta^T \quad V^T \quad t^T \quad u^T] \quad (3.37)$$

onde t e u são os vetores das potências ativa e reativa que passam pelos disjuntores modelados.

Modelagem dos Ramos Chaveáveis

A modelagem da rede em nível de seção de barra é uma ferramenta desenvolvida para auxiliar o operador do sistema elétrico a expandir o modelo existente (barra-ramo). Ela foi primeiramente apresentada em [3], no qual os autores mostram a modelagem correta de ramos chaveáveis, sem a utilização de aproximações. Com isso, tais ramos são representados por suas restrições operacionais, evitando problemas numéricos causados por sua impedância (nula: fechado; infinita: aberto).

As equações 3.38 e 3.39 mostram as restrições operacionais impostas quando o disjuntor está fechado. Elas mostram que quando o dispositivo se encontra fechado a diferença angular e a diferença de tensão das barras de origem e destino são iguais a zero.

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l = 0 \quad (3.38)$$

$$v_{kl} = v_k - v_l = 0 \quad (3.39)$$

onde:

k : barra de origem do ramo chaveado;

l : barra de destino do ramo chaveado.

Já as equações 3.40 e 3.41 mostram as restrições operacionais quando o dispositivo está aberto.

$$t_{kl} = 0 \quad (3.40)$$

$$u_{kl} = 0 \quad (3.41)$$

Através delas, pode-se perceber que os fluxos ativo e reativo através do disjuntor são nulos. Com isso, pode-se escrever as *restrições operacionais* para disjuntores

abertos e fechados na formulação do problema de estimação de estados como:

$$h_o(x) = 0 \quad (3.42)$$

Além das restrições operacionais apresentadas acima, outras restrições podem surgir da configuração no nível de seção de barras da rede. A incidência de nós/barras de passagem cujas injeções de potência ativa e reativa são nulas, torna-se mais freqüente quando se tem este tipo de modelagem. A formulação matemática do estimador para este tipo de nó/barra de passagem pode ser dada por:

$$p_k = 0 \quad (3.43)$$

$$q_k = 0 \quad (3.44)$$

onde p_k e q_k representam as injeções de potência ativa e reativa na barra k , respectivamente.

As restrições apresentadas pelas barras de injeção nula e as restrições das barras de referência são chamadas de *restrições estruturais*, representadas genericamente por:

$$h_s(x) = 0 \quad (3.45)$$

Solução da EEG via Mínimos Quadrados Ponderados

Considere um sistema com N barras modelado no nível de seção de barras com n_d número de disjuntores. Considere ainda que se tenha N_m medidas, as quais incluem medidas de fluxo de potência em disjuntores e medidas de injeção de potência envolvendo ramos chaveáveis.

O vetor de estados para este sistema é formado por n variáveis (conforme equação 3.37), resultando em:

$$n = 2N + 2n_d \quad (3.46)$$

onde n_d representa o número de dispositivos chaveáveis modelados.

Considerando as restrições operacionais e estruturais e o método MQP apresentado previamente, pode-se re-escrever o problema de MQP a ser estimado

por:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && \frac{1}{2} r_m^t R_m^{-1} r_m \\
 & \text{sujeito a} && r_m = z_m - h_m(\hat{x}) \\
 & && h_s(\hat{x}) = 0 \\
 & && h_o(\hat{x}) = 0
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

onde r_m representa o vetor de resduos das medidas, R_m  a matriz de covarincia dos erros de medio, suposta diagonal, e \hat{x}  o vetor de estimativa para os estados.

Soluo da EEG via Mtodo de Tableau Esparso

Atribuindo-se multiplicadores de Lagrange para as restrioes, a nova funo para o problema de estimaco apresentado em 3.47  dada por:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} r_m^t R_m^{-1} r_m + \lambda_m^t [z_m - h_m(\hat{x}) - r_m] + \lambda_s^t [-h_s(\hat{x})] + \lambda_o^t [-h_o(\hat{x})] \tag{3.48}$$

Utilizando-se as condioes de Karush-Kuhn-Tucker para se obter as condioes necessrias para uma soluo ótima, resulta no seguinte sistema de equaoes no-lineares:

$$\begin{aligned}
 \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta r} &= R_m^{-1} r_m - \lambda_m = 0 \\
 \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta x} &= -H_m^t(\hat{x}) \lambda_m - H_s^t(\hat{x}) \lambda_s = 0 \\
 \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta \lambda_m} &= z_m - h_m(\hat{x}) - r_m = 0 \\
 \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta \lambda_s} &= -h_s(\hat{x}) = 0 \\
 \frac{\delta \mathcal{L}(x, r, \lambda)}{\delta \lambda_o} &= -h_o(\hat{x}) = 0
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

onde:

$$\begin{aligned}
 H_m(\hat{x}) &= \frac{\delta h_m(\hat{x})}{\delta(\hat{x})} \\
 H_s(\hat{x}) &= \frac{\delta h_s(\hat{x})}{\delta(\hat{x})} \\
 H_o(\hat{x}) &= \frac{\delta h_o(\hat{x})}{\delta(\hat{x})}
 \end{aligned} \tag{3.50}$$

Da primeira equação do conjunto 3.49, tem-se:

$$r_m = R_m \lambda_m \quad (3.51)$$

Trabalhando com o sistema linearizado em relação a um dado vetor de estados \hat{x}^k e eliminando-se a variável r_m da equação 3.51, o conjunto 3.49 pode ser re-escrito da seguinte forma:

$$\begin{aligned} H_m^t(\hat{x}^k)\lambda_m + H_s^t(\hat{x}^k)\lambda_s + H_o^t(\hat{x}^k)\lambda_o &= 0 \\ z_m - h_m(\hat{x}^k) - H_m(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} - R_m\lambda_m &= 0 \\ h_s(\hat{x}^k) + H_s(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} &= 0 \\ h_o(\hat{x}^k) + H_o(\hat{x}^k)\Delta\hat{x} &= 0 \end{aligned} \quad (3.52)$$

O conjunto acima pode ser expresso na forma matricial da seguinte forma:

$$\begin{pmatrix} 0 & H^t \\ H & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\hat{x} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ r^k \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

onde:

$$H \triangleq \begin{pmatrix} H_m(\hat{x}^k) \\ H_s(\hat{x}^k) \\ H_o(\hat{x}^k) \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} R_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\lambda = \begin{pmatrix} \lambda_m \\ \lambda_s \\ \lambda_o \end{pmatrix} \quad r^k = \begin{pmatrix} z_m - h_m(\hat{x}) \\ -h_s(\hat{x}) \\ -h_o(\hat{x}) \end{pmatrix}$$

Por fim, o problema 3.47 de estimação pode ser resolvido usando o algoritmo de Tableau esparsa, que soluciona o sistema linear descrito pela equação 3.53.

3.5 Conclusões

O uso de ferramentas de EE em sistemas de potência é importante para a análise em tempo real da rede. Sendo assim, a escolha do melhor método para implementá-las é fundamental para o desempenho do estimador.

Este capítulo descreveu os modelos de estimação de estados tanto para modelagem barra-ramo da rede quanto no nível de seção de barra.

A aplicação de métodos ortogonais para EE fornece uma ferramenta mais robusta, motivando o desenvolvimento da ferramenta de análise de observabilidade numérica proposta nesta dissertação e apresentada no Capítulo 4.

Análise de Observabilidade de Redes via Rotações de Givens com Três Multiplicadores

4.1 Introdução

A capacidade de se estimarem os estados de um sistema de potência está relacionada à quantidade de medidas existentes e seus posicionamentos na rede. Apenas se existir um conjunto suficiente de medidas adequadamente distribuído sobre a rede para se estimarem os estados, pode-se dizer que o sistema é observável [1,2,37]. Por mais que o sistema elétrico opere normalmente em condições observáveis, a possibilidade de falhas no plano de medição, nos equipamentos e no sistema de transmissão de dados, fazem com que seja necessária a análise para estes pontos críticos de operação. Tal análise da rede inclui testes de observabilidade do sistema, identificação de ilhas observáveis e alocação de pseudo-medidas.

Há dois métodos de análise de observabilidade de um sistema de potência: o topológico, no qual utiliza-se técnicas combinatórias e conceitos de teoria de grafos

para extrair conclusões sobre o posto da matriz Jacobiana; e o numérico, que utiliza técnicas numéricas baseadas em cálculos em ponto flutuante para concluir sobre a *observabilidade numérica*.

A literatura relacionada à análise de observabilidade apresenta estudos do ponto de vista topológico [7, 30]. Alguns autores abordam esta questão de maneira híbrida [28, 29], utilizando ferramentas numéricas e topológicas. Trabalhos que tratam da observabilidade do ponto de vista exclusivamente numérico normalmente utilizam a modelagem barra-ramo do sistema elétrico.

Além disso, a análise da observabilidade numérica da rede em sua maioria baseia-se no processamento da matriz ganho [1, 2, 24–27, 37] e operações relacionadas a ela. Neste sentido, este capítulo apresenta a principal proposta deste trabalho, focando na observabilidade exclusivamente numérica, fazendo uso da análise da matriz de observação e utilizando métodos ortogonais baseados nas rotações de Givens com três multiplicadores.

4.2 Teoria da Observabilidade Numérica

A viabilidade de solução para o problema de estimação de estados está na não-singularidade da matriz ganho. Como a matriz de covariância das medidas, R , é diagonal e não singular, isto é equivalente a que a matriz H tenha posto completo [36].

Sendo assim, percebe-se uma relação entre a observabilidade de um sistema e o posto da matriz H . Com isso, um sistema pode ser definido como *algebricamente observável* com respeito a um conjunto de medidas \mathcal{M} se, e somente se, a matriz H possui posto igual a n , onde n é a dimensão do vetor de estados x [18].

O conceito de *observabilidade numérica* foi definido [18] com o intuito de se considerar possíveis problemas numéricos advindos de mau condicionamento ou do ponto de operação adotado:

”Um sistema de potência é numericamente observável com respeito a \mathcal{M} , se as estimativas para os estados puderem ser obtidas através da solução

iterativa a partir da partida plana, ou seja, atribuindo-se valores iniciais iguais a 1,0 pu para os módulos e 0,0 radianos para os ângulos das tensões nas barras.”

Diversos métodos foram propostos para verificar a observabilidade numérica de sistemas através da fatoração triangular da matriz ganho. Monticelli e Wu [1,2,23], propuseram que esta análise fosse feita durante o processo de solução da equação normal.

Neste trabalho, a atenção é dedicada a métodos numéricos, que investigam a observabilidade de sistemas a partir de informações oriundas da triangularização da matriz de observação via rotações de Givens com três multiplicadores.

4.2.1 Análise de Observabilidade Numérica em Termos da Matriz Ganho

A análise numérica da observabilidade da rede baseia-se na relação entre os fluxos de potência nos ramos da rede e medidas realizadas no sistema. Em um sistema real, tem-se presente dois tipos de medidas: fluxo de potência entre barras e injeções de potência. Se for modelada também a parte reativa, tem-se a inclusão das medidas de tensão nas barras.

