

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR SILVA DE FREITAS

PROCESSAMENTO DO *STATUS* DE DISPOSITIVOS
CHAVEÁVEIS COMO INFORMAÇÃO *A PRIORI* NA
ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E
TOPOLOGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA

Florianópolis

2015

VICTOR SILVA DE FREITAS

**PROCESSAMENTO DO *STATUS* DE DISPOSITIVOS
CHAVEÁVEIS COMO INFORMAÇÃO *A PRIORI* NA
ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E
TOPOLOGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Elé-
trica para a obtenção do Grau de Mes-
tre em Engenharia Elétrica.

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

Florianópolis

2015

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

Freitas, Victor Silva de

Processamento do Status de Dispositivos Chaveáveis como
Informação A Priori na Estimção Integrada de Estados e
Topologia em Sistemas Elétricos de Potência / Victor Silva
de Freitas ; orientador, Antonio José Alves Simões Costa -
Florianópolis, SC, 2015.

193 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimção de Estados em
Sistemas Elétricos de Potência. 3. Estimção Integrada de
Estados e Topologia. 4. Algoritmos Ortogonais. 5.
Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência. I. Simões
Costa, Antonio José Alves. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

VICTOR SILVA DE FREITAS

PROCESSAMENTO DO *STATUS* DE DISPOSITIVOS
CHAVEÁVEIS COMO INFORMAÇÃO *A PRIORI* NA
ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E
TOPOLOGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE
POTÊNCIA

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

Florianópolis, 30 de Abril 2015.

Prof. Carlos Galup Montoro, Dr.
Coordenador do Curso

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

Banca Examinadora:

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina
Presidente

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, Dr.
Universidade Federal Fluminense

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Katia Campos de Almeida, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Aos meus pais, Raimundo Clarivaldo e
Lindalva.
À minha avó, Luzia Gadelha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Raimundo Clarivaldo Freitas e Lindalva Freitas pela constante presença e dedicação durante esta caminhada. À minha madrinha Iraneide Gadelha, minha segunda mãe, por sempre estar ao meu lado. Ao restante da minha família por terem me apoiado sempre que preciso.

Agradeço ao meu orientador, professor Antonio Simões Costa, pela confiança, dedicação e sabedoria, empregados para o desenvolvimento deste trabalho.

À Dayse Pastana, pelo amor, carinho, compreensão e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos professores do Grupo de Sistema de Potência, pelo conhecimentos transmitidos durante o curso.

Aos colegas do Labspot, pela convivência e companheirismo.

Aos grandes amigos que Florianópolis me proporcionou: Nadja Magalhães, Cláudio Claudino, Marcelo Olinda, Anna Brito e Hugo Tavares.

E por fim, agradeço a todos aqueles que de alguma forma me apoiaram e me incentivaram para o desenvolvimento e conclusão desse projeto.

*“Tudo vale a pena quando a alma não é
pequena”.*
(Fernando Pessoa)

RESUMO

PROCESSAMENTO DO *STATUS* DE DISPOSITIVOS CHAVEÁVEIS COMO INFORMAÇÃO *A PRIORI* NA ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E TOPOLOGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Victor Silva de Freitas

Florianópolis

2015

Este trabalho apresenta uma proposta para a estimação simultânea das variáveis de estado e da topologia da rede no contexto da modelagem em tempo real do sistema elétrico de potência. O método considera a modelagem no nível de seção de barra para parte do sistema, de modo que as subestações selecionadas são representadas de forma explícita pelos disjuntores, chaves e conexões que as formam. A metodologia proposta é baseada nas informações disponíveis sobre os *status* de tais dispositivos, que são tratadas como informação *a priori* da topologia para ser processada por um estimador especializado. O resultado abrange não somente estimativas para os estados convencionais do sistema, mas também para a topologia da rede. Desta maneira, a topologia presumida é, ao final do processo, validada ou corrigida com base nas informações contidas nas medidas analógicas disponíveis ao estimador de estados. Para resolver o problema de Estimação Integrada de Estados e Topologia, utiliza-se neste trabalho a formulação pelo método dos mínimos quadrados ponderados, cuja solução é obtida mediante um algoritmo baseado na versão rápida das rotações ortogonais de Givens. Entretanto, a dissertação também aborda o processamento de erros grosseiros tendo por base outros algoritmos de estimação de estados fundamentados no método dos mínimos quadrados ponderados. O desempenho da estimação integrada de estados e topologia é avaliado e validado através da sua aplicação aos sistemas-teste IEEE 14, 30 e 57 barras.

Palavras-chave: Estimação de Estados em Sistemas Elétricos de Potência; Estimação Integrada de Estados e Topologia; Informação *A Priori* da Topologia; Algoritmos Ortogonais; Modelagem em Tempo Real de Sistemas de Potência.

ABSTRACT

PROCESSING OF SWITCHING BRANCH STATUSES AS A *PRIORI* INFORMATION IN THE INTEGRATED STATE AND TOPOLOGY ESTIMATION OF ELECTRIC POWER SYSTEMS

Victor Silva de Freitas

Florianópolis
2015

This research addresses the simultaneous estimation of state variables and network topology in the context of power system real-time modeling. The proposed method assumes that selected substations are modeled at the bus section level, so that the corresponding circuit breakers and disconnects are explicitly represented. Available information on the statuses of such switching branches are then treated as *a priori* topology information to be processed by a specialized estimator. Its outcome comprises estimates not only for the conventional states, but also for the network topology. Therefore, the initially assumed topology will eventually be either validated or corrected, on the basis of the information conveyed by real-time measurements to the state estimator. To solve the integrated state and topology estimation problem, the problem is formulated by using the weighted least-squares method and an algorithm based on a fast version of orthogonal Givens rotations is employed. Furthermore, it is shown that the bad data processing capabilities of weighted least-squares state estimators are preserved. The performance and validation of the joint estimator is assessed through its application to IEEE 14-bus, 30-bus and 57-bus test systems.

Keywords: Power System State Estimation; Integrated State and Topology Estimation; *A Priori* Topology Information; Orthogonal Algorithms; Power System Real-Time Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estrutura básica da estimação de estados	43
Figura 4.1	Fluxograma do método de EIET resolvido pela Equação Normal	74
Figura 4.2	Fluxograma do problema de EIET resolvido pelo método sequencial ortogonal baseado nas rotações rápidas de Givens	82
Figura 4.3	Fluxograma do método de EIET (<i>Algoritmo_EIET</i>) .	90
Figura 4.4	Sistema-teste de 5 nós e 4 ramos chaveáveis	91
Figura 4.5	Desvios dos Estados de Tensão Nodal	109
Figura 4.6	Desvios dos Estados de Fluxo	109
Figura 5.1	Sistema IEEE 14 barras com plano de medição	114
Figura 5.2	Detalhamento das subestações 6 e 13 no nível de seção de barras	115
Figura 5.3	Sistema IEEE 30 barras com plano de medição	135
Figura 5.4	Detalhamento das subestações 12, 16, 17, 5 e 7 no nível de seção de barras	136
Figura 5.5	Sistema IEEE 57 barras com plano de medição	145
Figura 5.6	Detalhamento das subestações 12,14,15,16 e 17 no nível de seção de barras	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Parâmetros de Linhas do Sistema-teste.....	92
Tabela 4.2	Valores do Plano de Medição do Sistema-teste.....	92
Tabela 4.3	Decréscimo dos Termos da Função-Objetivo (EIET - 1)	98
Tabela 4.4	Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ (EIET - 1)	99
Tabela 4.5	Valores das Tensões Complexas nas Barras (EIET - 1)	99
Tabela 4.6	Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis (EIET - 1).	99
Tabela 4.7	Erros de Estimacão dos Estados (EIET - 1)	100
Tabela 4.8	Análise de Erro Grosseiro	101
Tabela 4.9	Termos da Função-Objetivo ao Final da Primeira Iteracão	101
Tabela 4.10	Limiares para as Variáveis de Estado de Fluxo.....	102
Tabela 4.11	Estimacão e Validacão da Topologia.....	102
Tabela 4.12	Decréscimo dos Termos da Função-Objetivo (EIET - 2)	104
Tabela 4.13	Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ (EIET - 2)	104
Tabela 4.14	Valores das Tensões Complexas nas Barras (EIET - 2)	105
Tabela 4.15	Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis (EIET - 2).	105
Tabela 4.16	Erros de Estimacão dos Estados (EIET - 2)	106
Tabela 4.17	Termos da Função-Objetivo ao Final da Segunda Iteracão	106
Tabela 4.18	Limiares para as Variáveis de Estado de Fluxo.....	106
Tabela 4.19	Estimacão e Validacão da Topologia.....	107
Tabela 4.20	Termos da Função-Objetivo no Processo Iterativo	108
Tabela 5.1	Síntese dos Casos Simulados - IEEE 14 Barras.....	116
Tabela 5.2	Termos da Função-Objetivo do Processo de Convergência - <i>Caso A1</i>	117
Tabela 5.3	Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ - <i>Caso A1</i>	117
Tabela 5.4	Valores das Tensões Complexas nas Barras na Primeira Iteracão - <i>Caso A1</i>	118
Tabela 5.5	Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis na Primeira Iteracão - <i>Caso A1</i>	119

Tabela 5.6	Termos da Função-Objetivo do Processo de Convergência na Segunda Iteração - <i>Caso A1</i>	119
Tabela 5.7	Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ - <i>Caso A1</i>	120
Tabela 5.8	Valores das Tensões Complexas nas Barras na Segunda Iteração - <i>Caso A1</i>	120
Tabela 5.9	Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis na Segunda Iteração - <i>Caso A1</i>	121
Tabela 5.10	Validação da Topologia - Exclusão Simples - <i>Caso A1</i>	121
Tabela 5.11	Função-Objetivo - Exclusão Simples - <i>Caso A1</i>	122
Tabela 5.12	Comparação dos Algoritmos - Exclusão Simples - <i>Caso A1</i>	122
Tabela 5.13	Função-objetivo - Exclusão Múltipla - <i>Caso A2</i>	123
Tabela 5.14	Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - <i>Caso A2</i>	124
Tabela 5.15	Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - <i>Caso A2</i>	124
Tabela 5.16	Função-objetivo - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	125
Tabela 5.17	Validação da Topologia - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	125
Tabela 5.18	Valores das Tensões Complexas da Subestação 6 - <i>Caso B</i>	126
Tabela 5.19	Valores dos Fluxos no Disjuntor <i>D3</i> - <i>Caso B</i>	126
Tabela 5.20	Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	127
Tabela 5.21	Função-objetivo - <i>by pass</i> - <i>Caso C</i>	127
Tabela 5.22	Validação da Topologia - <i>by pass</i> - <i>Caso C</i>	127
Tabela 5.23	Comparação dos Algoritmos - <i>by pass</i> - <i>Caso C</i>	128
Tabela 5.24	Função-objetivo - Partida Plana - <i>Caso D</i>	129
Tabela 5.25	Validação da Topologia - Partida Plana - <i>Caso D</i>	129
Tabela 5.26	Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - <i>Caso D</i>	129
Tabela 5.27	Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - <i>Caso E</i>	130
Tabela 5.28	Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 14 barras	131
Tabela 5.29	Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,020$	132
Tabela 5.30	Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com	

$k_p = 0,001$	133
Tabela 5.31 Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,10$	133
Tabela 5.32 Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,40$	133
Tabela 5.33 Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,70$	134
Tabela 5.34 Síntese dos Casos Simulados - IEEE 30 Barras.....	137
Tabela 5.35 Função-Objetivo - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	138
Tabela 5.36 Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	138
Tabela 5.37 Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	139
Tabela 5.38 Validação da Topologia - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	140
Tabela 5.39 Função-Objetivo - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	140
Tabela 5.40 Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	141
Tabela 5.41 Função-Objetivo - Partida Plana - <i>Caso C</i>	141
Tabela 5.42 Validação da Topologia - Partida Plana - <i>Caso C</i>	141
Tabela 5.43 Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - <i>Caso C</i>	142
Tabela 5.44 Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - <i>Caso D</i>	143
Tabela 5.45 Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 30 barras.....	144
Tabela 5.46 Iterações da EIET para o Sistema IEEE 30 barras, com $k_p = 0,020$	144
Tabela 5.47 Síntese dos Casos Simulados - IEEE 57 Barras.....	146
Tabela 5.48 Função Objetivo - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	148
Tabela 5.49 Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	148
Tabela 5.50 Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - <i>Caso A</i>	150
Tabela 5.51 Validação da Topologia - Inclusão de Ramos - <i>Caso B</i>	150
Tabela 5.52 Função-Objetivo - Inclusão de Ramos - <i>Caso B</i>	151
Tabela 5.53 Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - <i>Caso B</i>	152
Tabela 5.54 Validação da Topologia - Partida Plana - <i>Caso C</i>	152
Tabela 5.55 Função-Objetivo - Partida Plana - <i>Caso C</i>	153
Tabela 5.56 Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - <i>Caso C</i>	154

Tabela 5.57 Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - <i>Caso D</i>	154
Tabela 5.58 Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 57 barras	156
Tabela 5.59 Iterações da EIET para o Sistema IEEE 57 barras, com $k_p = 0,020$	156
Tabela 5.60 Síntese dos Casos Simulados para Erros Grosseiros ...	157
Tabela 5.61 Resultados da Identificação de Medidas após Detecção para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras - <i>Algoritmo GMA.INT</i>	160
Tabela 5.62 Resultados da Identificação de Medidas após Detecção para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras - <i>Algoritmo GMA.EXT</i>	161
Tabela A.1 Dados das Barras do Sistema IEEE 14 Barras	171
Tabela A.2 Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 14 Barras	171
Tabela B.1 Dados das Barras do Sistema IEEE 30 Barras	175
Tabela B.2 Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 30 Barras	176
Tabela C.1 Dados das Barras do Sistema IEEE 57 Barras	181
Tabela C.2 Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 57 Barras	182

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SEP	Sistemas Elétricos de Potência
EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência
COS	Centros de Operação do Sistema
EE	Estimador de Estados
SCADA	Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados
FPO	Fluxo de Potência Ótimo
N-R	Método de Newton-Raphson
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
MVAP	Mínimos Valores Absolutos Ponderados
EEG	Estimação de Estados Generalizada
CET	Coestimação de Estados e Topologia
CNET	Coestimação Não-Linear de Estados e Topologia
MPDPI	Método Primal Dual de Pontos Interiores
G3M	Rotações de Givens com Três Multiplicadores
EENSB	Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra
EIET	Estimação Integrada de Estados e Topologia
GMA.INT	Estimação Integrada via Rotações de Givens e Método de Ajuste Interno
GMA.EXT	Estimação Integrada via Rotações de Givens e Método de Ajuste Externo
Eq.Normal	Estimação Integrada via Equação Normal e Método de Ajuste Externo

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número de Barras do Sistema
m	Número de Medidas
\mathbf{z}_m	Vetor de Medidas
\mathbf{x}	Vetor dos Estados Verdadeiros
n	Número de Estados Convencionais do Sistema
\mathbf{h}_m	Vetor de Funções Não-Lineares das Medidas
ε_m	Vetor de Erros Aleatórios de Medição
σ	Desvio Padrão
σ^2	Variância
\mathbf{R}_m	Matriz de Covariância das Medias
$E\{\cdot\}$	Operador Expectância
ρ	Redundância Global do Modelo de Medição
\mathbf{r}	Vetor dos Resíduos das Medidas
$\hat{\mathbf{x}}$	Vetor de Estados Estimados
$J(\cdot)$	Função-Objetivo
$\sum_{i=1}^m$	Somatório de $i = 1$ até m
$\bar{\mathbf{x}}$	Vetor das Estimativas <i>A Priori</i> dos Estados
\mathbf{P}	Matriz de Covariância dos Estados <i>A Priori</i>
<i>Min</i>	Minimizar
∂	Operador de Derivada Parcial
\mathbf{H}_m	Matriz Jacobiana das Medidas do Sistema
Δ	Operador Incremento
k	Iteração Corrente
\mathbf{G}	Matriz Ganho
T	Transposto
∇	Operador Gradiente
$Cond(\cdot)$	Operador Condicionamento Numérico
$\ \cdot\ $	Norma Euclidiana
\mathbf{Q}	Matriz Ortogonal
\mathbf{U}	Matriz Triangular Superior
c	Escalar da Transformação Linear
s	Escalar da Transformação Linear

$\mathbf{\check{u}}$	Vetor da i -ésima linha de \mathbf{U}
\check{p}	Vetor-linha
\mathbf{D}	Matriz Diagonal
$\bar{\mathbf{U}}$	Matriz Triangular Superior Unitária
d	Valor Escalar de Ponderação de um Estado
w	Valor Escalar de Ponderação de uma Medida
$\bar{\sigma}$	Variância da Informação <i>a priori</i>
\mathbf{C}_r	Matriz de Covariância dos Resíduos
Σ	Matriz de Covariância dos Erros de Estimação
r^N	Resíduo Normalizado
χ^2	Qui-Quadrado
K	Percentil Limiar
ℓ	Número de Graus de Liberdade
α	Probabilidade de Falso Alarme
$\hat{\beta}$	Amplitude do Erro Grosseiro
\hat{b}	Magnitude do Erro Grosseiro
λ	Limiar Escalar
\mathbf{Z}	Matriz
n_a	Número de Estados Generalizados
n_d	Número de Disjuntores
$\mathbf{h}_o(\cdot)$	Vetor de Equações Não-Lineares de Restrições Operacionais
$\mathbf{h}_s(\cdot)$	Vetor de Equações Não-Lineares de Restrições Estruturais
\mathbf{R}_s	Matriz de Covariância das Restrições Estruturais
\mathbf{R}_o	Matriz de Covariância das Restrições Operacionais
V	Magnitude de Tensão
δ	Ângulo de Tensão Nodal
t_{ij}	Medida ou Estado de Fluxo de Potência Ativa em Ramo
u_{ij}	Medida ou Estado de Fluxo de Potência Reativa em Ramo
P	Medida de Injeção de Potência Ativa
Q	Medida de Injeção de Potência Reativa
p_{ii}	Variância dos Disjuntores
k_p	Constante de Calibração
M_V	Métrica de Tensão Complexa
M_t	Métrica de Fluxo de Potência Ativa

M_u	Métrica de Fluxo de Potência Reativa
ϕ_∞	Valor Infinito
ε_{fluxo}	Limiar para Fluxo em Disjuntor
$J_r(\cdot)$	Termo dos Resíduos das Medidas na Função-Objetivo
$J_{InfP}(\cdot)$	Termo das Informações <i>A Priori</i> na Função-Objetivo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	31
1.1 Introdução	31
1.2 Revisão Bibliográfica	33
1.2.1 Níveis de Modelos da Rede Elétrica	33
1.2.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência	34
1.2.3 Processamento e Análise de Erros de Topologia	36
1.2.4 Estimação Integrada de Estados e Topologia	37
1.3 Objetivos e Contribuições da Dissertação	39
1.4 Organização da Dissertação	40
2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	41
2.1 Introdução	41
2.2 Aspectos Gerais da Estimação de Estados	41
2.2.1 Modelo de Medição	43
2.3 Estimação de Estados via Método dos Mínimos Quadrados ..	45
2.3.1 Inclusão das Informações <i>A Priori</i>	46
2.4 Métodos de Solução	47
2.4.1 Método da Equação Normal	47
2.4.2 Método Sequencial-Ortogonal	49
2.4.2.1 Rotações de Givens	51
2.4.2.2 Rotações de Givens com Três Multiplicadores	52
2.4.2.3 Tratamento das Informações <i>A Priori</i>	54
2.5 Técnicas de Processamento de Medidas com Erros Grosseiros	55
2.5.1 Matrizes de Covariância e Resíduo Normalizado	56
2.5.2 Testes de Hipóteses	57
2.5.2.1 Teste- $J(\hat{x})$ para a Detecção de Erros Grosseiros	57
2.5.2.2 Teste- \hat{b} para a Detecção e Identificação de Erros Grosseiros	58
2.5.3 Processamento de Erros Grosseiros via Rotações de Givens	59
2.5.3.1 Detecção	59
2.5.3.2 Identificação	60
2.5.3.3 Remoção	61
2.6 Conclusão	61