Trabalhando com um modelo “dc”, tem-se que o fluxo de potência ativa entre as barras k e m é dado por:

$$p_{km} = \frac{1}{x_{km}}(\theta_k - \theta_m) \quad (4.1)$$

Por simplicidade, considera-se $x_{km} = 1$ e o “fluxo” de potência passa a ser dado pela diferença angular $(\theta_k - \theta_m)$. Se $x_{km} = 1$ o vetor contendo os fluxos de potência em todos os ramos, δ , pode ser expresso por:

$$\delta = A^t \theta \quad (4.2)$$

onde: A é a matriz de incidência barra-ramos.

Um sistema é dito observável se, no caso que todas as medidas forem consideradas iguais a zero, todos os fluxos de potência através dos ramos da rede também serão [1, 37], ou seja:

$$H\theta = 0 \quad \implies \quad A^t\theta = 0 \quad (4.3)$$

Quando um sistema é não-observável, mesmo que suas medidas sejam todas iguais a zero, haverá pelo menos um fluxo diferente de zero. Isto pode ocorrer devido a presença de diferentes valores de ângulos de referência. Tais ramos com fluxos diferente de zero serão considerados não-observáveis e as medidas associadas a este são identificadas como irrelevantes ao plano de medição.

Ao se analisar a equação normal de Gauss apresentada em 3.13, pode-se perceber que a observabilidade de um sistema está relacionada à não-singularidade da matriz de coeficientes no lado esquerdo da equação, conhecida como matriz ganho e que é definida da seguinte forma:

$$G = H^t R^{-1} H \quad (4.4)$$

onde G representa a matriz ganho do sistema.

Sendo assim, cabe analisar o teorema apresentado em [1]:

Teorema 4.2.1 *Supondo que a rede elétrica é representada pelo modelo “dc”, tem-se que um sistema é observável se \bar{H} , obtida de H ao se excluir qualquer uma de suas colunas, apresenta posto completo. Equivalentemente, um sistema é observável se a triangularização da matriz ganho calculada a partir de H (ou seja, mantendo-se a coluna da barra de referência) produzir apenas um pivô nulo.*

A conclusão que se pode obter do teorema 4.2.1, é a de que um sistema só é dito observável quando a estimação de seus estados possui única solução e a matriz de ganho for de posto completo.

Quando um sistema não é observável, a triangularização da matriz ganho com pivotamento completo produz mais de um pivô nulo, conforme ilustra a Figura

4.1. Os pivôs nulo não precisam necessariamente ocorrer no final da matriz, nem serem reordenados, conforme apresentado em [1].

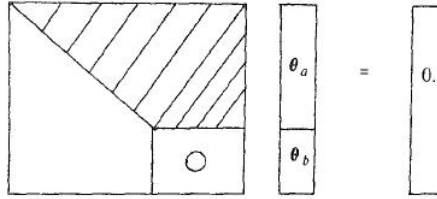


Fig. 4.1: Triangularização da matriz ganho de um sistema não observável

Esta análise sobre observabilidade numérica de um sistema em termos da matriz ganho apresentada em [1,2], serviu como base para o desenvolvimento de diversos algoritmos sobre observabilidade numérica [24–27,37], apresentando diferentes abordagens para a análise de G .

4.2.2 Identificação de Ilhas Observáveis

Quando um sistema é não-observável, o que se busca é a identificação das partes observáveis da rede. A cada uma delas dá-se o nome de *ilha observável (IO)*.

As ilhas são parte da rede compostas por barras e ramos que representam linhas de transmissão, transformadores e capacitores série. Uma ilha é dita observável quando se pode calcular todos os fluxos nos ramos através das medidas disponíveis, independentemente do valor adotado para referência [36,37].

Quando se tem mais de um pivô nulo, deve-se substituir todos os elementos diagonais iguais a zero da matriz fatorada por 1's e os elementos correspondentes do vetor do lado direito por valores arbitrários ($[0, 1, 2, \dots]^t$) e os demais elementos deste vetor por 0's, e o vetor de estados será dividido em $[\theta_a^t, \theta_b^t]^t$, representando os estados observáveis e estados com pivôs nulos, respectivamente.

A identificação das IOs se dará ao resolver o “fluxo dc” para este novo sistema. A equação a ser resolvida deste sistema é idêntica a uma equação normal de Gauss com pseudo-medidas de ângulo para as barras correspondentes a θ_b e a todos os outros estados com medidas nulas. Com isso, obtém-se tantos θ 's distin-

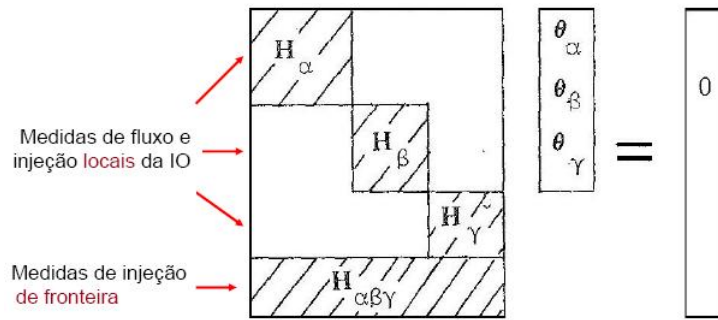


Fig. 4.2: Representação da matriz H reordenada de acordo com as medidas de fluxo e de injeção de potência nas diferentes ilhas

tos quantos forem as IOs, sendo que θ 's iguais entre si serão agrupados e os ramos correspondentes a valores iguais de θ serão classificados como sendo da mesma IO.

Desta forma, pode-se calcular os estados de cada IO, considerando que as medidas de fluxo de ramos pertencentes a uma mesma ilha e as medidas de injeção para nós adjacentes ao nó monitorado de uma mesma IO permanecem no banco de dados e são agrupados de acordo com a IO. Medidas de injeção para nós adjacentes aos nós monitorados pertencentes a diferentes IO são consideradas irrelevantes [36, 37].

4.2.3 Alocação de pseudo-medidas

Após a identificação das IOs, há a preocupação de se restaurar a observabilidade do sistema. Para tal é necessária a análise da rede para possíveis alocações de pseudo-medidas que possam tornar o sistema observável novamente.

Tais medidas podem ser oriundas da análise do plano de medição do modelo da rede ou ainda, baseadas nas previsões de carga e geração em tempo real do simulador de medidas da rede.

A alocação destas pseudo-medidas se dá após a análise dos ramos não-observáveis da rede e das medidas de injeção de potência em barras de fronteira. São prioridade as medidas descartadas, seguidas por barras de fronteira que não possuem medidas de injeção de potência ou de fluxo de potência que conecte uma

IO a outra, evitando-se assim, a contaminação das medidas existentes no sistema.

Após a alocação de pseudo-medidas, deve-se retornar à análise da matriz ganho para verificar se o número de pseudo-medidas inseridas é suficiente para tornar o sistema novamente observável, caso contrário, deve-se alocar um número maior destas medidas até que o sistema volte a ser observável.

4.2.4 Algoritmo Proposto por Monticelli e Wu [1, 2]

Este trabalho se baseia no algoritmo de observabilidade numérica proposto por Monticelli e Wu [1, 2], que pode ser descrito da seguinte forma:

1. Inicializa-se o plano de medição com o plano formado por todas as medidas disponíveis;
2. Atualiza-se a rede elétrica relevante, removendo todos os ramos que não são monitorados por fluxo nem incidem em barras cuja injeção é monitorada;
3. Forma-se a matriz ganho e faz-se a fatoração triangular;
4. Durante a fatoração triangular, ao se encontrar um pivô nulo, este deve ser substituído por 1 e os valores do vetor do lado direito correspondentes por $0, 1, 2, \dots$:
 - Se apenas um pivô nulo for encontrado \rightarrow sistema observável, FIM;
 - Se número de pivôs nulos $> 1 \rightarrow$ sistema não-observável, continuar conforme segue;
5. Resolva a Equação de Estimação de Estados do modelo "dc", considerando todas as medidas com valor nulo, exceto as p-m's de ângulo, que assumem os valores $\theta = 0, 1, 2, \dots$;
6. Encontre os fluxos nos ramos. Se não houver fluxo $\neq 0$, pare;
7. Se houver fluxo $\neq 0$, o ramo correspondente é não-observável. Atualize a rede relevante, eliminando os ramos não-observáveis;

8. Atualize o conjunto relevante de medidas removendo as medidas de injeção adjacentes a pelo menos um dos ramos removidos no passo anterior (*medidas irrelevantes*);
9. Retornar ao passo 2.

4.3 Análise de Observabilidade Usando Rotações de Givens com 3 Multiplicadores

A utilização de transformações ortogonais melhora a estabilidade numérica a um algoritmo. Além disso, o processamento é feito linha por linha da matriz, e a esparsidade pode ser facilmente explorada [35].

Tendo estes conceitos em mente, vê-se a possibilidade de aplicar métodos ortogonais para problemas de análise de observabilidade.

Conforme apresentado no Capítulo 3, seção 3.3, o método sequencial-ortogonal via rotações de Givens pode ser aplicado para solução de problemas de EE. O que não se tem é uma ferramenta de observabilidade puramente numérica que utilize apenas métodos ortogonais.

A opção pelo Método das Rotações de Givens com três multiplicadores, deve-se à sua robustez numérica e ao fato da matriz triangular resultante ser diagonal unitária, trabalhando diretamente sobre a matriz de observação H , diferentemente do método proposto por Monticelli e Wu que faz uso da matriz ganho. Além disso, o método a ser proposto necessita particionar a matriz H , como fazem alguns métodos recentes [24–29].

O uso das rotações de Givens sem raízes quadradas apresenta vantagens com relação ao método de Givens tradicional pela redução do esforço computacional. Para eliminação das raízes quadradas, faz-se necessário escalonar as linhas da matriz triangular U , gerando uma matriz diagonal $D^{1/2}$.

Analisando-se a equação 3.25 e sabendo que a matriz $D^{1/2}$ é uma matriz diagonal, percebe-se que, após a realização de todas as transformações ortogonais

sobre as linhas da matriz de observação, o i -ésimo elemento diagonal da matriz D , d_i , representará o peso da linha i para a matriz H .

Com isso, é possível identificar os pivôs nulos do sistema, uma vez que cada coluna de H corresponde a uma variável de estado e d é o vetor de pesos das linhas dessa matriz, obtido de D . Se existe mais de um elemento de d nulo, isto significa que há mais de um pivô nulo em U implicando, conseqüentemente, na não-observabilidade do sistema.

4.3.1 Algoritmo Proposto

Esta seção visa apresentar o algoritmo proposto para a solução do problema de análise de observabilidade, apresentado as contribuições deste trabalho.

O primeiro passo do desenvolvimento deste algoritmo está na montagem da matriz H . Primeiramente, são analisadas todas as medidas de fluxo de potência nos ramos do sistema. Em seguida são processadas as informações provenientes das medidas de injeção nas barras.

A montagem da matriz de observação H é feita da seguinte forma:

1. As colunas de H representam as variáveis de estado do sistema;
2. As primeiras linhas de H correspondem às equações de fluxo de potência nos ramos do sistema;
3. As linhas seguintes são preenchidas com informações referentes às equações das medidas de injeção de potência nas barras;
4. Por fim, a última linha da matriz é composta pela restrição estrutural da barra de referência.

Outro procedimento que deve ser implementado de acordo com o método de Givens, é a inclusão do vetor de medidas z em H , com isso, a matriz de observação é aumentada em uma coluna. A inclusão desta coluna a H é importante para que os valores das medidas também sofram as rotações.

A análise de observabilidade é feita após a matriz H aumentada por z sofrer as rotações de Givens, exatamente como descrito na seção 3.3 sobre o método seqüencial ortogonal via método de Givens. Para isso, faz-se uma verificação do vetor de pesos gerada pelas rotações de Givens. Simultaneamente a valores nulos de d , se existir algum elemento de d que seja menor que uma dada tolerância, o estado correspondente a este elemento é considerado um *pivô nulo*. Havendo mais de um pivô nulo no sistema, a rede é não observável e parte-se para o uso de algoritmos de alocação de pseudo-medidas e identificação das IO.

Baseando-se no que foi descrito acima, foi desenvolvido um novo programa computacional capaz de fazer a análise de observabilidade numérica do sistema, e o algoritmo proposto é ilustrado na Figura 4.3.

Resultados preliminares obtidos com este algoritmo são apresentados e discutidos na Capítulo 5.

4.3.2 Exemplo

Considerando primeiramente uma análise sobre a matriz ganho, considere-se o sistema apresentado na Figura 4.4, cujos parâmetros e medidas são apresentados na Tabela 4.1.

Para este sistema, a matriz ganho é dada por:

$$G = \begin{bmatrix} 48.0000 & 10.0000 & -58.0000 \\ 10.0000 & 12.5000 & -22.5000 \\ -58.0000 & -22.5000 & 80.5000 \end{bmatrix}$$

onde G apresenta todo o vetor de estados.

Fazendo-se a fatoração triangular superior de G , tem-se:

$$U_G = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.3294 & -1.3294 \\ 0 & 1.0000 & -1.0000 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

A fatoração desta matriz obteve apresenta solução única, o que indica que o sistema é observável, podendo prosseguir com a estimação dos estados.

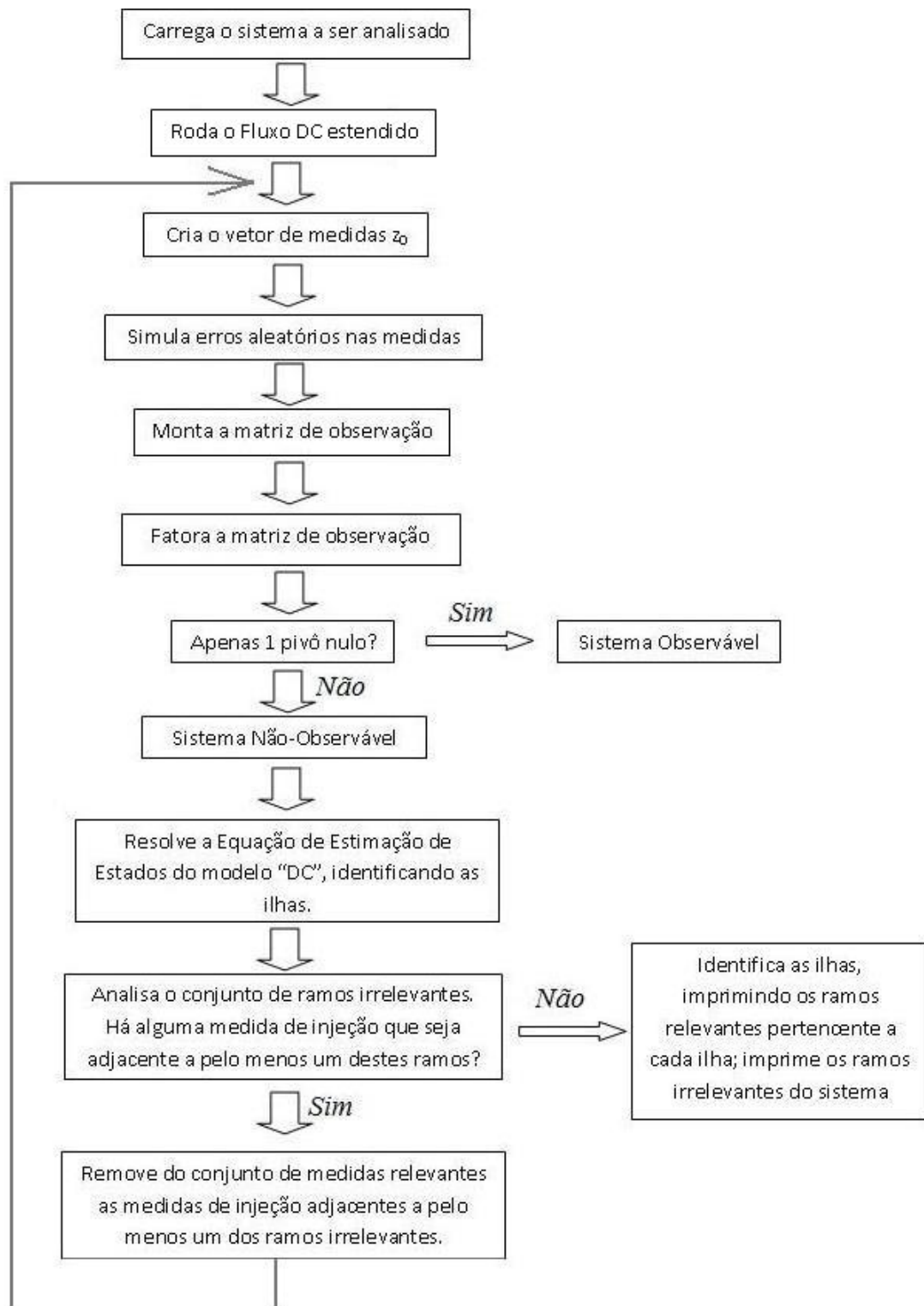


Fig. 4.3: Fluxograma do algoritmo proposto

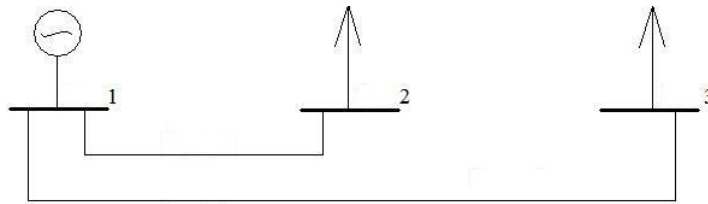


Fig. 4.4: Modelagem barra-ramo

Tabela 4.1: Parâmetros e medidas do sistema da Figura 4.4

Parâmetros do Sistema			Medidas
Dados de Linha			Medidas de injeção de potência
Linha	x_{km}	Barras	
1 – 2	0,25	1	
1 – 3	0,40	2	
Dados de barra			Medidas de fluxo de potência
Barra	Tipo	P	Ramo
1	$V\theta$	–	2 – 1
2	PQ	0,4	1 – 3
3	PQ	0,8	

Utilizando o mesmo sistema apresentado na Figura 4.4 e aplicando o algoritmo proposto nesta seção tem-se que o vetor de medidas perfeitas é dado por:

$$z = [-0.4010 \quad 0.8012 \quad 1.2012 \quad -0.4000]$$

e as variâncias das medidas:

$$w = [0.0916 \quad 0.0964 \quad 0.1044 \quad 0.0916]$$

Com isso, a matriz de observação, contendo as modificações propostas pelo novo algoritmo, é dada por:

$$H = \begin{bmatrix} 4.0000 & 0 & -4.0000 & -0.4010 \\ 0 & -2.5000 & 2.5000 & 0.8012 \\ -4.0000 & -2.5000 & 6.5000 & 1.2012 \\ 4.0000 & 0 & -4.0000 & -0.4000 \end{bmatrix}$$

Aplicando-se as rotações de Givens com três multiplicadores à matriz de observação, tem-se como saída a matriz triangular superior unitária:

$$U = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.1906 & -1.1906 & -0.1612 \\ 0 & 1.0000 & -1.0000 & -0.3204 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 \end{bmatrix}$$

e o vetor de pesos da matriz U aumentada:

$$d = \begin{bmatrix} 5.0260 & 1.0645 & 0 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

A última coluna de d corresponde ao peso do vetor de medidas, podendo ser desconsiderado, pois deve-se analisar os pesos correspondentes às variáveis de estado, no caso deste exemplo, $\theta_1, \theta_2, \theta_3$. Como o vetor de pesos apresenta apenas um pivô nulo, este sistema é dito observável e prossegue-se com o programa para a estimação dos estados.

4.4 Análise de Observabilidade Generalizada via Givens com 3 Multiplicadores

A análise da observabilidade numérica convencional (análise da rede com modelagem *barra-ramo*) vem sendo alvo de estudo nos últimos anos conforme apresentado pela literatura [1, 2, 24–27, 37]. Os algoritmos propostos pelas referências, apesar de abordar o tema por diferentes pontos de vista, sempre trabalham com o uso da matriz ganho (\mathbf{G}).

Ao se tratar da observabilidade numérica através de métodos ortogonais, propõe-se um metodologia mais robusta com ganho para o estimador.

Tendo como base os conceitos apresentados nas seções anteriores e o algoritmo proposto em [37], a nova metodologia foi desenvolvida, as adaptações necessárias para se aplicar as rotações de Givens na matriz de observação foram observadas e utilizam-se os resultados obtidos para a análise de observabilidade da rede e, conseqüentemente, para o estimador de estados.

A inclusão de ramos chaveáveis na modelagem do sistema elétrico traz consigo uma série de restrições operacionais e modificações necessárias a serem implantadas para que a metodologia proposta seja capaz de processar as novas informações.

Neste trabalho utiliza-se a modelagem *dc* da rede, porém as modificações sugeridas para esta abordagem podem ser estendidas posteriormente para a análise não linear do sistema elétrico. A nova abordagem resultante das modificações necessárias no plano de medição, bem como o tratamento dado aos diferentes tipos de medidas e restrições oriundas da modelagem no nível de seção de barra, são descritos nesta seção.

Conforme apresentado no Capítulo 3, a modelagem de chaves e disjuntores de uma rede é feita através da inclusão de restrições operacionais e estruturais que representem o dispositivo. Tais restrições são conhecidas e determinadas pelos *status* dos disjuntores, sendo assim, os valores destas medidas não sofrem pela presença de erros nos medidores. Como tais medidas são sempre zero, podem ser representadas por um vetor de zeros de dimensões $1 \times \text{número_de_restrições}$. Este vetor é acrescentado ao vetor de medidas conforme mostra a equação abaixo:

$$z = [z \quad 0_{1,z_{rest}}] \quad (4.5)$$

Sendo assim, se ocorrer uma alteração no vetor de medidas, tal alteração é aplicada também à matriz de observação, que agora deve incluir também as restrições operacionais e estruturais proveniente da modelagem da rede no nível de seção de barra.

Para se demonstrar as alterações ocorridas na matriz H, pode-se observar o sistema simplificado apresentado na Figura 4.5.