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA	63
3.1 Introdução	63
3.2 Expansão do Modelo Convencional	63
3.3 Formulação do Problema de Otimização Restrita	66
3.3.1 Condições Operacionais	66
3.3.2 Restrições Estruturais	67
3.3.3 Formulação do Problema de EENSB	68
3.3.4 Restrições de Igualdade como Pseudomedidas	69
3.4 Conclusão	70
4 ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E TOPOLOGIA..	71
4.1 Introdução	71
4.2 Formulação do Problema	72
4.2.1 Informação <i>A Priori</i> de Topologia: <i>Método de Ajuste Externo</i>	74
4.3 Solução via Rotações de Givens	76
4.3.1 Método de Ajuste Externo via G3M	77
4.3.2 Representação da Topologia da Rede Utilizando a Matriz \bar{U}^0 : <i>Método de Ajuste Interno</i>	78
4.3.3 Algoritmo	80
4.4 Índices de Desempenho do Estimador	83
4.5 Validação da Topologia	85
4.6 Análise de Erro Grosseiro	86
4.7 Algoritmo da EIET	89
4.8 Aplicação Ilustrativa da EIET	91
4.8.1 Análise Comparativa dos Algoritmos de EIET	107
4.9 Conclusão	109
5 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES	111
5.1 Introdução	111
5.2 Ambiente de Simulação e Considerações Computacionais	111
5.3 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras	113
5.3.1 Sistema de 14 Barras - Caso A1	116
5.3.2 Sistema de 14 Barras - Caso A2	123
5.3.3 Sistema de 14 Barras - Caso B	124
5.3.4 Sistema de 14 Barras - Caso C	127

5.3.5	Sistema de 14 Barras - Caso D	128
5.3.6	Sistema de 14 Barras - Caso E	129
5.3.7	Consolidação de Resultados para o Sistema de 14 Barras ..	130
5.3.8	Análise de Sensibilidade da EIET com Respeito a k_p	132
5.4	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 30 Barras	134
5.4.1	Sistema de 30 Barras - Caso A	137
5.4.2	Sistema de 30 Barras - Caso B	139
5.4.3	Sistema de 30 Barras - Caso C	141
5.4.4	Sistema de 30 Barras - Caso D	142
5.4.5	Consolidação dos Resultados para o Sistema de 30 Barras .	143
5.5	Resultados para o Sistema-Teste IEEE 57 Barras	145
5.5.1	Sistema de 57 Barras - Caso A	148
5.5.2	Sistema de 57 Barras - Caso B	150
5.5.3	Sistema de 57 Barras - Caso C	152
5.5.4	Sistema de 57 Barras - Caso D	154
5.5.5	Consolidação dos Resultados para o Sistema de 57 Barras .	154
5.6	Processamento de Erros Grosseiros na EIET	157
5.7	Análise Geral dos Resultados	162
5.8	Conclusão	163
6	CONCLUSÕES GERAIS	165
6.1	Considerações Finais	165
6.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	167
	APÊNDICE A – SISTEMA IEEE 14 BARRAS	171
	APÊNDICE B – SISTEMA IEEE 30 BARRAS	175
	APÊNDICE C – SISTEMA IEEE 57 BARRAS	181
	REFERÊNCIAS	187

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

A operação em tempo real de Sistemas Elétricos de Potência (SEP) tem como principal objetivo garantir o suprimento de energia elétrica aos consumidores, com qualidade e economia de serviço. Os critérios de qualidade de suprimento exigem que os níveis de tensão, frequência, fluxos nas linhas de transmissão e carregamento dos equipamentos inseridos na rede sejam mantidos dentro de faixas ou limites de segurança. Para alcançar estes objetivos, é importante que sejam disponibilizadas ao Operador do sistema elétrico informações em tempo real sobre a condição operativa corrente do SEP, de modo a viabilizar a tomada de ações preventivas ou corretivas em face situações de risco.

A Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) é a ferramenta fundamental utilizada nos Centros de Operação do Sistema (COS) para fornecer a condição de operação corrente a partir do processamento de informações coletadas em tempo real da rede elétrica [1]. A EESP determina estimativas para as magnitudes das tensões e ângulos nas barras do sistema com base no processamento de dados analógicos, considerando concomitantemente a topologia da rede e outras informações revelantes para a modelagem em tempo real do SEP. Desta maneira, o Estimador de Estados (EE) está situado no topo do processo de operação em tempo real, já que fornece um modelo de rede confiável para todos os outros programas empregados na operação do sistema elétrico.

Existem vários fatores que influenciam nas características da estimação de estados, dentre as quais menciona-se as imprecisões na aquisição/transmissão das telemidas realizadas na rede elétrica, que podem se tornar significativas e conseqüentemente afetar a análise de segurança do sistema em virtude dos erros associados. Outro fator que influencia os resultados da estimação de estados é a existência de um plano de medição confiável, que garanta a observabilidade da rede e a inexistência de medidas críticas ou conjuntos críticos de medidas. Em outras palavras, o plano de medição existente deve fornecer informações sobre todas as variáveis relevantes da rede elétrica, e além disso possibilitar a detecção e identificação de erros grosseiros nas informações utilizadas para a modelagem em tempo real da rede.

O monitoramento em tempo real do sistema elétrico é realizado pelo conjunto redundante de telemidas processadas na EESP. Tais

medidas são provenientes do Sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*), que fornece informações como magnitudes de tensão nas barras, fluxos de potência nas linhas e injeções de potência ativa e reativa nas barras, bem como os *status* de chaves e disjuntores presentes nas subestações. O sucesso da implantação do Estimador de Estados depende da quantidade de medidores disponíveis bem como sua distribuição na rede elétrica.

As medidas analógicas coletadas do SEP e fornecidas ao estimador estão sujeitas a erros grosseiros, isto é, existe a possibilidade da presença de medidas portadoras de erros de medição cujo grau de inexatidão é muito maior do que o admitido pelo modelo de medição. Estas medidas espúrias levam o processo de estimação de estados a valores incorretos, ou até mesmo à não convergência. Por este motivo, a capacidade de detectar e de identificar medidas com erros grosseiros é uma das funções importantes do Estimador de Estados [2].

Outro fator crucial para a modelagem em tempo real de sistema de potência é o conhecimento da topologia da rede. A generalização dos conceitos das variáveis de estado na EESP e propostas de uma versão estendida para métodos de observabilidade numérica tornaram-se fundamentais para introduzir a análise do modelo de rede em nível de subestação de forma conjunta à convencional [3–6]. Deste modo, informações incorretas sobre a topologia convencional, que normalmente se manifestam como erros generalizados nas medidas estimadas, passaram a ser identificáveis. Considerando os estimadores convencionais, os quais processam a topologia da rede previamente à estimação de estados e assumida como correta, os possíveis erros nas informações sobre os *status* de ramos chaveáveis tornam-se menos evidentes e podem levar a erros permanentes nos dados fornecidos pelo estimador de estados, sem a sua devida detecção e identificação [1, 2, 4].

A proposta desta dissertação é a apresentação de um método unificado para a formulação e resolução integrada do problema de estimação de estados e topologia, partindo das seguintes premissas: (a) reconhecimento de que as medidas analógicas contêm, de forma intrínseca, informações relacionadas à topologia da rede; (b) tratamento da saída do Configurador de Redes como informação de topologia *a priori*, o que se torna possível a partir da modelagem de porções relevantes da rede no nível de seção de barra.

1.2 Revisão Bibliográfica

Nesta seção é apresentada uma breve revisão bibliográfica das contribuições mais relevantes para a estimação de estados em sistemas de potência. Os tópicos relacionam-se à modelagem de sistema de potência em tempo real, à estimação de estados e à detecção de anomalias na rede. Em seguida, são apresentadas revisões da literatura referentes à coestimação de estados e topologia.

1.2.1 Níveis de Modelos da Rede Elétrica

Os estudos de fluxo de potência em regime permanente desempenham papel fundamental na operação e no planejamento da expansão do SEP, pois permitem determinar o estado de operação do sistema a partir de uma dada topologia e condição de carga.

A análise tradicional do fluxo de potência se baseia na modelagem convencional da rede elétrica conhecida como modelagem barra-ramo, em que os arranjos das subestações são previamente determinados formando uma única barra ou nó. Nesta perspectiva, o procedimento evita o processamento de certas condições de instabilidade numérica causadas pela inclusão de valores muito pequenos ou muito grandes de impedâncias, os quais são a representação dos *status* dos disjuntores. Dessa forma, na modelagem barra-ramo as informações contidas nos arranjos das subestação são omitidas.

Os primeiros estudos para a inserção de ramos chaveáveis na modelagem de sistemas para a EESP foram propostos no início na década de 90 em [3–5]. Estas contribuições propõem a representação explícita dos ramos chaveáveis na formulação do problema, possibilitando a obtenção direta, sem a necessidade de procedimentos complementares, de informações referentes à grandezas elétricas associados aos componentes das subestações. Em seguida, outros estudos [7–11] abordaram a implementação explícita dos ramos chaveáveis na expansão de métodos de Fluxo de Potência Ótimo (FPO).

A proposta apresentada em [7] consiste em uma extensão da formulação convencional de fluxo de potência de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível de subestação, possibilitando o cálculo direto dos fluxos através dos ramos chaveáveis. As alterações introduzidas na metodologia do problema de fluxo de potência evitam os problemas numéricos oriundos da representação de chaves e disjuntores utilizada em [3]. Estendendo a proposta, as contribuições de [8]

e [9] enfocam a resolução do FPO expandido pelo Método de Newton-Raphson (N-R), possibilitando a determinação dos fluxos de potência através dos componentes chaveáveis para cada subestação selecionada da rede elétrica de energia.

Em [10] é apresentada uma metodologia direta para a determinação, em tempo real, dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis em situações de emergência do sistema, considerando estes fluxos como novas variáveis de estado, juntamente com as tensões complexas das barras. Os *status* dos dispositivos são incluídos ao modelo como restrições de igualdade, através de equações que relacionam os estados tradicionais do sistema. Ou seja, se o disjuntor estiver fechado, a queda de tensão e a diferença angular entre os terminais do ramo são nulas. Por outro lado, se o disjuntor estiver aberto os fluxos de potência ativa e reativa através deste devem ser nulos. Por fim, a referência [11] tem como objetivo principal a extensão da formulação do método de fluxo de potência em [10] para a aplicação em conexão com o método de N-R desacoplado rápido, bem como a análise de seu desempenho frente a sistemas elétricos reais.

1.2.2 Estimação de Estados em Sistemas de Potência

A formulação do problema de estimação de estados foi desenvolvida nos trabalhos de Schweppe e colaboradores em [12–14] em 1970. Estes artigos apresentam a ferramenta como um processador de telemidas redundantes da rede elétrica e de outras informações disponíveis cujo objetivo é determinar uma estimativa dos estados do sistema, considerando também a importância da observabilidade e da detecção e identificação de medidas portadora de erros grosseiros. A EESP se estabeleceu ao longo dos anos como ferramenta capaz de contornar as dificuldades de identificar erros de medição e fornecer um modelo estático confiável.

Em [15] são realizadas comparações entre os modelos aproximados dos estimadores de estados. Os estudos realizados por [16] e [17] apresentam propostas para delinear o papel da estimação de estados na operação dos sistemas de potência, assim como de verificar o desempenho da aplicação da técnica nos centros de controle, a partir do desenvolvimento de tutoriais para a estimação de estados. Dentre as várias formulações matemáticas existentes para o cálculo das variáveis de estados, o Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP) se tornou a mais utilizada em face à sua simplicidade de formulação e

implementação computacional. Em sua complementação, a estimação pelo método MQP permite a utilização de testes estatísticos para a detecção e identificação de erros grosseiros nas medidas a partir das magnitudes dos resíduos de estimação [17, 18].

Em contrapartida, estudos apresentados em [19–25] indicam que a alternativa baseada no Método dos Mínimos Valores Absolutos Ponderados (MVAP) também pode ser utilizada como ferramenta para a estimação de estados, abrindo a possibilidade de utilização de técnicas de programação linear e otimização baseada em pontos interiores [26], além da incorporação de propriedades altamente seletivas, o que rejeitaria, de modo praticamente automático, medidas portadoras de erros grosseiros sem a necessidade de um pós-processamento para a detecção e identificação das medidas espúrias. Entretanto, estimadores via Método MVAP são suscetíveis a pontos de alavancamento, o que compromete sua confiabilidade. Em sistemas de potência, estes pontos são comumente associados a diferenças significativas entre valores das impedâncias das linhas, ou injeções nodais em barras com várias linhas incidentes [27]. Em [28] é apresentada uma aproximação para contornar os problemas causados pelos pontos de alavancamento a partir de modificações nas equações das medidas através da aplicação de uma transformação linear, escolhida de tal forma que o conjunto de medidas transformadas não irá conter quaisquer pontos de alavancamento.

Neste aspecto, os conceitos fundamentais arquitetados para a estimação de estados e o aprimoramento de técnicas computacionais com redução dos esforços de implementação levaram ao desenvolvimento de algoritmos cada vez mais robustos, confiáveis e eficientes para a solução do problema. O trabalho relatado em [29] contribui com esforços para a detecção e identificação de erros grosseiros em medidas, relacionando os métodos MQP, resíduos normalizados e critérios de estimação não-quadráticos, avaliando a iteratividade dos erros grosseiros e redundância das medidas. Em [30] a proposta de avaliação de medidas com erros grosseiros é baseada na magnitude dos resíduos normalizados. Em [31] é apresentado um método baseado em testes de hipóteses para a detecção, identificação, eliminação e correção de medidas com erros grosseiros na EESP, fundamentado no cálculo dos erros de estimação das medidas, implementado como um procedimento de pós-processamento e pós-deteção de erros grosseiros.

1.2.3 Processamento e Análise de Erros de Topologia

A aplicação da estimação de estados foi amplamente explorada e aceita por partes de setores industriais. A extensão da aplicação do método, para também considerar a presença de erros na configuração da rede, foi inicialmente introduzida em [32]. Neste estudo é abordado um método estatístico que se baseia na mudança dos *status* dos disjuntores para a identificação de erros no modelo barra-ramo. Posteriormente, testes de colinearidade fundamentados na relação entre o vetor dos resíduos normalizados das medidas e das colunas da matriz de sensibilidade dos resíduos foram a sustentação para implementar um método de detecção e identificação de erros simples e múltiplos de topologia, apresentada em [33]. Uma das conclusões dos autores é que a detecção de erros de topologia em ramos críticos não é possível através da análise dos resíduos de medição. Tal método é previamente apresentado em [34] para a detecção e identificação de erros grosseiros múltiplos em medidas. Adicionalmente, [35] apresenta um estudo de topologia e as condições para a detecção a partir da matriz de sensibilidade dos resíduos.

A partir da modelagem de ramos sem impedância na EESP abordada em [3], representando os fluxos através das chaves e disjuntores como variáveis de estados, foi possível a utilização direta do modelo de seção de barra, no problema de estimação, assim como sua resolução pelo método dos MQP [5]. Outros métodos de correção de dispositivos chaveáveis foram propostos, como o algoritmo apresentado em [36], que identifica os ramos chaveáveis candidatos para eliminar ou reduzir sistemas sobrecarregados. A implementação deste algoritmo é realizada de forma *on-line* para análise de contingência.

Neste sentido, uma extensão da estimação de estados tradicional é apresentada em [6], propondo a Estimação de Estados Generalizada (EEG). Em consequência do método, apenas algumas partes da rede são modeladas no nível de seção de barra onde seus parâmetros de rede designados se tornam quantidades estimadas no processamento. Isto faz com que a dimensão do problema não ganhe grandes proporções em relação ao original. Desse modo, tais regiões modeladas são tratadas como “zonas de anomalia”¹, consideradas suspeitas de apresentar erros de topologia. Os estudos apresentados em [37] objetivam o desempenho de um estágio de pré-processamento da EEG com um método que determina as zonas de anomalia.

¹Tradução livre do termo em inglês *bad data pocket*

Outros métodos numéricos relacionados à identificação de erros de topologia na EEG que podem ser ressaltados são apresentados em [38–41]. Em [38] é proposto um método de identificação baseado no uso dos multiplicadores de Lagrange e formalizado como uma extensão do método dos resíduos normalizados. Assim, podem-se detectar erros múltiplos tanto nas medidas como nas restrições de igualdade do problema. Em tais restrições são formulados os *status* das chaves e disjuntores, bem como as injeções nulas em nós das subestações e o ângulo da barra de referência. As primeiras são denominadas restrições operacionais, e as relacionadas às injeções nodais e o ângulo de referência formam o conjunto de restrições estruturais. Esta formulação do problema de EE baseada em restrições estruturais e operacionais recebe o nome de Estimação de Estados no Nível de Seção de Barra (EENSB), para diferenciá-la da EEG, que utiliza pseudomedidas para modelar a topologia. Em [39] a identificação dos erros de topologia é abordada como um teste de hipóteses baseado no Teorema de Bayes. Em [40] e [41], a EENSB é resolvida por métodos ortogonais de estimação e a identificação dos erros de topologia é realizada a partir de testes de hipóteses.

Uma das funções recentes desenvolvidas para o COS como ferramenta de processamento em tempo real é a estimação da topologia, proposta inicialmente em [42]. O referido estudo utiliza funções para a determinação de uma zona de anomalia e a modelagem no nível de seção de barra. Deste modo, procura-se realizar uma fusão do estimador via MQP com técnicas combinatórias para a determinação dos *status* dos dispositivos chaveáveis presentes na subestação. O método utiliza o modelo linear da rede e os resultados do estimador visam fornecer maior confiabilidade para as aplicações de mercado de energia e para os dados de topologia que são repassados aos estimadores de estado convencionais. Entretanto, esta vertente não é tratada de uma estimação direta da topologia do sistema. Tais características são observadas nos coestimadores de estado e topologia, apresentados na subseção a seguir.

1.2.4 Estimação Integrada de Estados e Topologia

A Estimação Integrada de Estados e Topologia, também denominada de Coestimação de Estados e Topologia (CET), é caracterizada pela estimação simultânea dos estados do SEP e dos *status* dos ramos chaveáveis.

A abordagem unificada foi primeiramente apresentada em [24] considerando o modelo linear da rede elétrica e partindo de um método formado por uma função multi-objetivo em que o termo correspondente aos resíduos das medidas analógicas é formulado pelo tradicional critério dos mínimos quadrados ponderados (MQP) e o termo correspondente às restrições operacionais é modelado pelo critério dos mínimos valores absolutos ponderados (MVAP). O processo é resolvido pelo Método Primal Dual de Pontos Interiores (MPDPI) e retorna ao final do procedimento os valores estimados dos ângulos nas barras e os *status* dos disjuntores, bem como os fluxos de potência ativa nos mesmos.