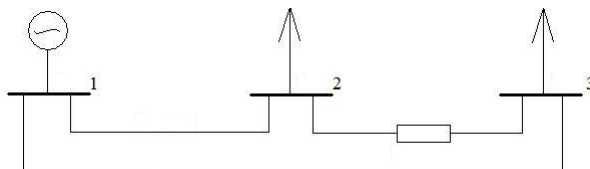


Fig. 4.5: Modelagem generalizada simplificada do sistema apresentado na Fig. 2.2

Com isso, a nova matriz de observação, referida aqui como matriz de observação estendida, \tilde{H} , é estruturada da seguinte forma:

1. As colunas de \tilde{H} representam as variáveis de estado do sistema, que agora incluem as informações de fluxos de potência nos disjuntores;
2. As primeiras linhas de \tilde{H} correspondem às equações de fluxo de potência nos ramos do sistema;
3. As linhas seguintes são preenchidas com informações referentes às equações das medidas de injeção de potência nas barras;
4. Incluem-se tantas linhas quantas forem as restrições operacionais dos ramos chaveáveis modelados;
5. São incluídas as linhas referentes às restrições estruturais correspondentes às barras de injeção nulas;
6. Por fim, a última linha da matriz é composta pela restrição estrutural da barra de referência.

A restrição de disjuntor aberto é modelada como uma medida de fluxo em um *ramo fictício*. Tal ramo pode ser modelado de duas maneiras: acrescenta-se um nó fictício para representar o nó terra, permitindo a representação de ramo fictício conectando "nó" correspondente à variável de estado do dispositivo com o *nó terra*.

Uma outra alternativa, abordada por esse trabalho, propõe a criação de um ramo fictício que ligue as variáveis de estado correspondentes às restrições estruturais (relacionadas ao dispositivo chaveável aberto) à variável de estado correspondente à barra de referência. Isso elimina a necessidade de se criar um nó adicional na matriz de observação. A representação da inclusão desta modelagem à linha de \tilde{H} correspondente é dada por:

$$\tilde{H}_{fic} = [\dots \quad \gamma_{fic} \quad \dots \quad -\gamma_{fic}] \quad (4.6)$$

onde γ_{fic} está relacionada a variável θ_{ref} e $-\gamma_{fic}$ representa a variável t_{ij} do ramos fictício.

Com isso, pode-se proceder com a montagem da matriz de observabilidade estendida, obtendo:

$$\tilde{H} = \begin{matrix} & \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & t_{23} & & \\ \left[\begin{array}{cccc} \gamma_{12} & -\gamma_{12} & & \\ \gamma_{13} & & -\gamma_{13} & \\ \gamma_{12} + \gamma_{13} & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & \\ -1 & & & 1 \\ & 1 & -1 & \\ -* & & & * \\ 1 & & & \end{array} \right] & \begin{array}{l} z_{12} \\ z_{13} \\ z_{P_1} \\ z_{t_{23}} \\ (\theta_2 - \theta_3 = 0) \\ t_{23} \\ (\theta_1 = 0) \end{array} & \end{matrix} \quad (4.7)$$

onde γ_{km} representa a admitância série da linha e * representa um valor aleatório de admitância para o ramo fictício.

Após a formação da matriz de observação estendida, \tilde{H} , procede-se da mesma forma que na metodologia convencional. Um sistema modelado no nível de seção de barra é observável se, no caso de todas as medidas serem iguais a zero, os fluxos de potência através de todos os ramos da rede (convencionais e chaveáveis) são nulos. Assim, a equação 4.3 passa a ser representado por:

$$\tilde{H}\tilde{\theta} = 0 \quad \implies \quad \tilde{A}^t\tilde{\theta} = 0 \quad (4.8)$$

onde \tilde{A} é a matriz de incidência barra-ramos estendida e $\tilde{\theta}$ é o vetor estendido considerando a modelagem linear da rede ou seja:

$$\tilde{\theta} = [\theta^t \quad t^t]^t \quad (4.9)$$

Caso contrário, seguir para determinação das ilhas, conforme proposto no algoritmo apresentado na Figura 4.3.

Descrição do Algoritmo

Primeiramente deve-se habilitar o programa para o cálculo de fluxo generalizado. Para tal, toma-se como base os algoritmos apresentados na seção 2.4 deste trabalho, sem levar em consideração a parte reativa do sistema. Este passo é importante para a geração do vetor de medidas perfeitas (z_0), onde são analisadas as medidas de fluxo e de injeção de potência provenientes dos medidores, o sentido das medidas de fluxo nos ramos (se é de $k - m$ ou de $m - k$) também é levado em consideração nesta análise.

Em seguida, executa-se um programa gerador de erros de medidas aleatórias, no qual a saída é a matriz de covariância (R) e o vetor de medidas z . É importante pontuar que as alterações impostas pela inclusão de ramos chaveáveis ao programa não são consideradas nestes dois últimos passos, e sim incluídas após a conclusão dos mesmos.

Sendo assim, se o sistema analisado possuir ramos chaveáveis, após a conclusão da segunda e terceira etapa do programa, são incluídos no vetor z tantos zeros quanto forem o número restrições operacionais e estruturais (z_{rest}) da rede, oriundas da presença de elementos chaveáveis no sistema, além de estender o vetor das variâncias com elementos de mesma dimensão do vetor de restrições estruturais e operacionais.

Com isso, é possível então montar a matriz de observação. Tal matriz contém, além das condições convencionais de operação da rede, as restrições operacionais e estruturais provenientes da representação de dispositivos chaveáveis no sistema. Uma alteração importante a este algoritmo é a criação de um *ramo fictício* que relaciona as variáveis de estado referentes à restrição operacional e estrutural devido a presença de um disjuntor à variável de estado correspondente à primeira referência do sistema. Desta forma, estas informações são modeladas sem a necessidade de ser criar um nó fictício adicional.

Em seguida, move-se a coluna referente à variável de estado da barra de referência para a última coluna de H . Isso faz com que a variável de estado corres-

pondente à primeira barra de referência seja a sempre a última a sofrer rotação, e acrescenta-se a coluna referente ao vetor de medidas à matriz H .

Neste ponto, aplicam-se as Rotações de Givens à matriz H e a saída resultante serve de base para a análise de observabilidade do sistema. Primeiramente, faz-se uma análise do vetor de pesos das linhas da matriz U , se houver apenas um elemento com valor menor que uma dada tolerância o sistema é dito observável e o programa dá continuidade para a estimação dos estados da rede. Caso este vetor apresente mais de um elemento menor que a tolerância dada, o sistema é não observável e parte-se para a identificação dos *pivôs nulos* da rede e alocação de valores (0, 1, 2, ...) no vetor do lado direito correspondentes a posição destes pivôs. Tal procedimento resulta na identificação das ilhas observáveis e ramos irrelevantes do sistema. Caso o sistema ainda apresente alguma medida de injeção que seja irrelevante, ela é retirada nesta etapa e o programa retorna ao segundo passo.

4.5 Conclusões

Este capítulo propôs um método numérico para a análise de observabilidade de sistemas modelados no nível *barra-ramo*. Este método proposto estende a análise de observabilidade numérica para o uso de métodos ortogonais baseados nas rotações de Givens.

O algoritmo resultante permite realizar a análise de observabilidade numérica de maneira mais robusta e com pouco esforço computacional, tornando-o de fácil implementação.

O sistema teste é apresentado mais adiante no capítulo de resultados juntamente com os sistemas IEEE de 14 e de 30 barras.

Além disso, propôs-se também a extensão desse algoritmo para a análise de observabilidade de sistemas elétricos modelados no nível de seção de barra estende a análise de observabilidade convencional apresentada, através da inclusão das restrições operacionais e estruturais presentes pela inclusão de dispositivos chaveáveis na modelagem da rede.

As principais alterações necessárias para adaptar o algoritmo e torná-lo capaz de realizar análises de observabilidade numérica generalizada foram apresentadas.

Desta forma, este trabalho propõe uma metodologia para análise de observabilidade numérica baseado nas rotações de Givens com 3 multiplicadores, inicialmente considerando a modelagem barra-ramo da rede e posteriormente sua extensão de forma a permitir o processamento tanto de ramos convencionais quanto chaveáveis. A extensão proposta requer a inclusão das restrições operacionais e estruturais impostas pela representação destes dispositivos na modelagem da rede.

O algoritmo resultante ainda necessita de maiores análises quanto a sua aplicabilidade, porém se mostrou bastante eficiente para os casos testados até o momento.

Resultados

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos para fluxo de carga generalizado via método de Newton-Raphson desacoplado rápido, bem como os resultados relativos às análises de observabilidade numérica e à observabilidade numérica generalizada propostas neste trabalho.

Os resultados são apresentados em três partes. A primeira parte refere-se aos resultados obtidos com o programa de fluxo de carga generalizado via método de Newton-Raphson desacoplado rápido aplicados aos sistemas teste do IEEE de 24 e 30 barras. A consistência dos resultados obtidos com a metodologia proposta é verificada através da análise dos balanços de potência dos sistemas em questão.

A segunda parte trata da análise de observabilidade numérica convencional, mostrando inicialmente o comportamento do método proposto para os sistemas-teste de pequeno porte. Nas subseções seguintes são apresentados os resultados obtidos para os sistemas-teste IEEE de 14 e 30 barras. A validade da proposta é observada através da comparação com resultados obtidos pelas referências [2, 24–29].

A terceira parte mostra resultados preliminares da análise de observabilidade

numérica generalizada para um sistema teste pequeno obtido de [8]. Foram simuladas diferentes topologias e planos de medição, para verificação da validade do algoritmo proposto.

5.2 Fluxo de Potência para Redes Modeladas no Nível de Seção de Barra via Método de Newton-Raphson Desacoplado Rápido

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos na aplicação da metodologia apresentada no Capítulo 2, desenvolvido em MatLab, utilizando os sistemas teste IEEE 24 e 30 barras.

5.2.1 Sistema IEEE 24 Barras

A análise apresentada nesta seção considera a modelagem das subestações 14 e 16 do sistema teste IEEE 24 barras (Figura 5.1). Para esta finalidade, tais subestações são representadas no nível de seção de barra conforme ilustra a Figura 5.2, enquanto a representação barra-ramo é mantida para as demais subestações. A metodologia proposta (XFDPF) é aplicada para se obter a solução em regime permanente da rede.

Consideram-se duas condições operacionais para as subestações 14 e 16. A primeira, referida como *Caso A*, é a mesma apresentada na referência [43], onde a linha que conecta as subestações 14 e 16 (linha 27 – 28) está em operação. Para o *Caso B*, considera-se a linha 27 – 28 fora de operação, devido ao desligamento simultâneo dos ramos chaveáveis 14 – 27 e 28 – 34.