Em [25] é proposta a extensão do método de CET tendo como base o modelo não-linear da rede elétrica, ou seja, considerando o modelo completo do sistema de potência, resultando ao final do processo a estimação, os ângulos e magnitudes de tensão nos nós elétricos e os *status* dos dispositivos chaveáveis, com a estimação dos fluxos de potência ativa e reativa nos mesmos. O método é denominado de Coestimação Não-Linear de Estados e Topologia (CNET). Adicionalmente, é apresentado no mesmo estudo a adição de medidas fasoriais na estimação de estados, garantidos através dos medidores de unidades de fase (PMUs²), com o intuito de reforçar a redundância das medidas e de melhorar o desempenho e precisão do processo de estimação de estados. Os resultados preliminares do processo de CET e CNET são também apresentados em [43] e [44], respectivamente.

Outros estudos propuseram a estimação da topologia de partes da rede representadas no nível de subestação. Em [45] é proposta uma estimação de estados em dois níveis considerando o processamento da topologia em nível de subestação com a presença de medidas fasoriais de corrente e de tensão, em que se estimam os *status* dos disjuntores a partir das correntes que fluem pelos mesmos. Em [46] é apresentado um procedimento diferente das abordagens clássicas. Neste, há uma formulação a partir da conjectura de que as informações sobre a topologia estão disseminadas nas medidas analógicas, e o processo de extração dessas informações é baseada no método de redes neurais auto-associativas. Em [23] é proposto uma estimação de estados descentralizada para o SEP, usufruindo de uma adaptação da CNET em [44] para estimar simultaneamente as variáveis de estados e a topologia da subestação.

A abordagem adotada neste trabalho considera tanto a modelagem de uma região suspeita no nível de seção de barra quanto as informações sobre a topologia que estão intrinsecamente ligadas às me-

²do termo inglês *Phasor Measurement Units*

didadas analógicas. Deste modo, é proposta uma estratégia de resolução via função quadrática para a determinação dos *status* dos ramos chaveáveis, estimados de forma simultânea com os estados convencionais do sistema.

1.3 Objetivos e Contribuições da Dissertação

O objetivo desta dissertação é apresentar uma abordagem unificada para a estimação conjunta de estados e de topologia em sistemas de potência e, a partir da representação completa do sistema elétrico e da modelagem no nível de seção de barra, realizar a estimação das tensões complexas nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa em todos dos ramos chaveáveis, retornando também os seus respectivos *status*. Diferentemente das abordagens descritas em [43] e [44], as informações relativas aos *status* dos ramos chaveáveis são tratadas como informações *a priori* para o problema de estimação de estados, sendo estas processadas mediante algoritmos ortogonais de estimação [47]. Esta característica quadrática das funções para a resolução do problema preserva as propriedades estatísticas das informações *a priori*, o que facilita a investigação tanto da presença de erros em medidas analógicas quanto da configuração topológica da rede elétrica. Assim, de forma complementar, são abordados o processamento e análise de medidas portadoras de erros grosseiros, bem como a implementação de testes de hipóteses para a sua detecção e identificação.

As etapas desenvolvidas abordam as seguintes características:

- Revisão bibliográfica, que revela uma tendência da generalização da estimação de estados, porém com os esforços na busca de informações sobre a configuração da rede a partir das presentes nas medidas observadas. Esta preocupação com os dados de topologia está relacionada à dificuldade dos estimadores convencionais de identificar tais erros, que podem gerar situações inexplicadas e assim afetar algumas atividades de operação como despacho de potência de geração, atribuições de preços, falhas de segurança e nas aplicações corretivas à rede;
- Formulação do problema, considerando a representação do modelo completo da rede elétrica e a representação explícita dos ramos chaveáveis para integrarem a estimação de estados de sistemas de potência;
- Implementação computacional, simulação e análise dos resulta-

dos. O referido ponto retrata a validação do algoritmo por meio de testes em sistemas de pequeno e médio porte a partir da comparação com os valores obtidos do fluxo de potência estendido, proposto em [7].

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação está estruturada em seis capítulos, e é iniciada a partir da introdução dos conceitos gerais da estimação de estados em sistemas elétricos de potência. Posteriormente, são abordadas as estratégias para a expansão do modelo convencional da rede. Em seguida, são relatadas as metodologias para a estimação integrada de estados e topologia, assim como os resultados numéricos no capítulo seguinte. Finalmente, o capítulo final traz as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Este capítulo aborda os principais aspectos da estimação de estados em sistemas elétricos de potência, descrevendo o modelo de medição, a formulação matemática, subproblemas, interpretações e métodos de solução. São tratados também os conceitos primordiais para o processamento de erros grosseiros, como testes de hipóteses e algoritmos de análise de medidas espúrias;

Capítulo 3: Apresenta os conceitos da expansão do modelo convencional barra-ramo para o modelo no nível de seção de barra, expondo as formulações e métodos de resolução;

Capítulo 4: Este capítulo descreve o método da Estimação Integrada de Estados e Topologia, partindo da formulação matemática e da apresentação das características das informações *a priori* da topologia. São apresentados os métodos de resolução por Equação Normal e rotações rápidas de Givens, assim como aplicação do método a um sistema de pequeno porte;

Capítulo 5: Descreve os resultados numéricos obtidos da aplicação da ferramenta proposta em sistemas-teste de 14, 30 e 57 barras do IEEE, para a validação da metodologia;

Capítulo 6: São apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 Introdução

O desempenho das funções básicas de avaliação de segurança da operação em tempo real de Sistemas Elétricos de Potência (SEP), realizado mediante aplicativos de Monitoração e Análise de Segurança, depende da disponibilidade de informações confiáveis a respeito do ponto de operação atual do sistema. Os problemas relacionados à estimação de estados no SEP têm sido estudados desde o final da década de sessenta, e os primeiros trabalhos de Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) devem-se a Schweppe [12–14]. Nesses artigos, o problema é definido como um procedimento que visa estimar os valores das variáveis de natureza elétrica (variáveis de estado) que caracterizam um dado ponto de operação do sistema a partir de um conjunto de medidas passíveis de conter erros aleatórios de diferentes tipos. O objetivo da EESP é, portanto, fornecer uma base de dados em tempo real confiável, a partir das medidas redundantes coletadas da rede, que são então processadas de forma a fornecer estimativas ótimas (em um sentido ainda a ser definido) para as tensões complexas em todas as barras do sistema.

Neste capítulo será apresentada a formulação para o problema da estimação de estados, abordando-se também suas características intrínsecas, a modelagem e métodos de resolução consagrados na literatura. A Seção 2.2 trata dos aspectos gerais da EESP, incluindo a sua função na Operação em tempo real do SEP e o modelo de medição. A Seção 2.3 apresenta a formulação da EESP de acordo com o método dos Mínimos Quadrados Ponderados, enquanto que a Seção 2.4 descreve alguns métodos de solução, como o método da Equação Normal e algoritmos Ortogonais-Sequenciais. Um outro aspecto tratado neste capítulo é a análise de erros grosseiros na estimação de estados, sendo apresentadas técnicas para a processamento de medidas espúrias na Seção 2.5.

2.2 Aspectos Gerais da Estimação de Estados

Um estimador de estados pode gerar um significativo conjunto de informações sobre as condições de operação do sistema, utilizando para isto principalmente medidas provenientes do sistema SCADA.

Este mecanismo é a principal motivação que impulsiona indústrias de energia elétrica para aplicações práticas bem sucedidas na estimação de estados. O papel do processo da EESP é muito amplo, assim como sua complexidade na agregação de sistemas físicos e computacionais, conduzida integralmente no COS. A implementação em tempo real e experiências práticas relacionadas são reportadas em alguns artigos, como os trabalhos publicados em [16] e [48], que mencionam as experiências da estimação de estados nos COS, discutindo limitações como medidas críticas e erros de topologia, dentre outras.

O estimador de estados processa as medidas redundantes de forma a estimar valores para as tensões complexas em todas as barras. A partir delas é possível calcular as outras variáveis de interesse, como os fluxos de potência nos ramos e as injeções de potência nas barras. Além das medidas analógicas, o estimador se utiliza das características topológicas da rede elétrica e eventuais pseudomedidas. A topologia atual da rede é fornecida pelo Configurador de Redes, com base nas telemidas digitais referentes ao *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras.

Diversas funções da operação em tempo real são beneficiadas através dos resultados fornecidos pela estimação de estados [47], como: *A monitoração da segurança*, que verifica o atual estado de operação do sistema, classificando-o como estado normal, de emergência, ou restaurativo; *Análise de segurança*, que avalia os efeitos de eventuais contingências no sistema, e *Previsão de carga*, uma atividade que prevê o consumo de potência nas barras do sistema e se constitui em parte do planejamento da operação dos sistemas de energia. Outros subproblemas associados à EESP podem ser citados com as suas respectivas finalidades/importância:

- *Pré-filtragem*: baseia-se em um pré-processamento das medidas para identificar quais delas possuem claramente erros grosseiros de medição;
- *Configuração da rede elétrica*: fornece as medidas digitais dos *status* das chaves e disjuntores, com o intuito de determinar o modelo da topologia atual;
- *Observabilidade*: consiste em determinar se as medidas que compõem um dado plano de medição contêm informações suficientes da rede para permitir a estimação dos estados do sistema;
- *Deteção e identificação de medidas espúrias*: consiste em verificar se ocorre a presença de medidas com elevado grau de im-

precisão em relação à sua classe de exatidão. Confirmada a sua existência, as medidas portadoras de erros grosseiros devem ser identificadas;

- *Recuperação de medidas espúrias*: consiste no tratamento das medidas portadoras de erros grosseiros, de tal forma que possam ser reutilizadas na estimação de estados.

Uma estrutura da EESP com as suas respectivas funções relacionadas está apresentado na Figura 2.1.

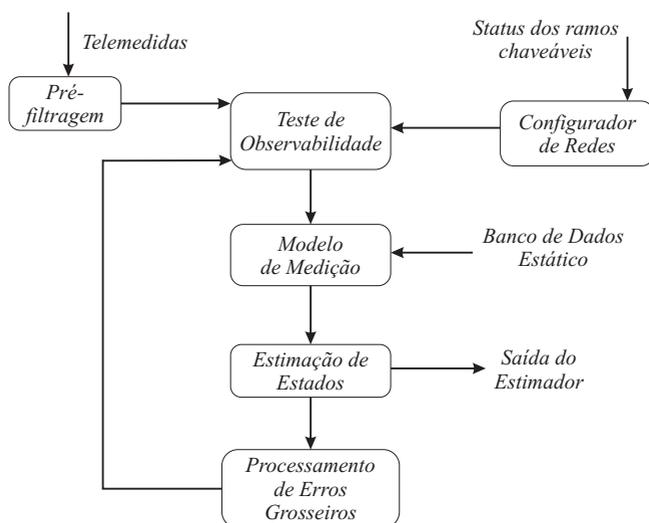


Figura 2.1 – Estrutura básica da estimação de estados

2.2.1 Modelo de Medição

Considerando-se um sistema de potência formado por N barras com quantidade m de medidas fazendo parte do plano de medição e admitindo-se o conhecimento da topologia da rede e dos parâmetros do sistema, o modelo de medição não-linear da rede elétrica é dado por:

$$\mathbf{z}_m = \mathbf{h}_m(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon}_m \quad (2.1)$$

onde \mathbf{z}_m é o vetor de ordem $(m \times 1)$ das quantidades medidas¹, \mathbf{x} é o vetor de estados verdadeiros do referido sistema, formado por $N - 1$ variáveis correspondentes aos ângulos nas barras (o ângulo na barra de referência é conhecido) e N variáveis correspondentes às magnitudes das tensões em cada barra. Portanto, o vetor de variáveis de estado tem dimensão $(n \times 1)$, com $n = 2N - 1$, enquanto que $\mathbf{h}_m(\cdot)$ é o vetor $(m \times 1)$ formado pelas funções não-lineares que relacionam as quantidades medidas às variáveis de estado \mathbf{x} , e ε_m é o vetor de ordem $(m \times 1)$ dos erros aleatórios de medição.

Os valores verdadeiros das variáveis de estado do sistema, e consequentemente das quantidades medidas, são desconhecidos. Para estimá-los, faz-se necessário realizar certas suposições sobre o modelo de medição. Na ausência de medidas espúrias, os valores fornecidos pelos medidores situam-se em uma faixa de tolerância aceitável, a qual está relacionada à sua respectiva classe de exatidão.

Portanto, o vetor e erros ε_m apresenta estas inexatidões das medições, com desvio padrão σ_i , oriundos dos equipamentos utilizados, como os transformadores dos instrumentos de medição, efeitos de conversão analógica/digital, entre outros. Supondo que este vetor possui média zero e que os erros de medição não são correlacionados, a matriz de covariância correspondente é diagonal e seus elementos são definidos pelas variâncias dos erros de medição, calculados com base na precisão dos medidores.

Assim:

$$\begin{aligned} E\{\varepsilon_m\} &= 0 \\ E\{\varepsilon_m \varepsilon_m^T\} &= \mathbf{R}_m \end{aligned} \tag{2.2}$$

onde $E\{\cdot\}$ é o operador expectância e \mathbf{R}_m é a matriz de covariância $(m \times m)$ dos erros de medição, suposta diagonal, cujos elementos são definidos por $R_{m,ii} = \sigma_i^2$.

Para caracterizar um dado plano de medição com relação ao respectivo grau de redundância, é habitual definir o índice de redundância global das medidas realizadas na rede elétrica, dado por:

$$\rho \triangleq \frac{m}{n} \tag{2.3}$$

De acordo com o modelo de medição apresentado nas Equações

¹Tratando-se do modelo não-linear da rede, as medidas são as magnitudes de tensão nas barras, os fluxos de potência ativa e reativa em ramos convencionais e chaveáveis, as injeção de potência ativa e reativa nas barras e magnitudes de correntes nas linhas de transmissão.

(2.1) e (2.2), uma condição necessária para que um sistema elétrico seja observável é que $m \geq n$ ou $\rho \geq 1$, embora tal condição não seja suficiente para garantir a observabilidade e consequentemente a estimação dos estados. Uma condição desejável é que, além da observabilidade, haja redundância das medidas em grau suficiente ($\rho > 1,5$), pois isto propicia tanto a estimação quanto a facilidade em detectar e identificar erros grosseiros [49].

2.3 Estimação de Estados baseado no Método dos Mínimos Quadrados

O problema de estimação de estados consiste em determinar as estimativas para o vetor de estados que apresentem o melhor ajuste às medidas do plano de medição, o que pode ser formulado como um problema de otimização. Uma técnica clássica para a estimação de estados é o método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), inicialmente aplicada em [12].

Considerando o modelo de medição apresentado na Subseção 2.2.1, o vetor dos resíduos de estimação das medidas de ordem $(m \times 1)$ é definido como:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \quad (2.4)$$

onde $\hat{\mathbf{x}}$ é o vetor de estados estimados do sistema de dimensão $(n \times 1)$, e os vetores \mathbf{z}_m e $\mathbf{h}_m(\cdot)$ são definidos conforme a Equação (2.1).

Assim, pode-se formular o problema de minimização da soma dos quadrados dos resíduos de estimação com base no seguinte equação critério estatístico dos MQP:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2.5)$$

sendo r_i definido pelo resíduo da i -ésima medida cujo desvio padrão é σ_i .

O critério (2.5) pode ser reescrito na forma matricial como:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r} \quad (2.6)$$

A ponderação da função objetivo é realizada pela matriz \mathbf{R}_m^{-1} , cujos elementos diagonais são iguais ao inverso da variância de cada medida. Ou seja, quanto maior for a exatidão do medidor i , menor

será o valor do desvio padrão σ_i e conseqüentemente, maior o valor do peso $R_{m,ii}^{-1}$. Desta forma, os medidores que fornecem medidas mais confiáveis recebem maior peso na formulação do problema de mínimos quadrados ponderados.

2.3.1 Inclusão das Informações *A Priori*

As informações *a priori* são dados previamente disponíveis sobre os valores das variáveis de estado [50–53], e têm por objetivo aproveitar o conhecimento existente antes do processo da estimação de estados. Estas informações podem ser incluídas no processo de solução conforme proposto em [41, 54], acrescentando o seguinte termo quadrático à função-objetivo:

$$\frac{1}{2}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1}(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (2.7)$$

onde o vetor $\hat{\mathbf{x}}$ é vetor de estados estimados, $\bar{\mathbf{x}}$ é o vetor das estimativas *a priori* para os estados, ambos de dimensão $(n \times 1)$, e a matriz \mathbf{P} é a matriz de covariância das informações *a priori*, de dimensão $(n \times n)$, e dada por:

$$E\{(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})(\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T\} = \mathbf{P} = \begin{bmatrix} \sigma_{\bar{x}_1}^2 & & & \\ & \sigma_{\bar{x}_2}^2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_{\bar{x}_n}^2 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Assim, como no caso dos erros de medição, supõe-se que os erros das informações *a priori* são não-correlacionados e possuem média zero, e a matriz de covariância \mathbf{P} é diagonal e seus elementos são definidos pelas variâncias das informações *a priori*, conforme a Equação (2.8).

Portanto, com a inclusão das informações *a priori* a função-objetivo a ser minimizada no problema de estimação de estados pode ser formulada da seguinte forma:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \left(\frac{r_i}{\sigma_i} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\hat{x}_j - \bar{x}_j}{\sigma_{\bar{x}_j}} \right)^2 \quad (2.9a)$$

ou na forma matricial:

$$J(\hat{\mathbf{x}}) = \frac{1}{2} \mathbf{r}^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r} + \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (2.9b)$$

2.4 Métodos de Solução do Problema de Mínimos Quadrados

Um das questões importantes a serem decididas na escolha de um algoritmo de resolução da EESP está relacionado ao grau de estabilidade numérica que o método possui. Nesta seção serão destacados alguns métodos de solução do problema de mínimos quadrados. Serão discutidos os métodos da Equação Normal, utilizando o algoritmo de Gauss-Newton e o método sequencial ortogonal, utilizando as vertentes das Rotações de Givens.

2.4.1 Método da Equação Normal

O modelo de medição proposto por [12–14] e formulado para o problema de minimização a partir de MQP, pode ser descrito utilizando as Equações (2.4) e (2.6), apresentado na seguinte forma:

$$\text{Min } J(\hat{\mathbf{x}}) = [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})] \quad (2.10)$$

A solução do problema apresentado na Equação (2.10) é obtida através da aplicação das condições de otimalidade de primeira ordem de Karush-Kuhn-Tucker (*KKT*), que consiste na garantia de que o ponto considerado como solução seja um ponto estacionário, isto é:

$$\frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = 0 \quad (2.11)$$

$$-2\mathbf{H}_m^T(\mathbf{x})\mathbf{R}_m^{-1}[\mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\mathbf{x})] = 0 \quad (2.12)$$

onde $\mathbf{H}_m(\mathbf{x})$ é a matriz Jacobiana de dimensão $(m \times n)$, dada por:

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}_m(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.13)$$

Como a Equação (2.12) é fortemente não-linear, expande-se em série de Taylor a função vetorial de equações não-lineares $\mathbf{h}_m(\mathbf{x})$ em torno do ponto $\hat{\mathbf{x}}^k$ e ao longo da direção $\Delta\mathbf{x}$ truncando-a no termo de primeira ordem, obtendo-se a seguinte expressão:

$$\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k + \Delta\mathbf{x}) \cong \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)\Delta\mathbf{x} \quad (2.14)$$

de modo que:

$$\mathbf{H}_m(\mathbf{x}^k) = \left. \frac{\partial \mathbf{h}_m(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}^k} \quad (2.15)$$

Definindo o vetor $\Delta \mathbf{z}_m$ como o vetor $(m \times 1)$ de medidas incrementais, dado por:

$$\Delta \mathbf{z}_m \triangleq \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \quad (2.16)$$

é então possível definir o modelo linearizado do problema apresentado na Equação (2.10) a partir dos termos nas Equações (2.14) e (2.16), e desta forma, a função-objetivo a ser minimizada torna-se:

$$J(\Delta \mathbf{x}) = [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k]^T \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k] \quad (2.17)$$

Aplicando as condições de otimalidade de primeira ordem na Equação (2.17), obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{\partial J(\Delta \mathbf{x})}{\partial \Delta \mathbf{x}} = 0 \quad (2.18a)$$

$$-2\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} [\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k] = 0 \quad (2.18b)$$

Tal expressão resulta em:

$$[\mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)] \Delta \mathbf{x}^k = \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) é conhecida como Equação Normal de Gauss e representa o sistema linear a ser resolvido a cada iteração para a determinação do incremento do vetor de estados $\Delta \mathbf{x}$. Com base na referida equação, algumas considerações podem ser tomadas, como a definição da matriz de coeficientes no lado esquerdo da equação, comumente chamada de matriz ganho ou de informação do problema:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}^k) = \mathbf{H}_m^T(\mathbf{x}^k) \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m(\mathbf{x}^k) \quad (2.20)$$

Logo, A Equação Normal de Gauss fica resumida a:

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k) \Delta \mathbf{x}^k = \mathbf{H}_m^T(\hat{\mathbf{x}}^k) \mathbf{R}_m^{-1} \Delta \mathbf{z}_m \quad (2.21)$$

É importante ressaltar que a matriz ganho é de fato uma aproximação para a matriz Hessiana $\nabla^2 \mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}}) = \partial^2 \mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}}) / \partial \mathbf{x}^2$ próxima da solução, e o lado direito da Equação (2.19) é o negativo do gradiente de $\mathbf{J}(\hat{\mathbf{x}})$, ambos calculados no ponto \mathbf{x}^k [2][18].

O método da Equação Normal consiste em resolver um conjunto

de equações não-lineares, como o apresentado em (2.18), através de um processo iterativo para obter o vetor de incrementos $\Delta \mathbf{x}$ pela Equação reorganizada em (2.19). Portanto, o vetor de estados estimados é atualizado a cada iteração conforme:

$$\hat{\mathbf{x}}^{k+1} = \hat{\mathbf{x}}^k + \Delta \mathbf{x}. \quad (2.22)$$

O processo é inicializado em um ponto inicial $\hat{\mathbf{x}}^0$ (normalmente o perfil do plano das tensões complexas). Assim, a atualização realizada em (2.22) continua até que uma pequena tolerância pré-definida para o passo $\Delta \mathbf{x}$ seja alcançada.

Embora sob condições usuais o método da Equação Normal seja capaz de resolver problemas práticos, este método possui como desvantagem a tendência ao mau condicionamento numérico [18], o que pode ser verificado a partir do número de condicionamento da matriz de informação (2.20). Este fato ocorre devido à seguinte propriedade:

$$\text{Cond}(\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m) = [\text{Cond}(\mathbf{H}_m)]^2 \quad (2.23)$$

ou seja, se \mathbf{H}_m não é bem condicionada, \mathbf{G} será mal condicionada. O fator $\text{Cond}(\cdot)$ é dado pela relação entre o máximo e o mínimo autovalores de uma matriz simétrica [55]. Valores muito elevados indicam que a solução de um dados sistema linear é susceptível a erros de aproximação e arredondamento, como ocorre para os cálculos e armazenamento da matriz \mathbf{G} [26].

2.4.2 Método Sequencial-Ortogonal

Estimadores sequenciais são caracterizados por processar medidas em sequência, em geral uma de cada vez. Em problemas de EESP, as linhas da matriz de observação armazenam as informações de cada medida presente no plano de medição ou restrições de igualdade com respeito às variáveis de estado. Desta forma, este tipo de processamento por linhas tende a apresentar melhor desempenho que as variantes que operam por coluna [56, 57]. Este aspecto melhora a eficiência computacional, além de evitar os problemas de condicionamento numérico presente em outras técnicas de processamento, como o método da Equação Normal. Métodos baseados nas Rotações de Givens [47, 58, 59] mostram-se capazes de fornecer soluções robustas a partir da aplicação de transformações ortogonais em matrizes e vetores no problema de mínimos quadrados, evitando, assim, produtos matriciais do tipo

$\mathbf{H}_m^T \mathbf{H}_m$ que são propensos a gerarem instabilidade numérica.

Considerando o modelo linear apresentado na Equação (2.17), a matriz de covariância dos resíduos pode ser decomposta pela fatoração de Cholesky, isto é, $\mathbf{R}_m^{-1} = \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}}$, e a matriz Jacobiana \mathbf{H}_m é considerada constante próximo à solução ótima, e então, a função a ser minimizada fica:

$$\text{Min } J(\Delta \mathbf{x}) = [\mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} (\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m \Delta \mathbf{x}^k)]^T [\mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} (\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m \Delta \mathbf{x}^k)] \quad (2.24a)$$

$$= \|\mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} (\Delta \mathbf{z}_m - \mathbf{H}_m \Delta \mathbf{x}^k)\|^2 \quad (2.24b)$$

onde o símbolo $\|\cdot\|$ denota a norma Euclidiana de um vetor. Transformações ortogonais podem ser aplicadas nas equações de mínimos quadrados em (2.24a) e (2.24b) sem alterar o valor da norma Euclidiana. Levando em conta que uma nova medida i deve ser processada pelo estimador, então a representação da função-objetivo também pode ser expressa como:

$$\text{Min } J(\Delta \mathbf{x}) = \left\| \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z}_m \\ \Delta z_m^i \end{bmatrix} - \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m \\ \mathbf{H}_m^i \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \right\|^2 \quad (2.24c)$$

sendo \mathbf{z}_m^i e \mathbf{H}_m^i o valor da nova medida e a nova linha da matriz de observação ser processada, respectivamente.

Uma matriz \mathbf{Q} é ortogonal quando $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{Q} \mathbf{Q}^T = \mathbf{I}$, onde \mathbf{I} é a matriz identidade. Como já mencionado, uma importante propriedade das matrizes ortogonais é o fato de que é preservada a norma Euclidiana de vetores aos quais são aplicadas. Através desta propriedade, a aplicação de transformações ortogonais na Equação (2.24c) não altera o valor de $J(\Delta \mathbf{x})$ [56]. Além disso, é possível definir uma matriz ortogonal \mathbf{Q} a qual, quando aplicada à matriz de observação e ao vetor das quantidades de medidas, ambos ponderados pela matriz $\mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}}$ e aumentados de modo a permitir o processamento de uma nova medida i , fornece, respectivamente:

$$\mathbf{Q} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} \\ R_{m,i}^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m \\ \mathbf{H}_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

e

$$\mathbf{Q} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m^{-\frac{1}{2}} \\ R_{m,i}^{-\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{z}_m \\ \Delta z_m^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \tilde{e}^i \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

onde \mathbf{U} é uma matriz triangular superior ($n \times n$), $\mathbf{0}$ é um vetor nulo ($1 \times n$), \mathbf{y} é um vetor ($n \times 1$) que contém as informações dos valores das medidas, e \tilde{e}^i é um escalar.

Esta aplicação das transformações ortogonais visando retriangularizar a matriz Jacobiana aumentada se repete para cada nova medida, em conjunto com a respectiva linha da matriz \mathbf{H}_m . Ao final do processamento de todas as medidas, a determinação dos incrementos das variáveis de estado do problema é alcançada resolvendo-se um sistema triangular:

$$\mathbf{U}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2.27)$$

A soma ponderada do quadrado dos resíduos é determinada diretamente a partir de \tilde{e} , subproduto do processo de triangulação do sistemas de equações [47].

2.4.2.1 Rotações de Givens

As rotações de Givens são transformações lineares que, quando aplicadas a um par de vetores $\check{\mathbf{u}}$ e $\check{\mathbf{p}}$ do espaço \mathfrak{R}^n [60], permitem que posições arbitrariamente escolhidas do vetor $\check{\mathbf{p}}$ sejam zeradas. Embora existam outras possibilidades para se obter \mathbf{Q} das Equações (2.25) e (2.26), a característica das rotações de Givens de serem aplicáveis a vetores-linha permitem que sejam facilmente agregadas aos problemas de EESP, pois possibilitam que as medidas e equações correspondentes sejam processadas uma de cada vez. Nesta perspectiva, o algoritmo de Givens consiste em aplicar rotações sucessivas entre os elementos de um vetor linha $\check{\mathbf{p}}$ e as linhas da matriz triangular \mathbf{U} até que os elementos de $\check{\mathbf{p}}$ sejam completamente zerados. Uma outra característica das rotações de Givens é de possuir a vantagem de reduzir a quantidade de cálculos na fatoração de matrizes esparsas [47].

Uma forma básica para matriz ortogonal de rotações é:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

onde c e s são escalares a serem determinados no processo de transformação linear.

Pode-se verificar facilmente que a matriz \mathbf{Q} em (2.29) é ortogonal, pois:

$$\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} c & -s \\ s & c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

o que é verdade desde que:

$$c^2 + s^2 = 1 \quad (2.30)$$

Para a aplicação à EESP, considere os seguintes vetores:

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{u}} &= [0 \ \dots \ 0 \ \check{u}_i \ \check{u}_{i+1} \ \dots \ \check{u}_{n+1}] \\ \check{\mathbf{p}} &= [0 \ \dots \ 0 \ \check{p}_i \ \check{p}_{i+1} \ \dots \ \check{p}_{n+1}] \end{aligned} \quad (2.31)$$

em que o vetor $\check{\mathbf{u}}$ é a i -ésima linha da matriz triangular \mathbf{U} da Equação (2.25), e vetor $\check{\mathbf{p}}$ representa a nova linha a ser processada da matriz aumentada $[\mathbf{H}_m \mid \mathbf{Dz}]$. A cada etapa do algoritmo de Givens, uma rotação de planos ente $\check{\mathbf{u}}$ e $\check{\mathbf{p}}$ é executada, de modo a anular o i -ésimo elemento de $\check{\mathbf{p}}$.

As rotações são processadas a partir do seguinte produto:

$$\begin{bmatrix} c & s \\ -s & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \check{\mathbf{u}} \\ \check{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{\mathbf{u}}' \\ \check{\mathbf{p}}' \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

e os vetores $\check{\mathbf{u}}'$ e $\check{\mathbf{p}}'$ são dados por:

$$\begin{aligned} \check{\mathbf{u}}' &= [0 \ \dots \ 0 \ \check{u}'_i \ \check{u}'_{i+1} \ \dots \ \check{u}'_{n+1}] \\ \check{\mathbf{p}}' &= [0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \check{p}'_{i+1} \ \dots \ \check{p}'_{n+1}] \end{aligned} \quad (2.33)$$

Pela condição imposta de que $\check{p}'_i = 0$, pode-se determinar os valores dos escalares c e s , que assim são dados por:

$$\begin{aligned} c &= \frac{\check{u}_i}{\sqrt{\check{u}_i^2 + \check{p}_i^2}} \\ s &= \frac{\check{p}_i}{\sqrt{\check{u}_i^2 + \check{p}_i^2}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

2.4.2.2 Rotações de Givens com Três Multiplicadores

A aplicação das rotações de Givens ilustrada pelas Equações (2.32) e (2.33) necessita de quatro multiplicadores e da computação de raízes quadradas, o que tem um impacto negativo no desempenho computacional do método tradicional apresentado na Subseção 2.4.2.1. Entretanto, as rotações de Givens podem ser realizadas utilizando três

multiplicadores em cada etapa elementar, ao invés das quatro multiplicações do método demonstrado pela Equação (2.32), e sem a necessidade de realizar o cálculo das raízes quadradas. Esta vertente é chamada de versão rápida das rotações de Givens ou G3M [61, 62].

Os vetores linha apresentados na Equação (2.31) podem ser decompostos evidenciando as raízes quadradas:

$$\begin{aligned}\check{\mathbf{u}} &= [0 \dots 0 \sqrt{d}\check{u}_i \sqrt{d}\check{u}_{i+1} \dots \sqrt{d}\check{u}_{n+1}] \\ \check{\mathbf{p}} &= [0 \dots 0 \sqrt{w}\check{p}_i \sqrt{w}\check{p}_{i+1} \dots \sqrt{w}\check{p}_{n+1}]\end{aligned}\quad (2.35)$$

onde \sqrt{d} e \sqrt{w} são os pesos atribuídos aos vetores $\check{\mathbf{u}}$ e $\check{\mathbf{p}}$. Isto equivale a considerar a matriz \mathbf{U} escalonada na forma:

$$\mathbf{U} = \mathbf{D}^{\frac{1}{2}} \bar{\mathbf{U}} \quad (2.36)$$

em que \mathbf{D} é uma matriz diagonal e $\bar{\mathbf{U}}$ é uma matriz triangular superior unitária. Além disso, a nova linha a ser processada é considerada escalonada por \sqrt{w} .

Aplicando as rotações em cada linha, de forma a zerar o i -ésimo elemento de $\check{\mathbf{p}}$ têm-se:

$$\begin{aligned}\check{\mathbf{u}}' &= [0 \dots 0 \sqrt{d'}\check{u}'_i \sqrt{d'}\check{u}'_{i+1} \dots \sqrt{d'}\check{u}'_{n+1}] \\ \check{\mathbf{p}}' &= [0 \dots 0 \quad 0 \quad \sqrt{w'}\check{p}'_{i+1} \dots \sqrt{w'}\check{p}'_{n+1}]\end{aligned}\quad (2.37)$$

Pela mesma imposição de que $p_i = 0$ e também a condição que o elemento (2,2) da matriz ortogonal de rotação, Equação (2.28), seja igual à unidade [61], chega-se às equações de atualização que definem as relações entre as entradas originais e transformadas de $\check{\mathbf{u}}$ e $\check{\mathbf{p}}$:

$$d' = d + w\check{p}_i^2 \quad (2.38a)$$

$$w' = \frac{dw}{d'} \quad (2.38b)$$

$$\bar{c} = \frac{d}{d'} \quad (2.38c)$$

$$\bar{s} = \frac{w\check{p}_i}{d'} \quad (2.38d)$$

$$\left. \begin{aligned} \check{p}'_j &= \check{p}_j - \check{p}_i \check{u}_j \\ \check{u}'_j &= \check{c} \check{u}_j + \check{s} \check{p}_j \end{aligned} \right\}, \quad j = i + 1 \dots n + 1 \quad (2.39)$$

em que \check{c} e \check{s} são, agora, os parâmetros que definem cada rotação elementar.

A coluna $(n + 1)$ dos vetores $\check{\mathbf{u}}'$ e $\check{\mathbf{p}}'$ representam as informações dos valores das medidas, que são rotacionadas juntamente com as linhas da matriz de observação.

Após as rotações, o valor da função-objetivo (2.6) é obtido através do multiplicador $d_{(n+1)}$ da linha adicional de \mathbf{U} , sem a necessidade de cálculos adicionais [61].

Esta versão das rotações de Givens recebe o nome de três multiplicadores (G3M) devido ao número de multiplicações requeridas nas transformações representadas na Equação (2.39). As Equações em (2.38) indicam que ambos os fatores de escala variam em consequência da rotação, assim como as linhas da matriz \mathbf{U} e a diagonal da matriz \mathbf{D} . A inclusão de tais fatores de peso no algoritmo torna o processo naturalmente adequado à solução de mínimos quadrados ponderados, sem qualquer esforço computacional adicional. O valor inicialmente atribuído ao fator de pesos das linhas w é o peso associado à medida correspondente, que é o inverso do valor de sua variância [47], ou seja, para uma medida i sua ponderação será $w_i = 1/\sigma_i^2$.

2.4.2.3 Tratamento das Informações *A Priori*

A partir dos fatores de escala w já definidos para o conjunto de medidas, é relevante fazer uma interpretação para o fator de ponderação d associado às linhas da matriz \mathbf{U} . De forma semelhante à w , o valor inicial de d sugere também um peso, mas neste caso, associado aos estados do problema, pois pode-se notar que a quantidade de pesos d é a mesma de variáveis de estado. Além disso, os valores iniciais de d_i devem ser atribuídos aos estados antes do processamento de qualquer medida. Em outras palavras, d_i é um fator de peso para a informação *a priori* disponível para a variável de estado x_i . Adicionalmente, o valor agregado à d_i deve ser estabelecido de acordo com a Equação (2.7), cujo termo designa como as informações *a priori* devem ser levadas em conta no processo de estimação de estados. Portanto, isto leva a conclusão que [41]:

$$d_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (2.40)$$

onde σ_i^2 é variância da informação *a priori* para a variável de estado i .

Tecnicamente, em aplicações convencionais das rotações de G3M a problemas de EESP nas quais não são utilizadas informações *a priori*, os valores da matriz $\mathbf{D}^{(0)}$ são inicializados como zero ($d_i = 0$), enquanto $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$ é inicializada como uma matriz diagonal unitária ($\check{u}_{ii}^0 = 1, 0$) [47]. Isto deve ser interpretado como a existência de conhecimento prévio nulo sobre os valores iniciais para os estados, ou seja, suas variâncias *a priori* são infinitas [41].

Dessa maneira, pode-se concluir que a informação prévia sobre os estados pode ser facilmente atribuída, sem custo computacional, no processo de rotações rápidas de Givens inicializando o elemento extra em \check{u}_{n+1} da Equação (2.35) como \bar{x}_i , e d_i como mostrado na Equação (2.40). Logo, realizando uma analogia com a Equação (2.27), a inicialização é dada por:

$$\bar{\mathbf{U}}^{(0)} \mathbf{x}^{(0)} = \bar{\mathbf{y}}^{(0)} \quad (2.41)$$

em que $\mathbf{x}^{(0)}$ é o vetor inicial para os estados e $\bar{\mathbf{y}}^{(0)}$ é o vetor que possui os valores relacionados às informações *a priori* de estado e equivalente a $\bar{\mathbf{x}}$.

2.5 Técnicas de Processamento de Medidas com Erros Grosseiros

No contexto de EESP, erros grosseiros são medidas que possuem maior imprecisão do que é assumido quando os erros de medição são modelados. Medidas que são identificadas claramente com erros na etapa de pré-filtragem são automaticamente rejeitadas, isto é, ocorre o descarte de uma ou mais medidas que não estão dentro de certos limites plausíveis [2, 29].

A presença de medidas errôneas processadas pelo estimador faz com que seu desempenho seja afetado, normalmente resultando na estimação de estados distantes da real condição de operação, e em casos mais severos pode ocorrer a não-convergência do algoritmo computacional. Portanto, faz-se necessário a aplicação de técnicas para realizar a detecção de medidas portadoras de erros grosseiros no conjunto de medidas, além da sua devida identificação para que possa ser eliminada do plano de medição ou substituída por pseudomedidas [30, 31].

Esta seção aborda as principais técnicas para a detecção de erros grosseiros e identificação de tais medidas, além de apresentar as vantagens oferecidas pelos métodos ortogonais de estimação de esta-

dos, apresentados na Subseção 2.4.2, por se tratarem de procedimentos computacionais para o processamento de medidas espúrias.