Caso A

Os resultados do fluxo de potência resultante obtidos através da aplicação de XFDPF para as subestações 14 e 16 e ramos adjacentes são apresentados nas Tabelas

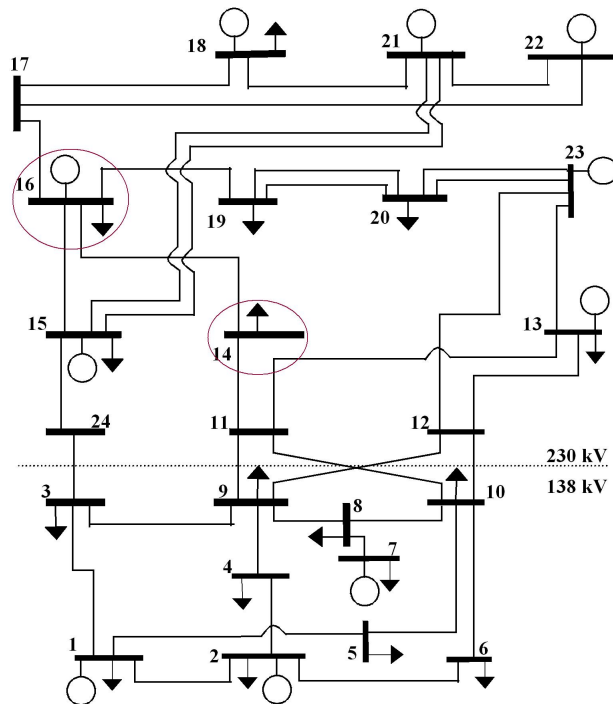


Fig. 5.1: Sistema IEEE 24 Barras

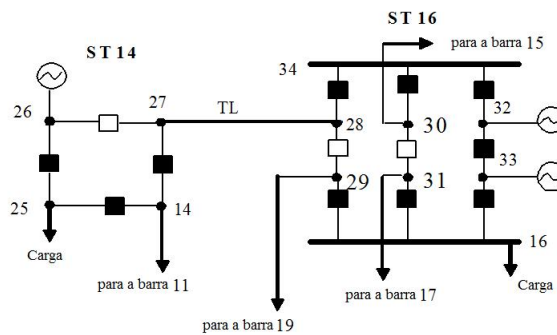


Fig. 5.2: Modelagem das Subestações 14 e 16 do Sistema IEEE 24 Barras - Caso A

5.1 e 5.2. A Tabela 5.1 é dividida em duas seções: uma para cada subestação. Cada uma das seções, por sua vez, é subdividida em duas subseções: uma para resultados da análise nodal para os componentes nodais da subestação, e outra com os fluxos de potência nos ramos que conectam as subestações a barras *externas*. Por simplicidade, apenas elementos com injeções de potência não-nulos são representados.

Os fluxos de potência *internos* de cada subestação (fluxos de potência nos ramos chaveáveis), são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso A

<i>Subestação 14</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
25	$-194,0 - j39,0$	0,9800	13,92°
26	$0,0 + j94,089$	0,9800	13,92°
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
14 – 11	235,215 – j34,135		
27 – 28	$-429,215 + j89,224$		
<i>Subestação 16</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
16	$-100,0 - j20,0$	1,0170	23,80°
32	$77,5 - j105,0851$	1,0170	23,80°
33	$77,5 - j105,0851$	1,0170	23,80°
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
30 – 15	$-89,966 - j70,741$		
31 – 17	$-314,667 - j78,581$		
29 – 19	$20,772 - j58,494$		
28 – 27	$438,861 - j22,53$		

Os resultados obtidos são consistentes, tanto em termos de balanço de potência para cada nó das subestações quanto para os fluxos de potência nos ramos chaveáveis. O algoritmo XFDPF converge com sucesso após 4 iterações, que é o mesmo número de iterações utilizadas quando se tem a modelagem barra-ramo do sistema teste original. Este resultado já era esperado, conforme discutido no Capítulo

Tabela 5.2: Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso A

Ramo Chaveável	$P_{kl} + jQ_{kl}$
Subestação 14	
14 – 25	$194,000 - j55,089$
14 – 27	$-429,215 + j89,224$
25 – 26	$0,000 - j94,089$
Subestação 16	
16 – 29	$20,772 - j58,494$
16 – 31	$-314,667 - j78,581$
16 – 33	$193,895 + j117,075$
28 – 34	$-438,861 + j22,353$
30 – 34	$89,966 + j70,741$
32 – 33	$-271,395 - j11,990$
32 – 34	$348,895 - j93,094$

2 desta dissertação.

A Figura 5.3 ilustra a distribuição dos fluxos nos ramos chaveáveis para a subestação 16 do referido sistema.

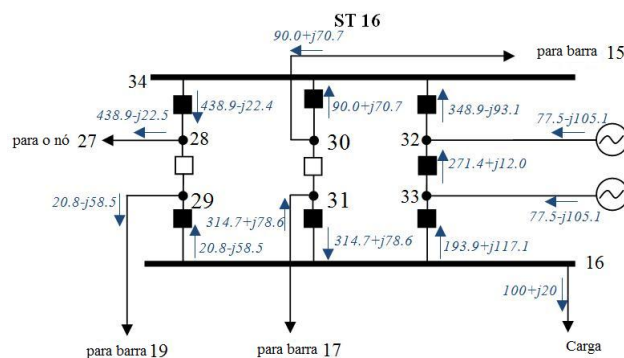


Fig. 5.3: Fluxos de Potência através dos Disjuntores da Subestação 16 do Sistema IEEE 24 Barras - Caso A

Caso B

Neste caso, considera-se que o ramo 27 – 28 foi retirado de operação através do desligamento simultâneo dos dispositivos 14 – 27 e 28 – 34. A nova configuração para este caso pode ser vista na Figura 5.4.

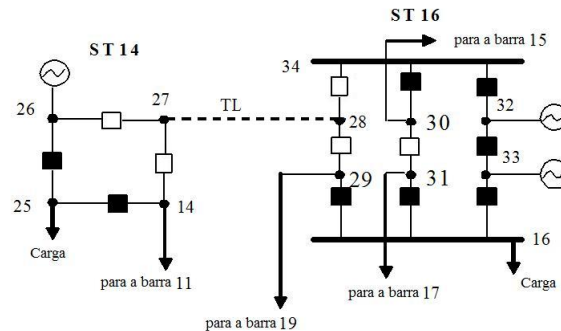


Fig. 5.4: Modelagem das Subestações 14 e 16 do Sistema IEEE 24 Barras - Caso B

O método proposto converge com sucesso após 6 iterações. A diferença apresentada com relação ao *Caso A* está no fato das condições operacionais do Caso B serem mais severas. Entretanto, é o mesmo número de iterações requeridas pelo fluxo de potência baseado na modelagem barra-ramo do sistema IEEE 24 barras considerando o ramo 27 – 28 fora de operação, conforme esperado.

Os resultados obtidos pelo algoritmo proposto são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4 e levam às mesmas considerações com relação ao balanço de potência e distribuição do fluxo de potência apresentados para o *Caso A*. Além disso, tais tabelas mostram claramente as mudanças na distribuição de fluxos de potência nas subestações 14 e 16 quando ocorre uma mudança na topologia da rede, enfatizando a importância da metodologia proposta como uma ferramenta adequada de desempenho rápido para a análise do impacto de mudanças de topologia.

5.2.2 Sistema Teste IEEE 30 Barras

Neste caso, as subestações 12 e 15 do sistema teste IEEE 30 barras foram selecionadas como subestações de interesse. Como no caso do sistema teste IEEE 24

Tabela 5.3: Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso B

<i>Subestação 14</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
25	$-194,0 - j39,0$	0,9800	$-5,70^\circ$
26	$0,0 + j66,909$	0,9800	$-5,70^\circ$
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
14 – 11	$-194,000 + j27,909$		
27 – 28	$0,0 + j0,0$		
<i>Subestação 16</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
16	$-100,0 - j20,0$	1,0170	$46,56^\circ$
32	$77,5 - j115,684$	1,0170	$46,56^\circ$
33	$77,5 - j115,684$	1,0170	$46,56^\circ$
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
30 – 15	$33,872 - j86,881$		
31 – 17	$-284,955 - j85,643$		
29 – 19	$306,083 - j78,843$		
28 – 27	$0,0 + j0,0$		

barras, a modelagem barra-ramo é aplicada às subestações restantes. As condições de carregamento aplicadas para este teste foram baseadas na referência [44]. As subestações 12 e 15 do sistema teste original são modeladas no nível de seção de barras, conforme apresentado na Figura 5.5.

Os fluxos de potência através dos dispositivos chaveáveis fechados determi-

Tabela 5.4: Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 24 Barras - Caso B

Ramo Chaveável	$P_{kl} + jQ_{kl}$
Subestação 14	
14 – 25	194,000 – $j27,909$
25 – 26	0,000 – $j66,909$
Subestação 16	
16 – 29	306,083 – $j78,843$
16 – 31	–284,955 – $j85,643$
16 – 33	–121,128 + $j144,486$
30 – 34	–33,872 + $j86,881$
32 – 33	33,872 – $j86,881$
32 – 34	43,628 – $j28,803$

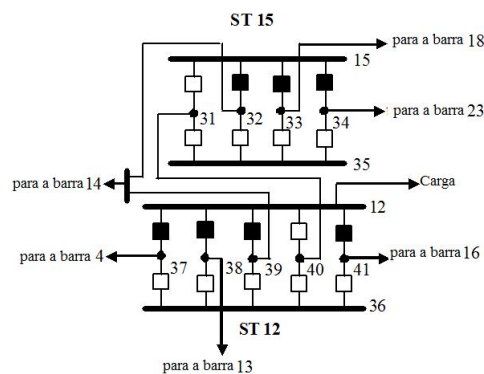


Fig. 5.5: Modelagem das Subestações 12 e 15 do Sistema IEEE 30 Barras

nados pelo XFDPF são consistentes com aqueles obtidos através dos ramos convencionais e injeções de potência nos terminais das barras. Além do mais, os resultados conferem com as equações de balanço para cada subestação. A convergência do algoritmo é obtida após 5 iterações, que é o mesmo número apresentado ao se rodar o sistema modelado no nível barra-ramo.

Os resultados obtidos pelo método proposto são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6, nas quais os valores calculados para fluxos através de dispositivos chaveáveis

abertos são omitidos, pois todos eles são iguais a zero, conforme esperado.

Tabela 5.5: Resultado do Fluxo de Carga para o Sistema IEEE 30 Barras

<i>Subestação 12</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
12	$-11,2 - j7,5$	1,0230	$-16,52^\circ$
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
37 – 4	$-39,920 + j9,520$		
38 – 13	$0,0 - j35,090$		
39 – 14	$18,075 + j9,555$		
41 – 31	$0,0 + j0,0$		
41 – 16	$10,650 + j8,520$		
<i>Subestação 15</i>			
Grandezas Nodais			
	Injeção de Potência	Tensão nodal	
Nó	$P_k + jQ_k$	$ V_k (p.u.)$	θ_k
15	$-8,2 - j2,5$	0,938	$-18,95^\circ$
Fluxo para as barras/SE adjacentes			
Ramo	$P_{kl} + jQ_{kl}$		
31 – 40	$0,0 + j0,0$		
32 – 14	$-10,970 - j6,560$		
33 – 18	$2,000 + j3,54$		
34 – 23	$0,769 + j0,521$		

Tabela 5.6: Distribuição de Fluxos através dos Ramos Chaveáveis para o Sistema IEEE 30 Barras

Ramo Chaveável	$P_{kl} + jQ_{kl}$
Subestação 12	
12 – 37	$-39,923 + j9,521$
12 – 38	$0,000 - j35,094$
12 – 39	$18,075 + j9,555$
12 – 41	$10,649 + j8,518$
Subestação 15	
15 – 32	$-10,972 - j6,562$
15 – 33	$2,003 + j3,541$
15 – 34	$0,769 + j0,521$

5.3 Observabilidade Numérica Convencional via Método de Givens

O programa computacional para análise numérica convencional foi desenvolvido em MATLAB, e calcado nos passos descritos na Figura 4.3, para torná-lo capaz de realizar análises de observabilidade via métodos ortogonais.

Para a validação do programa proposto, utilizando a abordagem convencional da rede, foram realizados testes preliminares com o sistema teste apresentado na Figura 5.6. Além disso, resultados obtidos com a aplicação do programa de análise numérica ao sistema IEEE 14 barras apresentado em [2, 24, 25, 28, 29] e ao sistema IEEE 30 barras ilustrado em [25] são mostrados nesta seção.