2.5.1 Matrizes de Covariância e Resíduo Normalizado

Tendo por base o vetor de resíduos definido pelo modelo não-linear na Equação (2.4), pode-se notar que os resíduos são claramente os desvios entre as medidas coletadas da rede e os valores das medidas computadas pelo algoritmo dos mínimos quadrados ponderados. Como será visto em seguida, uma das formas mais utilizadas para se identificar medidas errôneas consiste na análise dos resíduos normalizados. Para obtê-los, é necessário o cálculo da matriz de covariância dos resíduos, dada por [29]:

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{R}_m - \mathbf{H}_m \mathbf{G}^{-1} \mathbf{H}_m^T \quad (2.42)$$

em que \mathbf{G} é a matriz ganho calculada conforme a Equação (2.20). O inverso da matriz ganho é chamada de matriz de covariância dos erros de estimação [29, 31], denotada por Σ :

$$\Sigma = \mathbf{G}^{-1} = (\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} \quad (2.43)$$

Logo, os resíduos normalizados são calculados dividindo-se cada componente do vetor de resíduos \mathbf{r} pelo desvio-padrão correspondente obtido da matriz de covariância dos resíduos, proveniente da Equação (2.42), ou seja:

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{C_{r,ii}}} \quad (2.44)$$

em que r_i^N é o resíduo normalizado associado à medida i , e $C_{r,ii}$ é o elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos.

É possível mostrar que, se apenas uma medida do plano de medição for portadora de erro grosseiro e as demais perfeitas, o maior resíduo normalizado corresponde à medida com erro [29]. Desde que o nível de redundância seja adequado, esta propriedade será válida para o caso de erros múltiplos, procedimento este denominado de Identificação por Eliminação [34]. Várias metodologias para o processamento de erros grosseiros foram desenvolvidos baseando-se neste princípio, onde ciclos sucessivos de detecção, identificação e reestimação são efetuados até que todas as medidas com erros sejam eliminadas [2].

2.5.2 Testes de Hipóteses

Após a obtenção das estimativas dos estados $\hat{\mathbf{x}}$ e das quantidades medidas $\hat{\mathbf{z}}_m$, o processamento de erros grosseiros inicia-se pela aplicação de testes de hipóteses sobre funções destas quantidades, com o objetivo de verificar se as estimativas são compatíveis com a exatidão preconizada pelos respectivos desvios-padrão. São apresentadas a seguir duas formulações analíticas do processo de análise de erros grosseiros, que são o teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$, utilizado somente para a detecção, e o teste- \hat{b} , que pode ser empregado para a detecção e identificação de medida espúria.

2.5.2.1 Teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ para a Detecção de Erros Grosseiros

O teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ é uma forma indireta para detectar a presença de medidas portadoras de erro grosseiro no plano de medição utilizando um teste estatístico. Quando não ocorre a presença dessas medidas, a variável aleatória $J(\hat{\mathbf{x}})$ (soma ponderada do quadrado dos resíduos) segue uma distribuição do Qui-quadrado (χ^2) [29, 63]. Em outras palavras, a estimação de estado fornece um valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$, para um dado vetor de estados estimados ($\hat{\mathbf{x}}$), e deve-se verificar se o valor observado atende ou não à hipótese da distribuição do χ^2 , considerando-se uma probabilidade de falso alarme pré-fixada α . Caso o valor computado de $J(\hat{\mathbf{x}})$ exceda o limiar calculado a partir da distribuição do χ^2 e do valor de α , conclui-se que há a presença de erro grosseiro [63].

Partindo da hipótese que os erros das medidas são variáveis aleatórias gaussianas independentes sem a presença de erros grosseiros, o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ apresenta uma distribuição do Qui-quadrado com ℓ graus de liberdade, sendo que $\ell = m - n$, onde m é o número de medidas e n o número de estados de acordo com modelo de medição na Subseção 2.2.1 [29].

Por conseguinte, o valor do limiar K é dado por:

$$K = \chi_{\ell, \alpha}^2 \quad (2.45)$$

onde $\chi_{\ell, \alpha}^2$ é o valor do percentil da distribuição do χ^2 para ℓ graus de liberdade, com uma probabilidade de falso alarme α fixada, assumida previamente como parâmetro de projeto.

Portanto, pode-se firmar duas hipóteses para o teste de detecção de erros:

- H_0 : Se $J(\hat{\mathbf{x}}) \leq K$, então não existem medidas com erros grosseiros

ros;

- H_1 : Se $J(\hat{\mathbf{x}}) > K$, então existem medidas com erros grosseiros.

Caso a hipótese H_1 seja verdade, a realização do processo da identificação da medida contaminada pelo erro grosseiro segue pelo método do máximo resíduo normalizado com as Equações (2.42) e (2.44).

2.5.2.2 Teste- \hat{b} para a Detecção e Identificação de Erros Grosseiros

O método- \hat{b} pode realizar tanto a detecção quanto a identificação de medidas portadoras de erros grosseiros e foi originalmente proposto como uma alternativa do teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$, convencionalmente utilizado para a detecção de medidas espúrias. O método baseia-se em uma estimativa para a amplitude o erro grosseiro associado à uma medida i , dada por [30]:

$$\hat{\beta}_i = \frac{\sigma_i^2}{\sqrt{C_{r,ii}}} r_{N,i} \quad (2.46)$$

em que σ_i^2 é a variância da medida i , $C_{r,ii}$ é o valor associado à matriz de covariância dos erros de medição, e $r_{N,i}$ é o resíduo normalizado. Uma interpretação para o valor de $\hat{\beta}$ é o quanto o erro da medida i é discrepante dos demais. O teste- \hat{b} consiste em uma comparação de $\hat{\beta}$ com um limiar dado por $\lambda\sigma_i$, com σ_i sendo o desvio-padrão da medida considerada e λ um inteiro usualmente considerado igual a 4 [2]. Com isto é possível concluir se o erro está fora ou não da faixa esperada de $\pm 3\sigma_i$.

A estimativa do erro associado à medida i pode ser expressa como uma magnitude do erro medida em números de desvios-padrão, e é dada por:

$$\hat{b}_i = \frac{|\hat{\beta}_i|}{\sigma_i} \quad (2.47a)$$

ou ainda na forma

$$\hat{b}_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{C_{r,ii}}} |r_{N,i}| \quad (2.47b)$$

Neste caso, o valor calculado de \hat{b} deve ser comparado com λ .

A partir das considerações realizadas é possível detectar erros grosseiros e também identificar a medida espúria [30] mediante o seguinte algoritmo:

1. Estimar os estados $\hat{\mathbf{x}}$ por um método de resolução do problema de MQP da Equação (2.6);
2. Calcular os resíduos normalizados de todas as medidas do plano de medição a partir da Equação (2.44);
3. Encontrar a medida i com o maior valor absoluto do resíduo normalizado $|r_{N,i}|$;
4. Determinar a magnitude do erro \hat{b}_i pela Equação (2.47);
5. Verificar se a medida $z_{m,i}$ possui erro grosseiro:
 - (a) Se $\hat{b}_i > \lambda$, a medida $z_{m,i}$ é portadora de erro grosseiro, seguir para o Item 6;
 - (b) Caso o contrário não há erro grosseiro nas medidas e a estimação é finalizada.
6. Retirar a medida $z_{m,i}$ do plano de medição e realizar uma nova estimação de estados a partir do Item 1.

2.5.3 Processamento de Erros Grosseiros via Método das Rotações de Givens

2.5.3.1 Detecção

As técnicas de detecção de erros grosseiros em medidas analógicas podem ser associadas ao método das rotações de Givens, cujos recursos são vantajosos para a análise de tais erros. O procedimento tira proveito da disponibilidade da soma ponderada do quadrado dos resíduos $J(\hat{\mathbf{x}})$ acumulada após o processamento de cada medida. Esta característica permite que o teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ de detecção seja realizado à cada linha da matriz de observação rotacionada [47], comparando o valor acumulado da função-objetivo a um dado limiar obtido do teste estatístico do χ^2 , como apresentado na Subseção 2.5.2.

Assumindo que o grau de redundância das medidas é adequado e que a i -ésima medida possui erro grosseiro, quando a mesma é processada a consequência esperada é que o valor de $J_i(\hat{\mathbf{x}})$ sofra um aumento considerável em relação ao seu valor anterior $J_{(i-1)}(\hat{\mathbf{x}})$. Entretanto, mesmo com a condição de $i < m$, tal aumento nem sempre ocorre logo após o processamento da medida errônea, pois depende da ocorrência

de medidas redundantes com ela no conjunto das medidas já processadas. Portanto, o aumento no valor da função-objetivo $J(\hat{\mathbf{x}})$ não ocorre sempre após a rotação da medida errônea i . Esta é a razão pela qual o teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ serve apenas para detectar a presença de erro grosseiro em alguma das medidas já processadas, sendo ainda necessária uma etapa adicional para a identificação da medida espúria após a detecção positiva de erro grosseiro no conjunto de medidas [47].

2.5.3.2 Identificação

O procedimento para a identificação da medida espúria, utilizando o método das rotações de Givens, é baseado no teste do máximo resíduo normalizado. Contudo, como ocorre na detecção, é possível extrair benefícios do caráter sequencial do método das rotações de Givens para aumentar a eficiência do procedimento da identificação [47].

Os fatores para a normalização dos resíduos são os seus desvios-padrão, isto é, a raiz quadrada dos elementos da diagonal da matriz de covariância dos resíduos, conforme a Equação (2.44), cujo cálculo é a principal dificuldade computacional do teste do máximo resíduo normalizado, devido à necessidade da obtenção da matriz Ganho e de sua inversa. A partir da estimação dos estados pelo método das rotações de Givens, as matrizes $\bar{\mathbf{U}}$ e \mathbf{D} resultantes das rotações podem ser utilizadas para o cálculo da matriz Ganho, o que equivale a dizer:

$$\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m = \bar{\mathbf{U}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{U}} \quad (2.48a)$$

ou ainda:

$$(\mathbf{H}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{H}_m)^{-1} = \bar{\mathbf{U}}^{-1} \mathbf{D}^{-1} \bar{\mathbf{U}}^{-T} \quad (2.48b)$$

Como $\bar{\mathbf{U}}$ é uma matriz triangular superior unitária, sua inversa é obtida de forma bem eficiente [47].

Também, de outra forma, é possível mostrar que a matriz de covariância dos resíduos pode ser computada como [40]:

$$\mathbf{C}_r = \mathbf{R}_m - \mathbf{Z} \mathbf{D}^{-1} \mathbf{Z}^T \quad (2.49)$$

em que:

$$\mathbf{Z} \triangleq \mathbf{H}_m \bar{\mathbf{U}}^{-1} \quad (2.50)$$

Com base nesta característica de obtenção da matriz \mathbf{C}_r , torna-se imediata a aplicação do teste- \hat{b} . O procedimento deve ser aplicado

ao final das rotações de todas as medidas e com a obtenção do maior resíduo normalizado. Assim, é possível a detecção, a identificação, e posteriormente, a remoção da medida.

2.5.3.3 Remoção

No método da Equação Normal, a detecção de um erro grosseiro entre as medidas processadas pelo estimador invalida os resultados da estimação de estados, já que estas estão contaminadas pelos efeitos de uma ou mais medidas espúrias. No mesmo método convencional, quando a medida portadora de erro grosseiro é devidamente identificada, uma nova estimação de estados deve ser realizada a partir do início, entretanto, com a medida espúria excluída. Isto não retira nenhuma vantagem de todas as informações obtidas na estimação anterior, que foi contaminada pelo erro grosseiro.

Quando se utiliza as rotações de Givens é possível adotar um procedimento decorrente da ortogonalidade do método, o qual permite a remoção dos efeitos dos erros sobre as matrizes $\bar{\mathbf{U}}$ e \mathbf{D} , logo após a identificação da medida com erro. A técnica consiste em reprocessar a medida identificada pelo algoritmo de Givens com o peso igual ao negativo do valor do peso original ($-w_i$) [47]. Ao final, o valor da soma ponderada do quadrado dos resíduos deve decrescer em relação ao valor inicial afetado pela presença do erro grosseiro. Isto equivale em obter um valor para $J(\hat{\mathbf{x}})$ sem considerar que a medida espúria teria sido processada.

2.6 Conclusão

A EESP é uma ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos e tem o objetivo de subsidiar os aplicativos que procuram garantir a segurança da operação do sistema, assim como cumprir as exigência de confiabilidade, qualidade e continuidade do suprimento da energia elétrica. Dentre os métodos de solução para o problema de Mínimos Quadrados Ponderados da EESP, o Método da Equação Normal fornece soluções práticas, embora possa falhar devido à instabilidade numérica causada pelo mau condicionamento da matriz Jacobiana. Os métodos baseados em transformações ortogonais mostram-se bastante robustos para lidar com tais problemas, especialmente por evitar o cálculo explícito da matriz Ganho.

Dentre esses métodos, destacam-se as variantes baseadas em rotações de Givens, por serem capazes de operar matrizes por linhas, realizando um processo de triangularização a partir do processamento de uma medida de cada vez. Pode-se concluir também que, dentre as formulações baseadas nas rotações de Givens, a vertente de três multiplicadores possui melhor desempenho, devido à redução nos cálculos e a inserção de informações *a priori* sem custo computacional extra.

Um importante processo para a estimação de estado é a etapa da análise de medidas portadoras de erros grosseiros em que, dada uma boa redundância do sistema, faz-se necessário a detecção, a identificação e a remoção de medidas espúrias. Uma das qualidades do método de Givens é a execução de tais técnicas a partir do processo de rotações das medidas e das matrizes resultantes, seja para detectar, identificar ou remover informações espúrias.

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA

3.1 Introdução

Antes da aplicação de diversos métodos que estão disponíveis na literatura para a realização da EESP é necessária a escolha do tipo de modelagem do sistema, que deve ser pautada pelo nível de detalhamento das informações fornecidas, bem como a robustez e confiabilidade do algoritmo, considerando-se igualmente o esforço computacional requerido.

Nas aplicações práticas, utiliza-se normalmente a modelagem barra-ramo para a rede. Neste caso, os dados digitais correspondentes aos *status* das chaves e disjuntores são processados pelo Configurador da Rede elétrica, que fornece a modelagem barra-ramo a partir da análise de conectividade realizada no nível físico das subestações da rede. Portanto, a estimação de estados convencional pressupõe que os dados fornecidos pelo Configurador de Redes estejam todos corretos, embora não se possa afirmar que isto seja sempre verdade.

Neste capítulo são abordados alguns conceitos fundamentais para a estimação de estados no nível de seção de barra, partindo da expansão do modelo convencional na Seção 3.2. Na Seção 3.3 aborda-se as definições de restrições para o problema de otimização para a resolução da estimação no nível de seção de barra.

3.2 Expansão do Modelo Convencional

A representação da expansão do modelo convencional permite realizar a estimação de estados em sistemas modelados no nível de seção de barra, onde chaves e disjuntores são explicitamente representados. Os fluxos através desses ramos chaveáveis são incluídos no problema de estimação como novas variáveis de estado. Isto implica no aumento do número de variáveis a serem estimadas. Entretanto, este nível de detalhamento permite a inclusão de novas informações provenientes desta representação (medidas de fluxo nos disjuntores, injeção de potência nula em nós do sistema e diferença angular e de potencial nulas em disjuntores fechados). Esta análise se tornou necessária a partir do momento em que a representação detalhada de determinadas subestações geram informações sobre a topologia e conectividade da rede,

melhorando o desempenho do monitoramento de segurança e controle de operação em tempo real [6].

Neste trabalho, subestações selecionadas são consideradas áreas suspeitas do SEP, no sentido de verificar se as informações sobre os *status* das chaves seccionadoras e disjuntores pertencentes às subestações estão realmente corretas. Para tal, essas regiões devem ser modeladas no nível de seção de barra.

Ao contrário dos outros elementos do sistema, as impedâncias dos ramos chaveáveis são nulas ou infinitas, que refletem a operação de dispositivos fechados ou abertos, respectivamente. O uso do artifício de representar ramos chaveáveis como ramos convencionais cujas impedâncias são muito altas ou muito pequenas tende a gerar problemas de condicionamento numérico no processamento dos dados do sistema, reduzindo o desempenho e a confiabilidade nos resultados do estimador de estados. Para contornar este problema, as propostas fundamentadas em [3–5] elimina o aparecimento da impedância dos ramos chaveáveis no modelo matemático da rede, solucionando o problema numérico citado anteriormente.

O acréscimo dos fluxos através dos disjuntores como novas variáveis de estado faz com que as eventuais medidas de fluxo de potência sobre esses ramos sejam expressas unicamente em função das novas variáveis de estado. Assim, tomando um disjuntor conectado aos nós i e j , os fluxos de potência ativa e reativa t_{ij} e u_{ij} através deste são incluídos no vetor de estados. Portanto, além dos ângulos e das magnitudes de tensão nas barras, o vetor de estados \mathbf{x} passa a ser formado também pelos fluxos ativo e reativo de todos os ramos chaveáveis modelados, isto é:

$$\mathbf{x} = [\boldsymbol{\delta}^T \quad \mathbf{V}^T \quad \mathbf{t}^T \quad \mathbf{u}^T]^T \quad (3.1)$$

onde \mathbf{t} e \mathbf{u} são os vetores referentes aos fluxos de potência ativa e reativa, respectivamente, que passam pelos disjuntores. Deste modo, o número de variáveis de estado do problema aumentado, denotado por n_a , passa a ser:

$$n_a = n + 2n_d \quad (3.2)$$

sendo que $n = 2N$, onde N é o número total de nós do sistema, e n_d é o número de dispositivos chaveáveis modelados.

Consequentemente, as medidas de fluxo de potência que estão diretamente ligadas aos fluxos dos disjuntores são representadas pelas

novas variáveis de estado, e assim modeladas por:

$$z_{t_{ij}} = t_{ij} + \varepsilon_{t_{ij}} \quad (3.3)$$

$$z_{u_{ij}} = u_{ij} + \varepsilon_{u_{ij}} \quad (3.4)$$

em que $\varepsilon_{t_{ij}}$ e $\varepsilon_{u_{ij}}$ são os erros aleatórios das medidas de fluxo de potência ativa e reativa no disjuntor entre os nós i e j , respectivamente.

As medidas de injeção de potência ativa e reativa em nós que envolvem os ramos chaveáveis também são expressas em função das novas variáveis de estado, a partir da soma dos fluxos de potência dos ramos incidentes à barra onde a injeção é medida. No caso dos ramos convencionais, os fluxos são calculados da maneira usual. Já os fluxos nos ramos chaveáveis são representados pelas respectivas variáveis de estado adicionadas ao modelo. Assim, se as injeções de potência ativa e reativa da barra i são medidas, então, as injeções ativa z_{p_i} e reativa z_{q_i} são expressas por:

$$z_{p_i} = \sum_{k \in \bar{\Omega}_i} t_{ik}(\delta_i, \delta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \bar{\Gamma}_i} t_{il} + \varepsilon_{p_i} \quad (3.5)$$

$$z_{q_i} = \sum_{k \in \bar{\Omega}_i} u_{ik}(\delta_i, \delta_k, V_i, V_k) + \sum_{l \in \bar{\Gamma}_i} u_{il} + \varepsilon_{q_i} \quad (3.6)$$

onde:

t_{ik} : fluxos de potência ativa no ramo $i - k$;

u_{ik} : fluxos de potência reativa no ramo $i - k$;

t_{il} : fluxos de potência ativa no disjuntor entre os nós $i - l$;

u_{il} : fluxos de potência reativa no disjuntor entre os nós $i - l$;

$\bar{\Omega}_i$: conjunto de ramos convencionais incidentes à barra i ;

$\bar{\Gamma}_i$: conjunto de ramos chaveáveis incidentes à barra i ;

ε_{p_i} : erros aleatórios da medida de injeção e potência ativa na barra i ;

ε_{q_i} : erros aleatórios da medida de injeção e potência reativa na barra i .

3.3 Formulação do Problema de Otimização Restrita

A inclusão dos dispositivos chaveáveis ao problema de EESP são apresentados em diversos estudos, como em [2, 6], que destacam a solução do problema como uma Estimação de Estados Generalizada (EEG) em que as novas informações do modelo expandido são incluídas ao modelo convencional como pseudomedidas ou “medidas virtuais”. Diferentemente deste procedimento, a Estimação de Estados em Nível de Seção de Barra (EENSB) trata a inclusão dessas informações como *restrições de igualdade* do problema de otimização, e faz o uso dos multiplicadores de Lagrange para a identificação correta da topologia da rede elétrica, como apresentado nas metodologias das referências [38], [40] e [64].

As informações sobre os *status* dos disjuntores e chaves seccionadoras que são representadas no modelo devem ser incluídas no problema de estimação de estados. Desta forma, se um disjuntor estiver fechado, a diferença angular e queda de tensão entre os seus terminais são nulas. Por outro lado, se um disjuntor estiver aberto, o fluxo ativo e reativo através do mesmo será zero. As outras informações aplicadas ao problema, como as barras de injeção de potência nula, também devem ser modeladas. Isto acarreta dois tipos de informações diferentes que são tratadas sob forma de restrições de igualdade, conforme descrito nas próximas subseções.

3.3.1 Condições Operacionais

A generalização do problema de EESP requer a representação detalhada de regiões da rede previamente identificadas como suspeitas de conter erros de modelagem. Como colocado anteriormente, a formulação do problema EENSB pelo método MQP é tratada como um problema de otimização com restrição. Para isto, a modelagem das chaves seccionadoras e disjuntores são tratadas como *condições operacionais* no problema EENSB que busca representar a atual condição operativa de tais dispositivos, explorando a característica elétrica do sistema. Assim, um disjuntor que conecta os nós i e j terá sua característica operativa adicionada ao modelo. Como ressaltado no início da Seção 3.3, se este ramo estiver fechado a diferença angular e a queda

de tensão são nulas, isto é:

$$\delta_i - \delta_j = 0 \quad (3.7)$$

$$V_i - V_j = 0 \quad (3.8)$$

Por outro lado, se o disjuntor estiver aberto, este será representado pelas restrições:

$$t_{ij} = 0 \quad (3.9)$$

$$u_{ij} = 0 \quad (3.10)$$

Com isso, a formulação genérica das condições operacionais para os disjuntores fechados e abertos nas Equações (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10) são representadas no problema de EENSB sob forma de restrição de igualdade, formando um vetor de funções não-lineares $\mathbf{h}_o(\cdot)$ expresso por:

$$\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

onde, $\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})$ possui dimensão $(2n_d \times 1)$, e $\hat{\mathbf{x}}$ é o vetor de estados estimados do sistema, abrangendo tanto as variáveis nodais convencionais quanto os fluxos de potência ativa e reativa através dos disjuntores.

3.3.2 Restrições Estruturais

Além das condições operacionais, outras restrições podem ser exploradas a partir da configuração física da rede elétrica, como a existência de barras de passagem ou de transferência que possuem injeção de potência nula. Estas informações são denominadas *restrições estruturais*, e são consequência da estrutura física da rede modelada no nível de subestação e não são alteradas por aberturas ou fechamentos de dispositivos chaveáveis. Assim, as injeções de potência nula são modeladas como restrições de igualdade, de forma que, para qualquer barra i , têm-se:

$$P_i(V, \delta) = 0 \quad (3.12)$$

$$Q_i(V, \delta) = 0 \quad (3.13)$$

em que P_i e Q_i são as injeções de potência ativa e reativa na barra i , respectivamente.

Além disso, a escolha de uma barra i como referência angular para o sistema também pode ser modelada com uma restrição estrutural e que resulta em uma equação do tipo:

$$\delta_i = 0 \quad (3.14)$$

Portanto, as restrições relacionadas às barras de injeção nula, nas Equações (3.12) e (3.13), e à da barra de referência, Equação (3.14), são genericamente tratadas no problema de EENSB por:

$$\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \quad (3.15)$$

onde, $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$ possui dimensão $(n_s \times 1)$ e n_s é o número de restrições estruturais do problema.

3.3.3 Formulação do Problema de EENSB

Considerando um sistema em que determinadas barras são detalhadas no nível de subestação, as condições operacionais e restrições estruturais serão adicionadas ao problema de otimização, com a resolução pelo critério dos MQP da Equação (2.6), e pode ser formulado por:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{r}_m^T \mathbf{R}_m^{-1} \mathbf{r}_m \\ \text{sujeito a} \quad & \mathbf{r}_m = \mathbf{z}_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}) \\ & \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \\ & \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3.16)$$

onde \mathbf{r}_m é o vetor de resíduos das medidas de dimensão $(m \times 1)$, \mathbf{R}_m é a matriz de covariância dos erros de medição, suposta diagonal e de dimensão $(m \times m)$ e $\hat{\mathbf{x}}$ é o vetor de estimativas para os estados de dimensão $(n_a \times 1)$, e n_a definido como na Equação (3.2).

Nota-se que a barra de referência é incluída no problema sob forma de restrição de igualdade, fazendo parte das restrições estruturais, e portanto, constitui o conjunto de variáveis a serem estimadas.

3.3.4 Tratamento de Restrições de Igualdade como Pseudomedidas

Devido à sua simplicidade, o uso pseudomedidas pode ser utilizado como um método de aproximação para as restrições de igualdade no processo de estimação de estados. Entretanto, a utilização desta característica em métodos de resolução convencionais por MQP, como a Equação Normal, pode dar origem a problemas numéricos [65]. Para contornar tal questão, a EENSB pode ser modelada por métodos mais robustos, como o método Tableau Esparsa de Hachtel [66] ou pelo método das rotações de Givens, apresentado da Subsecção 2.4.2. Para tal, é necessário realizar algumas generalizações para as matrizes e vetores do processo [67].

A matriz Jacobiana \mathbf{H} será formada, agora, pela matriz referente às medidas analógicas obtidas pelo plano de medição e pelas matrizes referentes às pseudomedidas, originadas das restrições de igualdade (restrições estruturais e condições operacionais). Logo, tem-se que:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ \mathbf{H}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}^k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \\ \frac{\partial \mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}^k)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

onde k indica a iteração corrente do algoritmo de estimação.

O vetor $\Delta \mathbf{z}$ também deve ser modificado para o cálculo em cada iteração, obtendo-se:

$$\Delta \mathbf{z}^k = \begin{bmatrix} z_m - \mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ -\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}}^k) \\ -\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}}^k) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Por fim, a matriz de covariância para o problema resulta em:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_o \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

em que \mathbf{R}_m , \mathbf{R}_s e \mathbf{R}_o são as matrizes diagonais de covariância das medidas, das restrições estruturais e das condições operacionais, respectivamente. Teoricamente, \mathbf{R}_s e \mathbf{R}_o são matrizes nulas, pois correspondem à informações determinísticas. Entretanto, para prevenir problemas numéricos na solução do processo é conveniente tornar as referidas diagonais iguais à $\varepsilon_s \mathbf{I}$ e $\varepsilon_o \mathbf{I}$, respectivamente, em que \mathbf{I} é a matriz identidade em dimensões apropriadas. O valor dos parâmetros ε_s e ε_o são escolhidas em alguma ordem de magnitude menor do que as típicas variâncias das medidas [67].

3.4 Conclusão

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos para a EENSB que utiliza a expansão do modelo convencional, introduzindo a modelagem no nível de subestação na estimação de estados. Isto permite realizar a formulação do problema EENSB com base em um problema de otimização restrita, cujas restrições de igualdade surgem da inclusão dos dispositivos chaveáveis.

Os conceitos de condições operacionais e restrições estruturais introduzidos neste capítulo serão também utilizados na formulação na Estimação Integrada de Estados e Topologia, a qual explora a possibilidade de tratar as condições operacionais como informações *a priori*, conforme discutido no Capítulo 4.

4 ESTIMAÇÃO INTEGRADA DE ESTADOS E TOPOLOGIA

4.1 Introdução

A Estimação Integrada de Estados e Topologia (EIET) possui como base as contribuições prévias que determinam a representação de partes da rede elétrica suspeitas de estarem contaminadas por erros de modelagem [2, 38, 42]. Adicionalmente, a referida proposta baseia-se no reconhecimento de que as medidas analógicas contêm intrinsecamente informações relacionadas à topologia da rede. Tal observação não é normalmente explorada na modelagem em tempo real de sistemas de potência, que analisa o processo de determinação da topologia e a estimação de estados como tarefas completamente disjuntas. Estudos mais recentes, como apresentados em [24, 25, 45], abordam uma unificação do processo.

A metodologia proposta neste trabalho é capaz de extrair das medidas analógicas disponíveis informações sobre a topologia atual, enquanto estima simultaneamente os ângulos e magnitudes das tensões nodais. Para tal, a EIET trata a saída do Configurador de Redes como informação *a priori* da topologia, o que torna-se possível pela modelagem de porções relevantes do Sistema Elétrico de Potência (SEP) no nível de seção de barra.

Deste modo, para a resolução do problema de EIET faz-se o uso de algoritmos ortogonais de estimação, capazes de processar informações *a priori* de estados sem custo computacional extra, além de aproveitar as características de processamento de erros grosseiros. Ressalta-se também que o método conserva as propriedades estatísticas, mantendo as concepções dos testes de hipóteses para a detecção de anomalias no sistema, sejam elas erros na topologia e/ou erros grosseiros em medidas analógicas.

Neste capítulo será apresentada a proposta do problema de EIET, iniciando com a formulação matemática na Seção 4.2. A Seção 4.3 aborda a resolução do método através das rotações de Givens. Os índices de desempenho dos algoritmos, a validação da topologia e a análise de erros grosseiros são tratados nas Seções 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente. Na Seção 4.7 é apresentado o algoritmo para a metodologia proposta, e a aplicação do método a um exemplo ilustrativo é mostrado na Seção 4.8.

4.2 Formulação do Problema

O objetivo da EIET é estimar concomitantemente os estados convencionais do problema de estimação de estados e os fluxos nos dispositivos chaveáveis, com a finalidade de determinar seus *status*. Para tal, a formulação do problema é baseada no modelo não-linear do sistema elétrico e a modelagem de partes da rede no nível de seção de barra. Ou seja, neste trabalho serão considerados como variáveis de estado os ângulos e magnitudes das tensões de cada barra do sistema (chamados de *estados nodais*) e os fluxos ativo e reativo nos ramos chaveáveis (chamados de *estados de fluxo*).

Como apresentado na Subseção 2.3.1, a função-objetivo será formada por dois termos quadráticos: um referente à soma ponderada do quadrado dos resíduos de estimação, que basicamente determina as estimativas para as variáveis de estado do sistema de potência, e o outro referente às informações *a priori* dos estados, utilizado para a estimação da topologia. As restrições estruturais provenientes da consideração do modelo no nível de seção de barra são incluídas como pseudomedidas de alta precisão, como abordado na Seção 3.3.

Portanto, o problema de minimização será dado pela função-objetivo $J(\cdot)$, que combina os critérios (2.6) e (2.7) como segue:

$$\text{Minimizar } J(\mathbf{r}, \hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r} + (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}}) \quad (4.1)$$

$$\text{sujeito a } \mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})$$

em que:

$$\mathbf{z} = [\mathbf{z}_m^T, \mathbf{0}]^T \quad (4.2a)$$

$$\mathbf{h} = [\mathbf{h}_m(\hat{\mathbf{x}})^T, \mathbf{h}_s \hat{\mathbf{x}}^T]^T \quad (4.2b)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_m & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_s \end{bmatrix} \quad (4.2c)$$

dado que:

\mathbf{z}_m : é o vetor ($m \times 1$) que contém os valores das medidas;

$\mathbf{h}_m(\cdot)$: é o vetor ($m \times 1$) de funções não-lineares das medidas;

$\mathbf{h}_s(\cdot)$: é o vetor ($n_s \times 1$) de funções não-lineares impostas pelas restrições estruturais;

\mathbf{R}_m : é a matriz diagonal de covariância dos erros de medição;

\mathbf{R}_s : é a matriz diagonal de covariância das restrições estruturais;

\mathbf{P} : é a matriz de covariância dos valores dos estados *a priori* $\bar{\mathbf{x}}$.

Deve-se enfatizar que os valores das variâncias de \mathbf{R}_s , iguais a $\varepsilon_s \mathbf{I}$, são algumas ordens de magnitude menores que as variâncias das medidas¹ \mathbf{R}_m , e que as condições operacionais $\mathbf{h}_o(\hat{\mathbf{x}})$, que modelam a topologia presumida (*status* dos dispositivos chaveáveis), serão tratadas como informação *a priori*, conforme será discutido no próximo tópico. Destaca-se também que a função-objetivo da Equação (4.1) é composta por dois termos sujeitos a ponderações, realizadas respectivamente pelo inverso da matriz de covariância das medidas e pseudomedidas, \mathbf{R}^{-1} , e da matriz de covariância das informações *a priori* sobre os estados, \mathbf{P}^{-1} , sendo que esta última contém os pesos que ponderam tais informações e promovem o balanceamento de ambos os termos do critério de otimização.

A solução do problema de otimização na Equação (4.1) pode ser obtida através do método Gauss-Newton que recai na seguinte versão estendida da Equação Normal (2.19) [41]:

$$[\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{P}^{-1}] \Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} + \mathbf{P}^{-1} \Delta \bar{\mathbf{x}} \quad (4.3)$$

em que \mathbf{H} é a matriz Jacobiana do vetor $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ computada em um dado ponto \mathbf{x}^k , $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)$ e $\Delta \bar{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^k$. A solução da Equação (4.3) fornece um vetor de estados incremental $\Delta \mathbf{x}$. Portanto, a estimação de estados recai em um processo iterativo em que a cada iteração os estados são atualizados como:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x} \quad (4.4)$$

As atualizações prosseguem até que a norma infinita do vetor de incrementos, $\|\Delta \mathbf{x}\|_\infty$, seja menor que uma tolerância pré-especificada².

A Figura 4.1 apresenta o algoritmo de resolução do problema de EIET com base na Equação Normal para o modelo não-linear da rede, denotado de *Algoritmo_EqN*:

¹Neste trabalho será adotado um valor constante $\varepsilon_s = 1 \times 10^{-8}$.

²A tolerância é denotada neste trabalho como *tol*, com o valor de 1×10^{-3} .

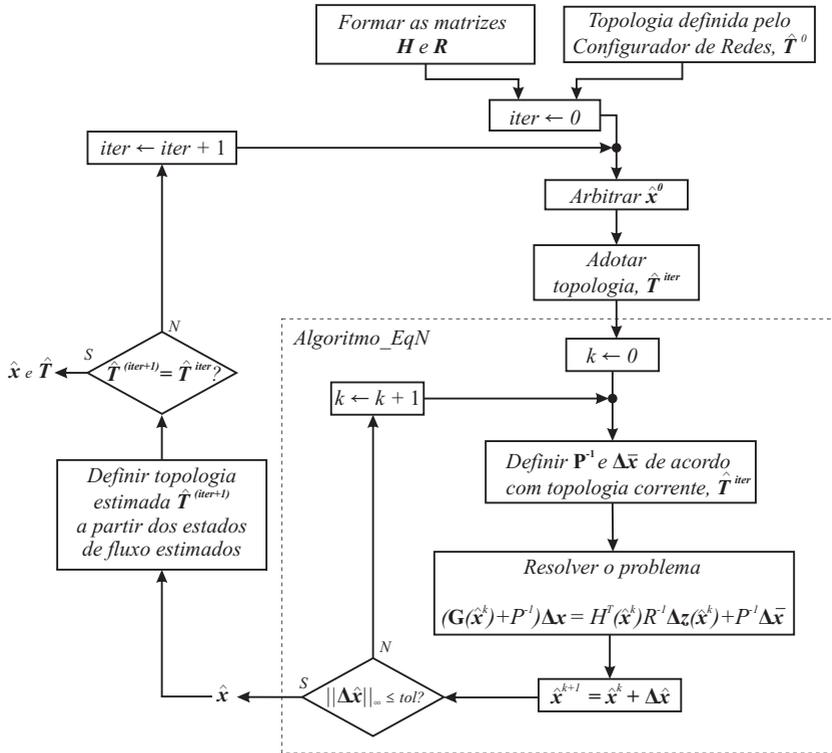


Figura 4.1 – Fluxograma do método de EIET resolvido pela Equação Normal (*Algoritmo_EqN*)

4.2.1 Informação *A Priori* de Topologia: Método de Ajuste Externo

A validação da topologia pelo método proposto neste trabalho é baseada na extração das informações de topologia a partir das medidas analógicas disponíveis ao estimador de estados. Deste modo, os resultados fornecidos pelo Configurador de Redes são inicialmente vistos como topologia presumida, que deve ser confirmada ou revisada pelo Estimador Integrado de Estados e Topologia. Para tal, as condições operacionais são tratadas como informações *a priori* que trazem para o problema, diferenciadamente, o conhecimento sobre os disjuntores

fechados e abertos da rede.

Deste modo, o repasse da topologia presumida em condições operacionais pode ser realizado a cada iteração do processo de solução de estimação de estados, disponibilizando as respectivas informações mediante o vetor de estados *a priori* \bar{x} . O procedimento segue os seguintes passos:

1. Na primeira iteração do processo iterativo de estimação de estados, as informações de estado *a priori* são definidas conforme a *partida plana* para todos os estados de tensão nodal, isto é, 0 *rad* para os ângulos e 1 *p.u.* para as magnitudes das tensões; e 0 *p.u.* para todos os estados de fluxo dos ramos chaveáveis, isto é, fluxos ativo e reativo nos disjuntores;
2. A partir da segunda iteração, os *status* dos ramos chaveáveis são atualizados de forma consistente ou com a saída do Configurador de Redes, como detalhados a seguir:
 - (a) Um disjuntor fechado conectando os nós internos de uma subestação *i* e *j* leva as seguintes definições dos valores de estado *a priori*:

$$\begin{aligned} \delta_i^{(k+1)} &= \delta_j^{(k)} \\ V_i^{(k+1)} &= V_j^{(k)} \end{aligned}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.5)$$

- (b) Um *status* aberto de um disjuntor cujos nós terminais são *i* e *j* é enfatizado no processo de estimação a partir da imposição de fluxo nulo nos estados de fluxo correspondentes do vetor \bar{x} :

$$\begin{aligned} t_{ij}^{(k+1)} &= 0 \\ u_{ij}^{(k+1)} &= 0 \end{aligned}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (4.6)$$

As variâncias das informação apresentadas nas Equações (4.5) e (4.6) devem estar coerentes com a matriz \mathbf{P} e a função-objetivo na Equação (4.1). Tais valores estabelecem uma importância relativa para as informações *a priori* da topologia com respeito às medidas do processo de estimação. Assim, considera-se que o nível de informação sobre os *status* dos disjuntores em uma determinada região suspeita de conter erros de topologia é uniforme, o que equivale a dizer que todas as variâncias associadas a estes dispositivos assumem o mesmo valor, p_{ii} .

Nesta perspectiva, como o termo referente às medidas é ponderado pelo inverso da matriz de covariância dos erros medição, \mathbf{R}_m , é natural se definir os valores para as variâncias em \mathbf{P} em função dos valores presentes nesta matriz [25]. Tal interpretação para definir p_{ii} como função da matriz de covariância das medidas conduz à seguinte relação:

$$p_{ii} = \frac{\bar{R}_m}{k_p} \quad (4.7)$$

onde \bar{R}_m é a média das variâncias das medidas, e k_p é um parâmetro de calibração real e positivo. Vários testes realizados em diferentes sistemas, condições de operações e planos de medição, levaram à determinação de que valores de k_p dentro da faixa $0 < k_p < 1$ asseguram bons resultados, enquanto que valores fora deste intervalo tendem a aumentar o número de iterações para a convergência.