Como é utilizado o modelo dc para a rede elétrica, apenas há interesse nas medidas de injeção de potência ativa nas barras e medidas de fluxo entre ramos.

5.3.1 Sistema Teste de 4 barras e 5 ramos

Os resultados para esse pequeno sistema teste estão divididos em duas partes: a primeira refere-se à identificação de um sistema observável e conseqüente estimação do vetor de estados; a segunda descreve testes para sistemas não-observáveis, localização das ilhas observáveis e determinação dos ramos não-observáveis.

Caso A: Plano de Medição 1

Este sistema teste é apresentado em [36] e seu plano de medição mostrado na Figura 5.6.

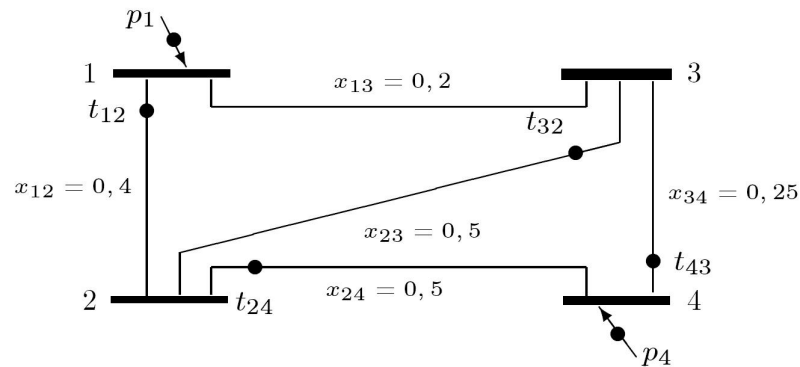


Fig. 5.6: Sistema Teste de 4 barras e 5 ramos

Tabela 5.7: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A

Vetor de pesos das linhas da matriz U					
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Pivô nulo
d_i ($\times 10^7$)	6.5009	1.6020	4.2452	0	θ_4

A análise de observabilidade numérica indica corretamente que o sistema é observável, de acordo com o resultado obtido pelo programa para a análise do vetor d , apresentado na Tabela 5.7. O programa processa a estimação dos estados corretamente, conforme indicam os resultados mostrados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A

Estados Estimados		Fluxos Estimados	
Variável de Estado	Valor Estimado	Ramo	Fluxo
θ_1	0,0758	1 – 2	0,3633
θ_2	-0.0695	1 – 3	0,4559
θ_3	-0.0153	2 – 3	-0,1083
θ_4	0	2 – 4	-0,1389
		3 – 4	-0.0613

Caso B: Plano de Medição 2

Modifica-se o plano de medição do sistema teste de forma a torná-lo não observável. Para isso, retiram-se as medidas de injeção da barra 1 e de fluxo do ramos 1 – 2.

O programa fornece como resultado um sistema não-observável com duas ilhas, conforme pode ser visto na Tabela 5.9, sendo a primeira composta apenas pela barra 1 (*nó isolado*) e a segunda composta pelas demais barras da rede. A Tabela 5.10 ilustra os resultados obtidos corretamente pelo programa.

Tabela 5.9: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B

Vetor de pesos das linhas da matriz U					
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Pivôs nulo
$d_i (x10^7)$	0	1.3298	3.8445	0	θ_1
Resultado da EE "dc"	1	0	0	0	θ_4

Tabela 5.10: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1	1 – 2
2	2, 3, 4	1 – 3

5.3.2 Sistema IEEE 14 Barras

O sistema de 14 barras do IEEE, cujo diagrama unifilar é ilustrado na Figura 5.7, foi utilizado em [2] em sua proposta de algoritmo para observabilidade numérica, sendo a partir de então muito utilizado como *sistema teste* na literatura sobre de análise da observabilidade da rede.

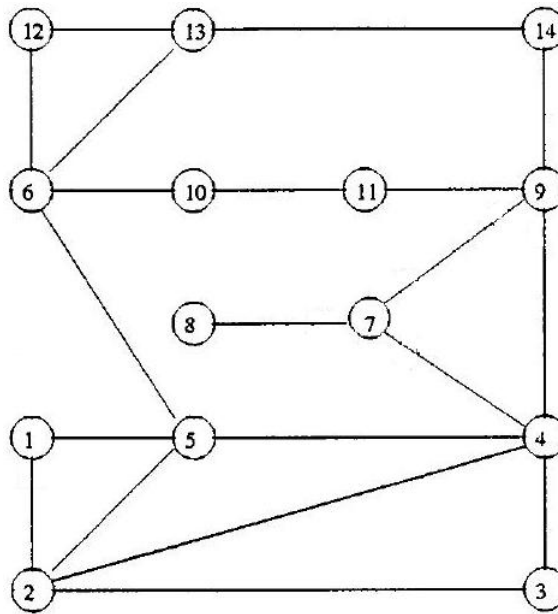


Fig. 5.7: Sistema IEEE 14 Barras

Com o intuito de validar a metodologia proposta, repete-se neste trabalho os testes e simulações apresentados com este sistema de 14 barras nas referências [2, 24–29].

Na seqüência são apresentados os diferentes planos de medição adotados e os resultados obtidos pelo programa na forma de tabelas.

Caso A: Plano de Medição 1

É utilizado inicialmente o plano de medição proposto em [2] e posteriormente apresentado em [24, 26, 27], detalhado na Tabela 5.11.

Os resultados obtidos com o algoritmo proposto na seção 4.3 e ilustrados na Tabela 5.12, indicam corretamente que o sistema é observável. Esta conclusão é

Tabela 5.11: Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso A

Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo
Barras	Ramos
1	1 – 2
2	7 – 4
3	7 – 8
4	7 – 9
5	9 – 4
6	9 – 7
9	
11	
12	
13	

coerente com o obtido nas referências acima.

Tabela 5.12: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A

Vetor de pesos das linhas da matriz U							
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
d_i ($\times 10^9$)	0	1.9492	0.1737	1.9443	0.5032	0.5122	0.3360
Variáveis de estado	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}
d_i ($\times 10^9$)	0.0320	0.4069	0.0226	0.0227	0.1170	0.0146	0.0001

Caso B: Plano de Medição 2

Dando continuidade a análise sobre a observabilidade numérica também executada em [2, 24, 26, 27], retira-se do conjunto de medidas a injeção de potência na barra 5, mantendo todas as demais medidas apresentadas na Tabela 5.11.

Os resultados obtidos para este plano de medição são apresentados na Tabela 5.13. Verifica-se que, ao se retirar apenas a medida de injeção de potência da barra

5, o sistema torna-se não-observável e composto por 7 ilhas, das quais apenas a ilha 1 é composta por 8 barras e as demais compostas apenas por *nós isolados*. A identificação destas ilhas é feita analisando-se o vetor de pesos das linhas da matriz U fornecidos pelo método de análise de observabilidade ortogonal e apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.13: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1, 2, 3,	5 – 6
	4, 5	6 – 10
	7, 8, 9	13 – 14
2	6	6 – 12
3	10	6 – 13
4	11	9 – 11
5	12	9 – 14
6	13	10 – 11
7	14	12 – 13

Tabela 5.14: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso B

Vetor de pesos das linhas da matriz U							
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
d_i ($\times 10^9$)	0	1.9125	0.1733	1.1865	0.1022	0	0.2376
Resultado da EE "dc"	0	0	0	0	0	0	0
Variáveis de estado	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}
d_i ($\times 10^9$)	0.0304	0.0184	0	0	0	1	0
Resultado da EE "dc"	0	0	2	3	4	5	6

Com isso, podemos concluir que a injeção de potência ativa na barra 5 é uma medida crítica, pois sua retirada tornou o sistema não observável, conforme também constatado nas referências [2, 24, 26, 27].

Caso C: Plano de Medição 3

Considera-se agora a outra configuração proposta da referência [25] para o plano de medição do sistema de 14 barras, conforme apresentado na Tabela 5.15.

Tabela 5.15: Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso C

Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo
Barras	Ramos
1	1 – 2
2	1 – 5
3	2 – 3
7	4 – 7
9	4 – 9
12	6 – 13
14	7 – 8
	7 – 9

A Tabela 5.16 mostra os resultados da análise de observabilidade numérica do sistema obtidos com o método de Givens proposto neste trabalho. Podemos perceber a formação de mais de uma ilha que contém diferentes barras, diminuindo o número de ilhas com nós isolados e o número de ramos irrelevantes, o que está de acordo com os resultados apresentados em [25]. O vetor de pesos obtido pelo método ortogonal para a identificação destas ilhas pode ser visto na Tabela 5.17.

Caso D: Plano de Medição 4

As referências [28, 29] apresentam planos de medição muito semelhantes que implicam em resultados de análise de observabilidade iguais. Por questão de conveniência, a Tabela 5.18 apresenta o plano de medição proposto em [29].

A aplicação do método ortogonal proposto fornece os resultados apresentados na Tabela 5.19. Pode-se perceber a presença de três ilhas compostas por mais de uma barra. Isso mostra que o conjunto de medidas está mais bem distribuído no

Tabela 5.16: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso C

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9	5 – 6 6 – 10
2	6, 12, 13	9 – 11
3	10	9 – 14
4	11	10 – 11
5	14	13 – 14

Tabela 5.17: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso

C

Vetor de pesos das linhas da matriz U							
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
d_i ($\times 10^9$)	0	1.9060	0.1480	0.0833	0.0594	0.0821	0.3415
Resultado da EE "dc"	0	0	0	0	0	3	0
Variáveis de estado	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}
d_i ($\times 10^9$)	0.0270	0.0098	0	0	0.0700	0	0
Resultado da EE "dc"	0	0	1	2	3	3	4

Tabela 5.18: Plano de Medição para o Sistema IEEE 14 barras Caso D

Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo
Barras	Ramos
1	1 – 5
2	4 – 7
6	4 – 9
7	7 – 8
9	7 – 9
11	12 – 13
12	

sistema, causando o desaparecimento da grande ilha apresentada nos casos B e C e o surgimento de ilhas menores. Este resultado foi obtido através da identificação dos pivôs nulos pelo programa proposto e apresentando na Tabela 5.20.

Tabela 5.19: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso D

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1, 2, 5	2 – 3 2 – 4
2	3	3 – 4
3	4, 7, 8, 9	4 – 5 5 – 6
4	6, 12, 13	6 – 10 9 – 11
5	10	9 – 14
6	11	10 – 11
7	14	13 – 14

Tabela 5.20: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso D

Vetor de pesos das linhas da matriz U							
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
d_i ($\times 10^8$)	0	3.0371	0	0.5427	0.2216	0.1697	2.6974
Resultado da EE "dc"	0	0	1	2	0	5	2
Variáveis de estado	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}
d_i ($\times 10^8$)	0.2657	0	0	0	0.2781	0	0
Resultado da EE "dc"	2	2	3	4	5	5	6

5.3.3 Sistema Teste IEEE 30 Barras

O método ortogonal de análise numérica de observabilidade também foi testado para o sistema de 30 barras do IEEE, cujo diagrama unifilar é apresentado

na Figura 5.8. O plano de medição, proposto em [25], é ilustrado na Tabela 5.22.