Destaca-se que o método de inicialização das informações dadas pelas Equações (4.5) e (4.6) é chamado de *método de ajuste externo*, pela razão de que as condições de topologia são impostas “por fora” a cada iteração do processo de estimação. Assim, verifica-se que esta abordagem é independente do algoritmo utilizado para a solução da estimação de estados, de modo que não requer propriedades específicas do algoritmo empregado.

4.3 Solução via Rotações de Givens

A solução do problema de otimização (4.1) pode ser obtida mediante aplicação da versão rápida das rotações de Givens, devido à facilidade de implementação de pesos das medidas e das informações *a priori* sem custo computacional extra. Desta forma, o processamento de cada medida é dado conforme apresentado na Subseção 2.4.2, com a versão das rotações de Givens com três multiplicadores (G3M).

Nesta perspectiva, o modelo de inclusão da topologia pelo método de ajuste externo, descrito na Subseção 4.2.1, é facilmente implementado nas rotações de Givens, utilizando o vetor de informações de estados *a priori*, $\bar{\mathbf{x}}$. Por outro lado, podem-se considerar as propriedades relacionadas ao método de G3M e propor uma metodologia alternativa ao método de ajuste externo, partindo da atribuição das condições operacionais diretamente à matriz triangular superior $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$.

4.3.1 Método de Ajuste Externo Considerando as Rotações de Givens com Três Multiplicadores

O tratamento das condições operacionais como informações *a priori* da topologia, considerando o método de ajuste externo e as rotações rápidas de Givens, é realizado de forma análoga à inclusão de informações *a priori* sobre os estados, como abordado na Subseção 2.4.2.2.

Desta forma, a inicialização do algoritmo segue com a matriz triangular superior $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$ tomada como matriz unitária, e o vetor de estados *a priori* contendo os valores de partida plana para os estados de tensão nodal e de fluxo. Adicionalmente, os pesos para informações *a priori* da topologia são alocados na matriz $\mathbf{D}^{(0)}$ e dadas por $d_{ii} = 1/p_{ii}$, em que p_{ii} é a variância das informações, calculada conforme a Equação (4.7).

Para melhor ilustração da inicialização do método a cada iteração, considere dois disjuntores no sistema elétrico: um disjuntor fechado D_η entre os nós i e j , e um disjuntor aberto D_κ entre os nós k e l . Logo, as informações *a priori* da topologia, traduzidas destas condições operacionais disponibilizadas, correspondem às Equações (4.5) e (4.6), respectivamente.

Assim, para o disjuntor fechado D_η os pesos dos estados nodais *a priori* δ_i e V_i são iguais a $d_{\eta\eta}$, e para os estados δ_j e V_j são iguais a zero. Esta última definição corresponde a dizer que não há nenhuma informação sobre os estados nodais da barra j e portanto, suas variâncias são infinitas. Por outro lado, o peso $d_{\eta\eta}$ equivale a dizer que os valores de estado *a priori* relacionados aos estados δ_i e V_i são iguais a δ_j e V_j , respectivamente. Para o disjuntor aberto D_κ , os pesos dos estados de fluxo *a priori* t_{kl} e u_{kl} relacionados ao referido dispositivo são iguais a $d_{\kappa\kappa}$, e os respectivos valores no vetor $\tilde{\mathbf{x}}$ são iguais a zero. Ressalta-se que $1/p_{\eta\eta} = 1/p_{\kappa\kappa} = 1/p_{ii}$. Portanto, na inicialização do

algoritmo, as matrizes $\mathbf{D}^{(0)}$ e $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$ e o vetor $\bar{\mathbf{x}}^{(0)}$ ficam:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{D}^{(0)} \qquad \qquad \qquad \bar{\mathbf{U}}^{(0)} \\
 \left[\begin{array}{cccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} \\
 \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & & & \\
 & 0 & & & & & \\
 & & \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & \\
 & & & 0 & & & \\
 & & & & \ddots & & \\
 & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & \\
 \hline
 & & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & 0
 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{cccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} & \bar{\mathbf{x}}^{(0)} \\
 1 & & & & & & & \delta_j^{(0)} \\
 & 1 & & & & & & 0 \\
 & & 1 & & & & & V_j^{(0)} \\
 & & & 1 & & & & 0 \\
 & & & & \ddots & & & \vdots \\
 & & & & & 1 & & 0 \\
 & & & & & & 1 & 0 \\
 \hline
 & & & & & & & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \tag{4.8a}$$

Após o processamento da primeira iteração das rotações de Givens, o resultado é o vetor de estados \mathbf{x}^1 , utilizado para a formação das matrizes e vetores da próxima iteração. Desta forma, $\mathbf{D}^{(1)}$ e $\bar{\mathbf{U}}^{(1)}$ e o vetor $\bar{\mathbf{x}}^{(1)}$ são:

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{D}^{(1)} \qquad \qquad \qquad \bar{\mathbf{U}}^{(1)} \\
 \left[\begin{array}{cccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} \\
 \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & & & \\
 & 0 & & & & & \\
 & & \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & \\
 & & & 0 & & & \\
 & & & & \ddots & & \\
 & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & \\
 \hline
 & & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & 0
 \end{array} \right] & \left[\begin{array}{cccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} & \bar{\mathbf{x}}^{(1)} \\
 1 & & & & & & & \delta_j^{(1)} \\
 & 1 & & & & & & 0 \\
 & & 1 & & & & & V_j^{(1)} \\
 & & & 1 & & & & 0 \\
 & & & & \ddots & & & \vdots \\
 & & & & & 1 & & 0 \\
 & & & & & & 1 & 0 \\
 \hline
 & & & & & & & 1
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \tag{4.8b}$$

Em seguida, a segunda iteração é processada, e assim segue até que o critério de parada seja atingindo.

4.3.2 Representação da Topologia da Rede Utilizando a Matriz $\bar{\mathbf{U}}^0$: Método de Ajuste Interno

Quando o algoritmo baseado nas rotações rápidas de Givens é selecionado para resolver o problema de estimação integrada de estados e topologia, forma-se uma proposta alternativa para o Método de Ajuste Externo, que realiza a modelagem da topologia presumida como apresentado na Subseção 4.2.1. Basicamente, o método alternativo consiste

em representar as condições operacionais diretamente sobre a matriz inicial $\bar{\mathbf{U}}^0$, assim como a atribuição dos respectivos pesos à matriz \mathbf{D}^0 . Deste modo, $\bar{\mathbf{U}}^0$ é definida de acordo com os *status* presumidos de cada disjuntor do sistema, como segue:

- (a) Um disjuntor aberto D_η , cujos terminais são os nós i e j , é representado pela inicialização da matriz $\bar{\mathbf{U}}^0$ exatamente como na Equação (2.41), abordada nas Subseções 2.4.2.2 e 4.3.1, onde os valores iguais a zero correspondentes aos estados de fluxo t_{ij} e u_{ij} em $\bar{\mathbf{x}}^0$ são impostos, e à respectiva linha em \mathbf{D}^0 são atribuídos pesos iguais a $d_{\eta\eta} = 1/p_{\eta\eta}$;
- (b) Para um disjuntor fechado D_η conectando os nós i e j , $j > i$, denota-se por k_i^δ e k_i^V os índices correspondentes aos estados nodais δ_i e V_i , respectivamente. Os valores da diagonal de $\bar{\mathbf{U}}^0$ ainda são como na Equação (2.41); entretanto, dois elementos fora da diagonal, $\bar{u}_{k_i^\delta, k_j^\delta}$ e $\bar{u}_{k_i^V, k_j^V}$, são agora feitos iguais a -1 . Adicionalmente, impõem-se valores nulos às posições k_i^δ , k_j^δ , k_i^V e k_j^V do vetor $\bar{\mathbf{x}}^0$. Finalmente, as linhas correspondentes aos pesos para $\bar{\mathbf{U}}^0$ são definidas como: $d_{k_i^\delta, k_i^\delta} = d_{k_i^V, k_i^V} = 1/p_{\eta\eta}$, e $d_{k_j^\delta, k_j^\delta} = d_{k_j^V, k_j^V} = 0$.

Para exemplificar, considere dois disjuntores de um sistema elétrico, sendo um operando como fechado, denominado de D_η , conectando os nós i e j , e outro como aberto, denominado de D_κ , conectando os nós k e l . As equações que modelam os respectivos *status* seguem o raciocínio descrito na Seção 3.3, conforme e apresentado a seguir:

$$\delta_i - \delta_j = 0 \quad (4.9a)$$

$$V_i - V_j = 0 \quad (4.9b)$$

$$t_{kl} = 0 \quad (4.9c)$$

$$u_{kl} = 0. \quad (4.9d)$$

Desta forma, apresenta-se na Equação 4.10 as matrizes de inicialização \mathbf{D}^0 e $\bar{\mathbf{U}}^0$, considerando apenas os estados que estão relacionados a estas informações *a priori* da topologia e seus respectivos pesos, determinados pelo inverso da variância de tais informações.

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{D}^{(0)} \qquad \qquad \qquad \mathbf{\bar{U}}^{(0)} \\
 \left[\begin{array}{cccccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} & & \\
 \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & & & & & \\
 & 0 & & & & & & & \\
 & & \frac{1}{p_{\eta\eta}} & & & & & & \\
 & & & 0 & & & & & \\
 & & & & \ddots & & & & \\
 & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & & & \\
 & & & & & & \frac{1}{p_{\kappa\kappa}} & & \\
 \hline
 & & & & & & & & 0
 \end{array} \right] &
 \left[\begin{array}{cccccccc|c}
 \delta_i & \delta_j & V_i & V_j & \cdots & t_{kl} & u_{kl} & \bar{\mathbf{x}}^{(0)} & \\
 1 & -1 & & & & & & 0 & \\
 & 1 & & & & & & 0 & \\
 & & 1 & -1 & & & & 0 & \\
 & & & 1 & & & & 0 & \\
 & & & & \ddots & & & \vdots & \\
 & & & & & & 1 & 0 & \\
 & & & & & & & 1 & 0 & \\
 \hline
 & & & & & & & & & 1
 \end{array} \right]
 \end{array} \tag{4.10}$$

Nas próximas iterações, estas matrizes são inicializadas do mesmo modo como na Equação (4.10), até a convergência do algoritmo G3M.

O método de inicialização das informações dadas nas equações em (4.9) é chamado de *método de ajuste interno*, pela razão de que as condições de topologia são introduzidas “internamente” ao método G3M, utilizando a matriz triangular superior $\mathbf{\bar{U}}^{(0)}$ para ajustar as equações que modelam os *status* presumidos dos disjuntores. Nota-se que as informações dos *status* fechados de disjuntores são processadas desde a primeira iteração, diferentemente do método de ajuste externo, no qual o processamento propriamente dito inicia a partir da segunda iteração, quando o algoritmo se encaminha para o ponto solução do problema. Por outro lado, o processamento de um disjuntor aberto é igual tanto para o método de ajuste externo quanto de ajuste interno, como se observa ao aplicar as rotações rápidas de Givens no problema de EIET.

4.3.3 Algoritmo

Com base nos detalhes apresentados para a representação das condições operacionais como informações *a priori* da topologia, nesta subseção é descrito o algoritmo computacional do estimador de estados via rotações rápidas de Givens. Ao iniciar uma nova iteração do processo de EIET, formam-se as matrizes \mathbf{D}^0 e $[\mathbf{\bar{U}}^0 \mid \bar{\mathbf{y}}^0]$, ambas de ordem $(n_a + 1 \times n_a)$. O vetor $\bar{\mathbf{y}}^0$ corresponde ao vetor de informações de estado *a priori*, e assim como a matriz $\mathbf{\bar{U}}^0$, deve estar de acordo com uma das estratégias de inclusão das condições operacionais da rede, apresentadas nas Subseções 4.3.1 e 4.3.2.

Portanto, na iteração k , são aplicadas as rotações de Givens entre as linhas de $[\mathbf{\bar{U}} \mid \bar{\mathbf{y}}]$ e a linha da matriz Jacobiana $[\mathbf{H}_i(\hat{\mathbf{x}}^k) \mid \Delta z_i^k]$,

correspondente à i -ésima medida. O processo consiste em zerar cada elemento da linha de $[\mathbf{H}_i(\hat{\mathbf{x}}^k) \mid \Delta z_i^k]$, atualizando os elementos correspondentes de $[\bar{\mathbf{U}} \mid \bar{\mathbf{y}}]$. O procedimento se repete para a próxima medida $(i + 1)$ e sucessivamente até que todas as linhas de $[\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) \mid \Delta z^k]$ sejam incorporadas ao esquema. Destaca-se também que ao final do processamento de cada medida i , a soma ponderada dos quadrados dos resíduos correspondente é armazenada no elemento $d_{(n_a+1)}$ da matriz \mathbf{D} , o qual é atualizada a cada iteração ao final do processamento de cada linha aumentada da matriz Jacobiana.

Na Figura 4.2 é apresentado o fluxograma do algoritmo do método sequencial ortogonal baseado nas rotações rápidas de Givens com as principais etapas da solução do estimador de estados.

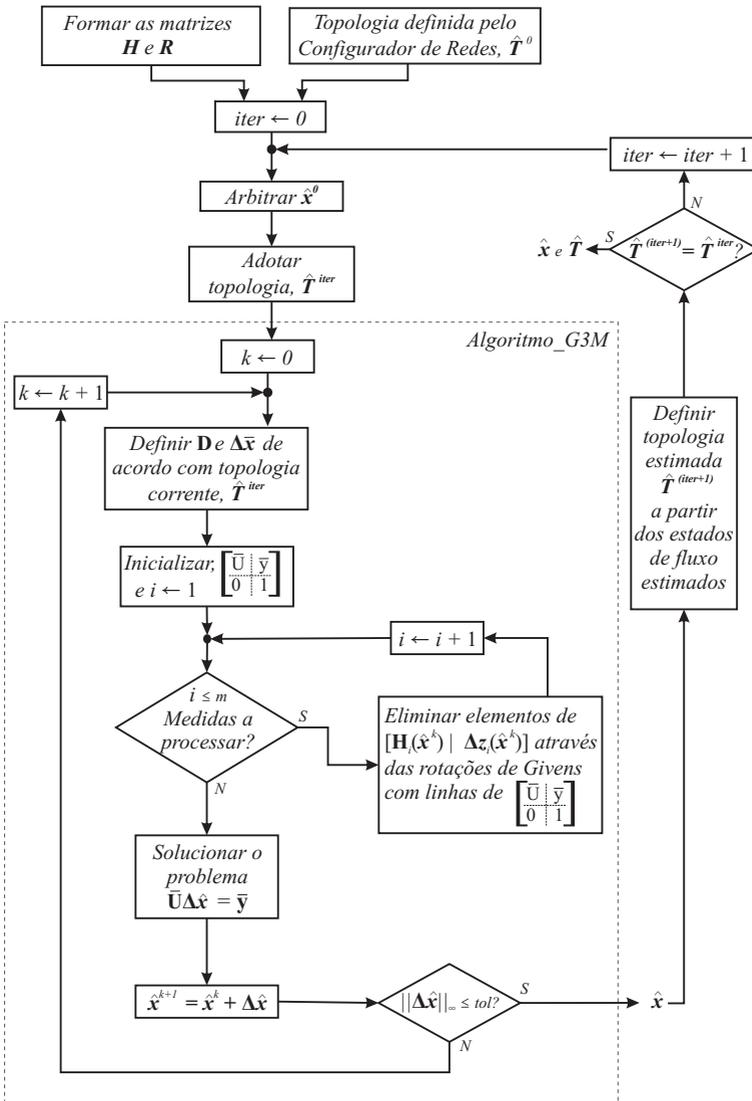


Figura 4.2 – Fluxograma do problema de EIET resolvido pelo método sequencial ortogonal baseado nas rotações rápidas de Givens (*Algoritmo_G3M*)

4.4 Índices de Desempenho do Estimador

Com o intuito de avaliar a qualidade dos resultados do estimador de estados que determinam as condições operativa do sistema de potência, neste trabalho são aplicadas métricas para mensurar os erros das estimativas de ângulos e da magnitudes de tensão em cada barra, assim como os erros dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis. A métrica, definida em [68], determina que os erros absolutos de estimação dos estados convencionais, em comparação com o estudo prévio de fluxo de potência que fornece os valores “verdadeiros”. Desta forma, tais erros são dados por:

$$\varepsilon_{\delta_i} = |\hat{\delta}_i - \delta_i^{verdadeiro}| \quad (4.11a)$$

$$\varepsilon_{V_i} = |\hat{V}_i - V_i^{verdadeiro}| \quad (4.11b)$$

onde i indica a i -ésima barra ou nó do sistema.

Adicionalmente, é utilizada uma métrica de tensão para o erro vetorial total de uma estimativa, dada por:

$$M_V = \|\vec{V}^{erro}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^N \left| \vec{V}_i^{estimado} - \vec{V}_i^{verdadeiro} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

em que:

$\vec{V}_i^{estimado}$: contém os valores de magnitude de tensão e ângulo estimados na i -ésima barra;

$\vec{V}_i^{verdadeiro}$: contém os valores de magnitude de tensão e ângulo na i -ésima barra obtidos do fluxo de potência convergido.

No entanto, devido à expansão do modelo convencional, resultando no aumento do vetor de estados com os fluxos de potência ativa e reativa dos disjuntores, a métrica é adequada a estas características da EIET, em adição à métrica das tensões complexas nas barras. Desta maneira, nas Equações (4.13) a e b são definidas as métricas para mensurar os erros de estimação dos fluxos dos ramos chaveáveis [25].

$$M_{t_{kl}} = \|t_{kl}^{erro}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^{n_d} \left| t_{kl_i}^{estimado} - t_{kl_i}^{verdadeiro} \right|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13a)$$

$$M_{u_{kl}} = \|u_{kl}^{erro}\|_2 = \left(\sum_{i=1}^{n_d} |u_{kl_i}^{estimado} - u_{kl_i}^{verdadeiro}|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.13b)$$

onde:

$t_{kl_i}^{estimado}$: valores estimados dos fluxos de potência ativa nos ramos chaveáveis;

$t_{kl_i}^{verdadeiro}$: fluxo de potência ativa nos ramos chaveáveis das subestações, obtidos do fluxo de potência convergido;

$u_{kl_i}^{estimado}$: valores estimados dos fluxos de potência reativa nos ramos chaveáveis;

$u_{kl_i}^{verdadeiro}$: fluxo de potência reativa nos ramos chaveáveis das subestações, obtidos do fluxo de potência convergido.

Para empregar as referidas métricas apresentadas nas Equações (4.12) e (4.13), devem ser consideradas as seguintes etapas na estimação de estados:

1. A partir dos parâmetros da rede elétrica, da topologia e das condições iniciais do sistema elétrico, deve-se resolver o fluxo de potência e obter as tensões complexas de todos os nós elétricos, os fluxos de potência ativa e reativa para os ramos convencionais e ramos chaveáveis, injeções de potência, e outras variáveis de interesse;
2. Obter as medidas do plano de medição, superpondo erros aleatórios a valores obtidos do fluxo de potência convergido da etapa 1;
3. Realizar testes com a introdução de erros de topologia para alterar o modelo da rede a ser processada pelo estimador de estados integrado. Também devem ser introduzidos erros grosseiros em medidas analógicas, para testar a eficiência do estimador mediante os efeitos de medidas espúrias. Os tipos de erros devem ser testados separadamente e também conjuntamente.
4. Realizar a aplicação do estimador de estados;
5. Avaliar o estimador de estados aplicando as métricas (4.12) e (4.13), e comparando as estimativas dos estados com a solução do fluxo de potência convergido.