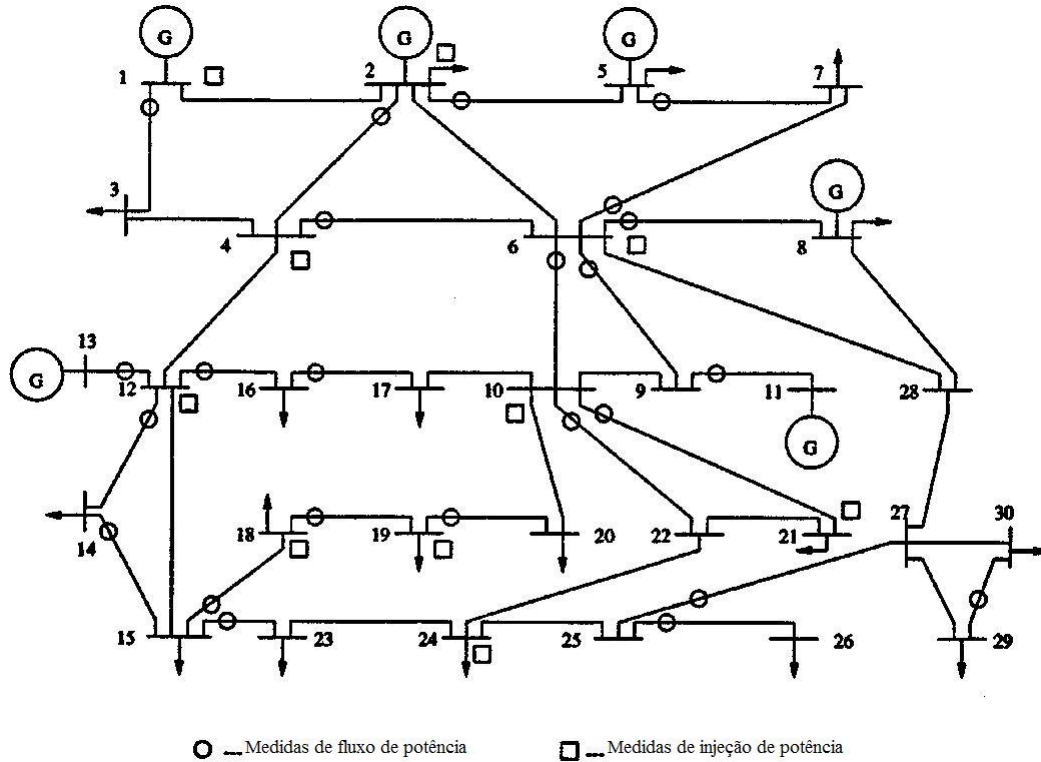


Fig. 5.8: Sistema IEEE 30 Barras

Procedendo da mesma maneira que nos casos anteriores, os resultados são apresentados na Tabela 5.21. Pode-se perceber que o programa identifica com sucesso as ilhas observáveis, através da análise dos pivôs nulos, apresentados na Tabela 5.23, e descarta medidas irrelevantes, gerando a terceira coluna da Tabela 5.21. Tal resultado é compatível com o apresentado na [25].

5.4 Observabilidade Numérica Generalizada via Método de Givens

O método de observabilidade numérica generalizada via método de Givens foi aplicado conforme proposto no Capítulo 4 deste trabalho, adotando novamente o modelo linear da rede e utilizando o MatLab para sua implementação.

Tabela 5.21: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema IEEE 30 Barras

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1 – 23, 28	22 – 24 23 – 24
2	24	24 – 25
3	25, 26, 27	27 – 28 27 – 29
4	29, 30	27 – 30

É importante ressaltar que os resultados apresentados nesta seção mostram apenas os estudos preliminares para o caso da análise generalizada da rede. Para isso, utiliza-se o modelo proposto em [8], ilustrado na Figura 5.9. A análise foi dividida em duas partes: primeiramente o disjuntor entre as barras 2 e 3 é considerado fechado, Caso A. Em seguida, agora com o dispositivo aberto, uma série de simulações foi realizada. O plano de medição apresentado na Tabela 5.25 foi utilizado como ponto

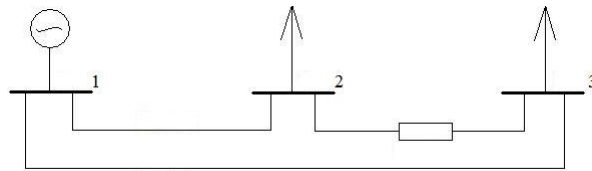


Fig. 5.9: Modelagem generalizada simplificada do sistema apresentado na Fig. 2.2

de partida para outras situações, discutidas na seqüência.

Caso A: dispositivo chaveável fechado

A aplicação do algoritmo proposto ao plano de medição apresentado na Tabela 5.25, para o caso do ramo chaveável fechado indica que o plano de medição é observável.

Tal resultado se repete ao se retirar **apenas** uma das medidas de injeção de potência, seja ela 1, 2 ou 3. O mesmo resultado é válido ao se retirar 2 medidas de injeção de potência, mas permanecendo ao menos a medida 2 ou 3.

Tabela 5.22: Plano de Medição para o Sistema IEEE 30 Barras

Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo
Barras	Ramos
1	1 – 3
2	2 – 4
4	2 – 5
6	4 – 6
10	5 – 7
12	6 – 7
18	6 – 8
19	6 – 9
21	6 – 10
24	9 – 11
	10 – 21
	10 – 22
	12 – 13
	12 – 14
	12 – 16
	14 – 15
	15 – 18
	15 – 23
	16 – 17
	18 – 19
	19 – 20
	25 – 26
	25 – 27
	29 – 30

Se houver um sistema no qual o vetor de medidas de injeção de potência é vazio mas com uma medida de fluxo em qualquer uma das extremidades do disjuntor o sistema permanece observável. Porém, se houver o vetor de injeção de potência

Tabela 5.23: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema IEEE 30 barras

Vetor de pesos das linhas da matriz U							
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
d_i ($\times 10^9$)	0	1.6072	0.7999	1.6472	0.1060	4.1575	0.1540
Resultado da EE "dc"	0	0	0	0	0	0	0
Variáveis de estado	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	θ_{14}
d_i ($\times 10^9$)	0.2127	0.1438	1.2656	0.0150	0.5165	0.0283	0.0386
Resultado da EE "dc"	0	0	0	0	0	0	0
Variáveis de estado	θ_{15}	θ_{16}	θ_{17}	θ_{18}	θ_{19}	θ_{20}	θ_{21}
d_i ($\times 10^9$)	0.0815	0.0390	0.0218	0.2314	0.4633	0.0131	1.5325
Resultado da EE "dc"	0	0	0	0	0	0	0
Variáveis de estado	θ_{22}	θ_{23}	θ_{23}	θ_{25}	θ_{26}	θ_{27}	θ_{28}
d_i ($\times 10^9$)	0.0182	0.0026	0	0.0332	0.0059	0	0.0260
Resultado da EE "dc"	0	0	1	2	2	2	0
Variáveis de estado	θ_{29}	θ_{30}					
d_i ($\times 10^9$)	0.0054	0					
Resultado da EE "dc"	3	3					

Tabela 5.24: Plano de Medição para o Sistema Teste da Figura 5.9

Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo
Barras	Ramos
1	1 – 2
2	3 – 1
3	

vazio e vetor de medidas de fluxo com apenas uma medida, o sistema é observável apenas com relação a θ . Isso ocorre também para o caso de se retirar as medidas 2 e 3 de injeção de potência, o sistema passa a ser não observável com relação aos fluxos, permanecendo observável em relação a θ .

Tabela 5.25: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A1

Vetor de pesos das linhas da matriz U					
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	t_{23}	Pivô nulo
d_i ($\times 10^9$)	0,0000	1,1322	0,5940	0,0010	θ_1

Tabela 5.26: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A1

Estados Estimados		Fluxos Estimados	
Variável de Estado	Valor Estimado	Ramo Convencional	Fluxo
θ_1	0,0000	1 – 2	1,0281
θ_2	-0,0514	1 – 3	0,7724
θ_3	-0,0515	Ramo Chaveável	Fluxo
t_{23}	0,1285	2 – 3	0,1285

Ao se retirar todas as medidas do plano de medição, tem-se um sistema não-observável, porém o dispositivo chaveável é observável com relação a θ (consequência da restrição operacional apresentada no Capítulo 2 pela presença deste tipo de ramo na rede). O resultado obtido pelo método proposto para este caso é apresentado nas Tabelas 5.27 e 5.28.

Tabela 5.27: Resultados da Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A2

Vetor de pesos das linhas da matriz U					
Variáveis de estado	θ_1	θ_2	θ_3	t_{23}	Pivôs nulos
d_i ($\times 10^9$)	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	$\theta_1, \theta_3,$
Resultado da EE "dc"	0	2	2	1	t_{23}

Caso B: dispositivo chaveável aberto

Considerando o mesmo plano de medição apresentado na Tabela 5.25, obtém-se um sistema observável para a configuração com o disjuntor aberto, per-

Tabela 5.28: Análise de Observabilidade Numérica do Sistema - Caso A2

Ilhas	Barras	Ramos Não-Observáveis
1	1	1 – 2
2	2, 3	1 – 3
	Variável de Estado	
3	t_{23}	

manecendo observável ao se retirar uma, duas ou todas as medidas de injeção de potência.

O sistema se torna parcialmente observável, ou seja, observável apenas com relação ao fluxo, quando se tem apenas uma medida de fluxo e nenhuma de injeção de potência.

Ao se retirar todo o plano de medição o sistema como um todo torna-se evidentemente não-observável, porém o dispositivo chaveável permanece observável com relação ao fluxo (novamente devido às restrições operacionais apresentadas no Capítulo 2).

5.5 Conclusões

Neste Capítulo, foram apresentados primeiramente os resultados obtidos para a análise do fluxo de carga proposta no Capítulo 2. Tal metodologia se mostrou vantajosa e eficiente, com resultados satisfatórios e compatíveis com os balanços de potência do sistema.

Em seguida, mostram-se os resultados obtidos com o algoritmo proposto para a análise numérica de observabilidade convencional e generalizada via método de Givens.

Com relação aos primeiros, verifica-se que o programa responde de maneira coerente, fornecendo resultados em concordância com outros métodos de análise propostos na literatura.

O método de análise generalizada de observabilidade ainda exige maiores

testes, apesar de demonstrar até o momento resultados satisfatórios e em concordância com o esperado pelo algoritmo. Pode-se perceber que a observabilidade numérica generalizada do sistema passa a ser analisada em duas partes, uma em relação às tensões nodais e outra em relação aos fluxos de potência nos ramos chaveáveis da rede. Com isso, um dispositivo chaveável fechado é sempre observável em relação a θ , mas, com relação ao fluxo no ramo chaveável, a observabilidade depende das condições do plano de medição. Para o caso do disjuntor aberto, tem-se a situação inversa, pois este é sempre observável em relação ao fluxo, mas, com relação às tensões nodais, a observabilidade depende do conjunto de medidas do plano de medição.

6

Conclusões Gerais

A importância da análise de observabilidade para problemas de estimação de estados é um tópico relevante na literatura técnica pertinente à área. Apesar dos planos de medição serem projetados para tornar as redes elétricas observáveis, a necessidade de identificação de problemas em tempo real para situações de emergência justifica a importância da disponibilidade de ferramentas ágeis e eficientes para análise de observabilidade.

Este trabalho busca contribuir para a análise de observabilidade do ponto de vista numérico propondo um algoritmo baseado em métodos ortogonais sem raízes quadradas, também conhecido como Método de Givens com três multiplicadores. O algoritmo desenvolvido visa a aplicação tanto a estudos de estimação de estados convencional quanto à estimação de estados generalizada, na qual a rede é representada no nível de seção de barra.

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais referentes à metodologia desenvolvida e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Fluxo de Potência Desacoplado Rápido no Nível de Seção de Barra

Este trabalho apresentou a extensão da formulação do fluxo de potência desacoplado rápido, permitindo a representação explícita de chaves e disjuntores.

Após a descrição dos aspectos teóricos do fluxo de potência desacoplado rápido estendido, a metodologia proposta foi aplicada a sistemas-teste derivados dos sistemas do IEEE de 24 e 30 barras. Para cada rede, foram selecionadas subestações com diferentes arranjos, que foram então modeladas no nível de seção de barras. Os resultados obtidos para diferentes estudos de caso mostram os benefícios da ferramenta proposta. Em aplicações em tempo real, por exemplo, o método proposto fornece um rápido meio para analisar o impacto da operação do disjuntor na distribuição do fluxo de energia em toda a rede, incluindo componentes da subestação. Além da modelagem em tempo real, o método do fluxo de potência estendido também encontra aplicações em outras áreas, tais como estudos de comutação corretiva [45–47].

6.2 Observabilidade Numérica via Givens

Esta dissertação também propôs um algoritmo de análise de observabilidade numérica baseado nas rotações de Givens utilizando três multiplicadores. Além de se beneficiar da robustez numérica superior dos métodos ortogonais, o método aproveita as características próprias das rotações de Givens sem raízes quadradas e três multiplicadores. Especificamente, os fatores de ponderação associados às linhas do fator triangular da matriz de observação são usados como indicadores da observabilidade das variáveis de estado correspondentes. Como tais fatores de ponderação são subprodutos da aplicação das rotações ao Jacobiano, o custo computacional associado é muito baixo. Outra vantagem computacional importante advém do fato de que o método não requer a formação da matriz ganho, já que opera diretamente com

a matriz Jacobiana (ou matriz de observação, no caso do uso de modelo "dc" para a rede) da estimação de estados.

Os testes realizados para sistemas modelados no nível *barra-ramo* demonstram a validade do método ortogonal proposto para análise de observabilidade numérica, já que os resultados obtidos são todos consistentes com casos já relatados na literatura pertinente à área.

Ao estendermos o algoritmo para sistemas modelados no nível de seção de barras, seu desempenho não foi alterado, mostrando que é possível estender o uso de métodos ortogonais para a análise de observabilidade numérica generalizada de sistemas elétricos de potência.

Contudo, maiores investigações devem ser realizadas a este respeito para aprofundar os conceitos associados à análise de observabilidade numérica generalizada, pois aqui foram apresentadas apenas análises preliminares conduzidas a partir da aplicação do algoritmo proposto.

6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Aprofundar os estudos sobre análise de observabilidade numérica generalizada, em busca de conclusões mais embasadas sobre as modalidades de observabilidade com relação às tensões nodais e observabilidade em relação aos fluxos de ramos chaveáveis;

- Comparar os resultados da análise numérica de observabilidade proposta com as conclusões sobre observabilidade topológica generalizada da referência [30] da dissertação;

- Investigar formas de concluir sobre a criticidade de medidas a partir da análise numérica de observabilidade via rotações de Givens proposta;

- Avaliar o impacto da inclusão de medidas provenientes de PMUs na observabilidade numérica do sistema;

- Estender a metodologia de observabilidade numérica proposta para o modelo AC;

- Estudos sobre a aplicação de algoritmos oriundos da teoria de grafos para detectar malhas formadas por disjuntores fechados com o objetivo de automatizar os procedimentos propostos em [30].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Monticelli and Felix F. Wu. Network observability:theory. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5):1042–1048, May 1985.
- [2] A. Monticelli and Felix F. Wu. Network observability: Identification of observable islands and measurement placement. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(5):1035–1041, May 1985.
- [3] A. Monticelli and A. Garcia. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, 6(4):1561–1570, Nov 1991.
- [4] A. Monticelli and A. Garcia. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE/PES Winter Meeting, Nova York, EUA*, 8(1):364 – 370, Jan 1991.
- [5] O. Alsac, N. Vempati, B. Stott, and A. Monticelli. Generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 13(3):1069 – 1075, Aug 1998.
- [6] A. Monticelli. Electric power system state estimation. *Proceedings of the IEEE*, 88(2):262 – 282, Feb 2000.
- [7] E. M. Lourenço. Análise de observabilidade e identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada. *Universidade Federal de Santa Catarina*, Tese de Doutorado, Dez 2001.
- [8] M. R. Irving. Robust algorithm for generalized state estimation. *Carta submetida ao IEEE PES Letters*, 2009.

-
- [9] Ali Abur and A. G. Expósito. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. CRC Press, 1 edition, March 2004.
- [10] A. Clements and A. Simões Costa. Topology error identification using normalized lagrange multipliers. *IEEE Transaction on Power Systems*, 13(2):347 – 353, May 1998.
- [11] F. Vieira. Identificação de erros de topologia em sistemas de potência através de métodos ortogonais e testes de hipóteses. *Universidade Federal de Santa Catarina*, Dissertação de Mestrado, Fev 2001.
- [12] L. B. Souza. Estimacão de estado generalizada com processamento de erros de topologia e erros de medidas. *Universidade Federal do Paraná*, Dissertação de Mestrado, Nov 2007.
- [13] R. Ribeiro Pinto Jr. Fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestacão. *Universidade Federal do Paraná*, Dissertação de Mestrado, 2005.
- [14] E. M. Lourenço, R. R. Pinto Jr., and A. J. A. Simões Costa. Power flow at substation level using Newton-Raphson’s method. *X SEPOPE, Florianópolis, SC, Brasil*, May 2006.
- [15] E. M. Lourenço, A. Simões Costa, and R. Ribeiro. Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *IEEE Transactions on Power Systems*, (0885-8950), Feb 2010.
- [16] K. A. Clements and B. F. Wollenberg. An algorithm for observability determination in power system state estimation. Jul. 1975.
- [17] J. J. Allemong, G. D. Irisarri, and A. M. Sasson. An examination of solvability for state estimation algorithms. *Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting*, Feb 1980.

-
- [18] G. R. Krumpholz, K. A. Clements, and P. W. Davis. Power system observability: A practical algorithm using network observability. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99:1534–1542, 1980.
- [19] V. H. Quintana, A. J. A. Simões Costa, and A. Mandel. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(3):617–626, 1982.
- [20] A. J. A. Simões Costa and A. Mandel. Abordagem topológica para a observabilidade de sistemas de potência: Teoria e um algoritmo. *Revista SBA: Controle e Automação*, 1(1), Set 1987.
- [21] A. Simões Costa, T. S. Piazza, and A. Mandel. Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation”. *IEEE Trans. on Power Systems*, (3):941–949, Aug. 1990.
- [22] T. Van Cutsem and P. J. Gailly. A simple algorithm for power system observability analysis and related functions. *IFAC Symposium on Control Application to Power System Security, Belgium*, 1983.
- [23] A. Monticelli and F. F. Wu. Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(1):201 – 206, Feb 1986.
- [24] Bei Gou and A. Abur. A direct numerical method for observability analysis. *IEEE Transaction on Power Systems*, 15(2):625 – 630, May 2000.
- [25] Bei Gou and A. Abur. An improved measurement placement algorithm for network observability. *IEEE Transaction on Power Systems*, 16(4):819 – 824, Nov 2001.
- [26] Bei Gou. Extension of observability analysis to hachtel’s augmented matrix. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 5:5282 – 5285, May 2005.

- [27] Bei Gou. Observability analysis by measurement Jacobian matrix for state estimation. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 4:3881 – 3884, May 2005.
- [28] G. N. Korres and P. J. Katsikas. A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory. *IEEE Transaction on Power Systems*, 18(1):295 – 304, Feb 2003.
- [29] G. N. Korres, P. J. Katsikas, and K. A. Clements. Numerical observability analysis based on network graph theory. *IEEE Transaction on Power Systems*, 18(3):1035 – 1045, Aug 2003.
- [30] A. Simões Costa, E. M. Lourenço, and A. Clements. Power system topological observability analysis including switching branches. *IEEE Transaction on Power Systems*, 17(2):250 – 256, May 2002.
- [31] A. Monticelli. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, 8(1):1561–1570, Feb 1993.
- [32] G. B. Rosas. Modelagem de redes no nível de subestação para estudos de fluxo de potência Ótimo. *Universidade Federal do Paraná*, Dissertação de Mestrado, Mar 2008.
- [33] E. M. Lourenço, G. B. Rosas, and T. S. P. Fernandes. Modelagem de redes no nível de subestação para estudos de fluxo de potência Ótimo. *XI SEPOPE, Belém, PA, Brasil*, Mar 2009.
- [34] E. M. Lourenço, N. S. Silva, and A. J. A. Simões Costa. Fast decoupled steady-state solution for power networks modeled at the bus section level. *IEEE Bucharest Power Tech*, Jun 2009.
- [35] A.J. A. Simões Costa and V. H. Quintana. An orthogonal row-processing algorithm for power system sequential state estimation. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, PAS-100(8):3791 – 3800, Aug 1981.

- [36] A. Simões Costa and R. Salgado. *Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência*. Notas de Aula, UFSC, Set 2002.
- [37] A. Monticelli. *State Estimation in Electric Power Systems: A generalised Approach*. Springer, 1 edition, May 1999.
- [38] A. Monticelli. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, 8:364 – 370, Feb 1993.
- [39] G. N. Korres and P. J. Katsikas. Unified observability analysis and measurement placement in generalized state estimation. *IEEE Transaction on Power Systems*, 18(1):324 – 333, Feb 2003.
- [40] A. Monticelli and A. Garcia. *Introdução a Sistemas de Energia Elétrica*. UNICAMP, 2003.
- [41] B. Stott and O. Alsac. Fast decoupled power flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3:859 – 869, May 1974.
- [42] W. M. Gentleman. Least squares computations by givens transformations without square roots. *Journal of Inst. Math Applics*, (12):329 – 336, 1973.
- [43] E. M. Lourenço, A. J. A. Simões Costa, and K. A. Clements. Bayesian-based hypothesis testing for topological error identification in generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2):1206–1215, May 2004.
- [44] IEEE RTS Task Force of APM Subcommittee. Ieee reliability test system. *IEEE Power Apparatus and Systems*, 98(6):2047–2054, Nov/Dec 1979.
- [45] A. A. Mazi, B. F. Wollenberg, and M. H. Hesse. Corrective control of power systems flows by line and bus-bar switching. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1(3):258 – 265, Aug 1986.
- [46] P. S. Wrubel, J. N. Rapcienski, K. L. Lee, Gisin B. S., and G. W. Woodzell. Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications. *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(1):415–421, Feb 1996.

-
- [47] G. Granelli, Montagna M., F. Zanellini, P. Bresesti, and R. Vailati. A genetic algorithm-based procedure to optimize system topology against parallel flows. *IEEE Transactions on PWRS*, 21(1):333–340, Feb 2006.