Desta forma, as métricas apresentadas medem os efeitos dos erros na estimação de estados, seja nas magnitudes de tensão, quanto nos ângulos, e também nos fluxos de potência ativa e reativa dos ramos chaveáveis. Outras características de natureza estatística proporcionam suporte ao método de análise de desempenho descrito acima, como cálculo da médias e desvios-padrão dos erros dos estados estimados. Por conseguinte, sugere-se que o bom desempenho de um estimador de estados seja aquele que alcançar valores de métricas abaixo da ordem de $1 \times 10^{-2} p.u.$

4.5 Validação da Topologia

Após a estimação dos estados de tensão nodal e de fluxo do SEP, tanto pelo método de ajustes externo quanto de ajuste interno, ocorre a validação da topologia presumida, com o intuito de verificar se esta topologia está correta ou não. Primeiramente, para a estimação dos estados de fluxos nos dispositivos chaveáveis é necessário garantir a observabilidade dos mesmos. Conforme [4], quando há ocorrência de laços envolvendo ramos de impedância nula em uma subestação, o sistema só será observável do ponto de vista topológico se pelo menos um dos ramos chaveáveis que compõem os ramos de impedância nula for monitorado.

Logo após a obtenção da convergência do algoritmo baseado na Equação Normal (*Algoritmo_EqN*) ou nas rotações de rápidas de Givens (*Algoritmo_G3M*) no método de EIET, tornam-se disponíveis os valores das estimativas das variáveis de estado, que são os ângulos e as magnitudes de tensão nas barras e os fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores. Enfatiza-se que no processo ocorre a estimação de valores de baixa magnitude para os fluxos em disjuntores abertos, o que não afeta significativamente a estimação de estados. Em outras palavras, se estes dispositivos fossem simulados como fechados, ocorreriam variações mínimas no processo de estimação. Entretanto, é de extrema importância a correta identificação destes *status*.

Deste modo, os *status* estimados dos disjuntores são obtidos a partir da aplicação de testes de hipóteses associados ao algoritmo, definidos com base em um determinado nível de significância. Eles consistem em comparar os valores estimados dos estados de fluxo dos ramos chaveáveis com limiares estatísticos. Com o nível de significância definido e a variância do erro de estimação obtida para um fluxo estimado no disjuntor η , um limiar ε_{fluxo_η} é determinado para estabelecer se o

status do disjuntor é fechado ou aberto. Tal método foi implementado em sistemas de potência em [38], e utilizado como processo auxiliar em [23, 43, 44]. Assim, a tolerância é expressa por:

$$\varepsilon_{fluxo_\eta} = \sigma_{disj_\eta} N_{1-\frac{\alpha}{2}} \quad (4.14)$$

em que $N_{1-\frac{\alpha}{2}}$ é $100(1 - \frac{\alpha}{2})$ percentil da distribuição normal, sendo α a probabilidade de falso alarme, e $\sigma_{disj_\eta}^2$ é a variância dos fluxos de potência através dos disjuntores, obtida através da diagonal da matriz de covariância dos erros de estimação dos estados, Σ , calculada pela Equação (2.43). Sabe-se que a matriz Σ é o inverso da matriz de informação ou ganho, que também pode ser obtida através das matrizes solução do processo de rotações de Givens, como apresentado nas Equações em (2.48). No tópico seguinte será apresentado o cálculo da matriz ganho considerando a matriz de covariância das informações *a priori*. Desta forma, os valores dos desvios-padrão relacionados aos disjuntores, σ_{disj_η} , são dados por:

$$\sigma_{disj_\eta} = \sqrt{\Sigma_{\eta\eta}} \quad (4.15)$$

Portanto, um disjuntor é considerado fechado se os valores, em módulo, dos estados estimados para os fluxos de potência ativa e reativa através do mesmo forem maior que as respectivas tolerâncias calculadas a partir da Equação (4.14); caso o contrário o disjuntor é considerado aberto. Ressalta-se que as estimativas dos estados estimados para os fluxos ativo e reativo devem satisfazer simultaneamente os testes de hipótese.

Os passos acima permitem validar a topologia presumida com o resultado do estágio de pós-processamento dos disjuntores. Caso todos os *status* estimados pelo método corresponderem ao *status* presumidos dos respectivos disjuntores, o algoritmo se encerra e retorna todos os resultados; caso haja discordância em um ou mais *status* de disjuntores, as correções são realizadas e uma próxima iteração do EIET é efetuada, agora com as devidas modificações nas informações *a priori* da topologia. O procedimento se repete até que não haja diferenças entre os *status* presumidos e estimados.

4.6 Análise de Erro Grosseiro

Neste trabalho, a análise de erro grosseiro é realizada a partir das características vantajosas associadas ao método de Givens, como

demonstrado no Capítulo 2, na Subseção 2.5.3. Desta forma, os processos de detecção, identificação e eliminação das medidas portadoras de erro grosseiro estão inseridas na metodologia da EIET.

O método proposto para o processamento de erros grosseiros em medidas analógicas recai nos seguintes princípios:

- (i) Os dados das informações de estado *a priori* relacionados à topologia da rede podem ser vistos como *medidas virtuais*, pois são tratados na formulação do problema na Equação (4.1) como um termo de mínimos quadrados, ponderados pelo inverso da respectiva matriz de covariância, isto é, são processados de forma idêntica às medidas disponíveis ao estimador de estados;
- (ii) Como consequência do item anterior, as propriedades estatísticas da solução são preservadas, e as ferramentas para o processamento de erros grosseiros previamente desenvolvidas para os estimadores baseados no método dos mínimos quadrados ponderados, como os apresentados na Seção 2.5, são aplicadas em conexão com o estimador integrado.

Para que a análise de medida espúrias seja realizada, assume-se que o nível de redundância das medidas disponíveis seja suficiente para permitir o bom desempenho dos métodos convencionais de processamento de erros grosseiros.

O método proposto para o processamento de erros grosseiros é composto por dois estágios: detecção de erro grosseiro no conjunto de medidas, baseado no teste- $J(\hat{x})$ e apresentado na Subseção 2.5.2.1, e a identificação da medida errônea, baseado no teste- \hat{b} , aplicando um teste de hipótese à uma estimativa de magnitude de erro da medida cujo resíduo normalizado é o maior, como abordado na Subseção 2.5.2.2.

Para o método de detecção de medidas espúrias processadas pelo estimador de estados, o teste estatístico do Qui-quadrado, χ^2 , analisa os valores parciais da soma ponderada do quadrado dos resíduos $J(\hat{x})$ no processo iterativo do método G3M. O limiar K é calculado conforme apresentado na Equação (2.45), a partir dos graus de liberdade e da probabilidade de falso alarme fixada³. Entretanto, o número de graus de liberdade do problema deve ser alterado para levar em conta a inclusão do modelo de seção de barras: ocorrem modificações tanto no número de variáveis de estado do sistema quanto no número de equações que modelam o problema de otimização, em que também devem ser consideradas as restrições estruturais e as informações *a priori* da topologia.

³Neste trabalho, é adotado $\alpha = 0,05$.

Desta forma, os graus de liberdade ℓ para o modelo não-linear da rede são calculados da seguinte forma:

$$\ell = (m + n_s + n_{co}) - (2 \cdot N + 2 \cdot n_d) \quad (4.16a)$$

em que:

m : é o número de medidas do plano de medição;

n_s : é o número de restrições estruturais;

n_{co} : é o número de equações de condições operacionais incluídas como informação *a priori* de topologia;

N : é o número de barras e nós internos de subestações do SEP;

n_d : é o número de disjuntores.

Observa-se que o número de equações impostas pelas condições operacionais é igual a duas vezes o número de disjuntores. Logo, os graus de liberdade são simplificados a:

$$\ell = (m + n_s) - 2 \cdot N \quad (4.16b)$$

Com a detecção positiva de erro grosseiro indicada no estimador de estados pelo teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$, segue-se o processo de identificação da medida errônea. Neste trabalho é adotada a identificação de uma medida com erro grosseiro por vez, de modo que pode-se realizar a análise de tais medidas dentro do processo iterativo das rotações rápidas de Givens. O procedimento de identificação propõe a análise da medida de maior resíduo normalizado e verificação de se a respectiva magnitude do erro, expressa em números de desvios-padrão conforme a Equação (2.47), é maior que um dado limiar (normalmente é adotado o valor 4, ver Subseção 2.5.2.2).

A matriz de covariância dos resíduos deve ser obtida para o cálculo dos resíduos normalizados, como apresentado na Subseção 2.5.1. Para tal, são aproveitadas as matrizes calculadas pela solução das rotações de Givens, que levam em conta as informações *a priori* da topologia. Portanto, a matriz ganho, ou de informação, continua a ser calculada da seguinte forma:

$$\mathbf{G}(\hat{\mathbf{x}}^k) = \mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^k)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^k) + \mathbf{P}^{-1} = \bar{\mathbf{U}}^T\mathbf{D}\bar{\mathbf{U}} \quad (4.17)$$

Por conseguinte, são utilizadas as Equações (2.49) e (2.50) para o cálculo da matriz de covariância dos resíduos, e a Equação (2.44) para

o cálculo dos resíduos normalizados.

Com a medida errônea devidamente identificada na k -ésima iteração das rotações rápidas de Givens, é realizada a remoção da medida a partir do reprocessamento da linha da matriz Jacobiana \mathbf{H} com a ponderação negativa $(-w_i)$, como descrito na Subseção 2.5.3.

Por outro lado, se a primeira aplicação do teste- \hat{b} for negativa para os erros em medidas analógicas, pode-se concluir que a detecção ocorrida no teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ é devida a erros na topologia presumida ao estimador de estados, e portanto, nenhuma ação é tomada até a convergência do método do G3M, pois a validação da topologia (realizada conforme descrito na Seção 4.5) é executada como próximo passo do processo de estimação.

O algoritmo da EIET pode processar mais de um erro grosseiro, desde que a observabilidade da rede elétrica e um nível adequado de redundância das informações sejam garantidos. Isto é feito eliminando-se uma medida por iteração das rotações de Givens. Neste contexto, devem-se considerar alguns cuidados para o bom desempenho do método proposto.

No modo de inicialização do processo de estimação de estados é adotada, em geral, a partida plana para os estados (magnitude de tensão = 1,0 p.u., ângulos nas barras = 0,0 rad, e fluxos de potência ativa e reativa dos disjuntores = 0,0 p.u.). Como este ponto pode estar muito longe da solução, a soma ponderada do quadrado dos resíduos toma um valor muito alto na primeira iteração, por ser muito afetada pelos erros de linearização. Em consequência, a detecção de erros grosseiros não é recomendável neste estágio [47]. Depois de duas ou mais iterações, a influência dos erros de linearização torna-se significativamente menor, e passam a prevalecer os efeitos dos erros de medição nas diferenças entre as quantidades medidas e estimadas, o que viabiliza a aplicação dos testes de detecção, assim como os procedimentos de identificação e remoção de medidas errôneas a partir deste ponto.

4.7 Algoritmo da EIET

Com base nas ferramentas adicionadas ao método proposto para a Estimação Integrada de Estados e Topologia utilizando os estimadores ortogonais sequenciais, é estabelecido um algoritmo para a solução do problema, e o mesmo é apresentado na Figura 4.3 e denotado de *Algoritmo_EIET*.

O algoritmo do processo das rotações de Givens é sumarizado no

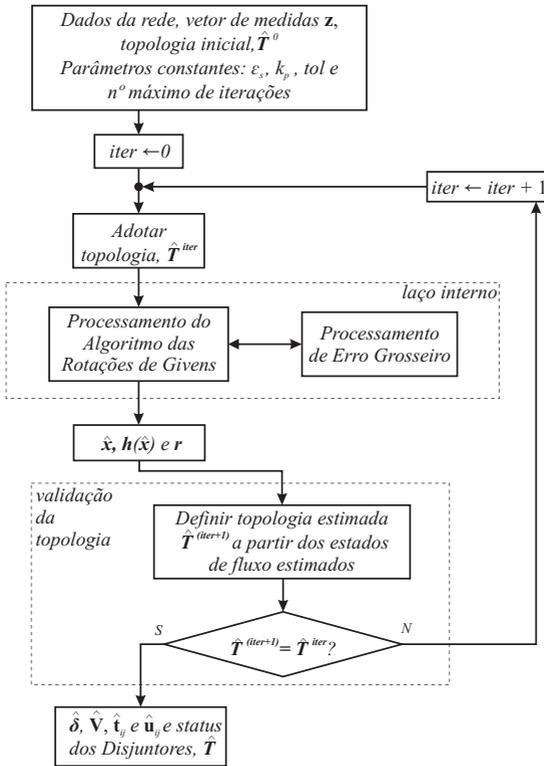


Figura 4.3 – Fluxograma do método de EIET (*Algoritmo_EJET*)

diagrama da Figura 4.2 (*Algoritmo_G3M*), em que a topologia presumida é inserida de acordo com a estratégia adotada (método de ajuste externo ou interno). Deste modo, este algoritmo é denotado como *laço interno* do algoritmo de EIET, contendo também a análise de erro grosseiro, vinculada diretamente nas iterações rotações rápidas de Givens. Outras etapas, como a correção/validação da topologia e cálculo das métricas, são apresentadas no *laço externo* do processo.

Um estudo de caso utilizando um sistema de pequeno porte é utilizado para ilustrar a execução do algoritmo do método proposto neste trabalho (*Algoritmo_EJET*). Resultados detalhados de cada etapa são apresentados na próxima seção.

4.8 Aplicação Ilustrativa da EIET

Nesta seção apresenta-se um exemplo ilustrativo aplicando o método de EIET. Para tal, é considerado um sistema-teste de 5 nós e 4 ramos chaveáveis, apresentado na Figura 4.4, que também indica o plano de medição empregado. A distribuição dos diferentes medidores garante a observabilidade da rede.

As medidas são obtidas a partir do resultado do fluxo de potência no nível de seção de barra convergido [9, 11], nas quais são inseridos erros aleatórios com distribuição normal nos valores correspondentes.

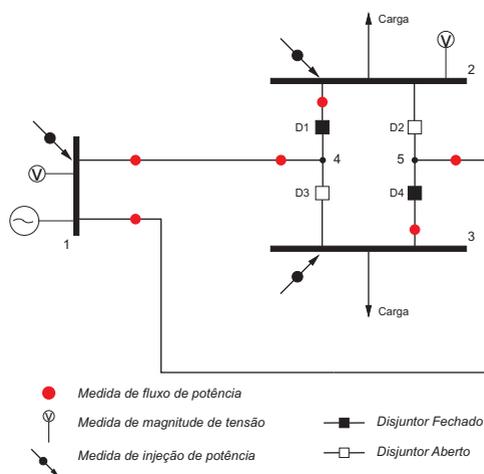


Figura 4.4 – Sistema-teste de 5 nós e 4 ramos chaveáveis

Os parâmetros do sistema são apresentados na Tabela 4.1⁴. As quantidades medidas com os respectivos valores dos fluxos de potência e de variância são apresentados na Tabela 4.2. Foram utilizados dois valores de exatidão para as classes de medidores: 2×10^{-2} *p.u.* para as injeções de potência e medidas de fluxos ativo e reativo; e 3×10^{-3} *p.u.* para as medidas de magnitude de tensão. Esta diferença entre os tipos de medidas é justificada mediante o fato de que para a medir a magnitude de tensão em um nó elétrico é necessário apenas um Transformador de Potencial (TP), enquanto para medir as injeções nas

⁴Os valores indicados por “0” representam o *status* dos disjuntores fechados. Já os valores indicados por “9999” simbolizam o *status* dos disjuntores abertos.

barras de fluxos de potência nas linhas são necessários no mínimo um TP e um Transformador de Corrente (TC). Esta quantidade de instrumentos de medição causa uma associação entre os erros dos referidos equipamentos, o que torna, portanto, a medição menos exata. Através dos medidores pode-se supor também que os erros de medição não são correlacionados. Isto quer dizer que os erros de cada medida devem-se a seus próprios instrumentos de medição.

Tabela 4.1 – Parâmetros de Linhas do Sistema-teste

Parâmetros das LT's ($p, u,$)		
Linha	Resistência	Reatância
1-4	0,0130	0,400
1-5	0,0110	0,250
Subestação		
2-4	0	0
2-5	9999	9999
3-4	9999	9999
3-5	0	0

Tabela 4.2 – Valores do Plano de Medição do Sistema-teste

Medida	Valor Real	Valor Medido	Variância
V_1	1,00	0,99986	0,00000900
V_2	0,91366	0,91398	0,00000752
t_{1-4}	0,40284	0,40500	0,00014785
t_{4-1}	-0,40	-0,39984	0,00014694
t_{1-5}	0,80899	0,81381	0,00034473
t_{5-1}	-0,80	-0,79633	0,00033894
t_{2-4}	-0,40	-0,39956	0,00014694
t_{3-5}	-0,80	-0,79980	0,00033894
u_{1-4}	0,23721	0,23547	0,00008028
u_{4-1}	-0,14979	-0,14972	0,00006674
u_{1-5}	0,40389	0,40407	0,00012302
u_{5-1}	-0,19949	-0,19920	0,00007369
u_{2-4}	-0,15	-0,14973	0,00006677
u_{3-5}	-0,20	-0,19917	0,00007377
P_1	1,21179	1,20594	0,00063032
P_2	-0,40	-0,40090	0,00010695

Continua na próxima página

Tabela 4.2 – Continuação da página anterior

Medida	Valor Real	Valor Medido	Variância
P_3	-0,80	-0,79907	0,00029895
Q_1	0,6411	0,64146	0,00025451
Q_2	-0,15	-0,14955	0,00009911
Q_3	-0,20	-0,19862	0,00010611

O vetor de variáveis de estado é dado por:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & \cdots \\ \cdots & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & \cdots \\ \cdots & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & \cdots \\ \cdots & u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \end{bmatrix}^T$$

As restrições estruturais impostas pela inclusão das barras de injeção nula e o ângulo de referência são dadas por:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 0 \\ P_4 &= 0 \\ P_5 &= 0 \\ Q_4 &= 0 \\ Q_5 &= 0 \end{aligned}$$

Supondo que não há informações disponíveis do Configurador de Redes sobre os *status* dos disjuntores, considera-se que todos os dispositivos chaveáveis estão abertos⁵. Tal interpretação pode ser relacionada às condições iniciais do problema de otimização, no qual é adotada a partida plana para os estados convencionais. Portanto, as condições operacionais do problema são:

$$\begin{aligned} t_{24} &= 0 & u_{24} &= 0 \\ t_{25} &= 0 & u_{25} &= 0 \\ t_{34} &= 0 & u_{34} &= 0 \\ t_{35} &= 0 & u_{35} &= 0 \end{aligned}$$

Deste modo, considerando os parâmetros da rede elétrica e a partida plana das variáveis de estado, são formadas a matriz de observação \mathbf{H}_m e a matriz Jacobiana referente às restrições estruturais \mathbf{H}_s , e dadas por:

⁵Chamada de *partida plana* para os *status* do disjuntores.

$$\mathbf{H}_m = \begin{bmatrix}
 \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 2,4974 & 0 & 0 & -2,4974 & 0 & 0,0812 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -2,4974 & 0 & 0 & 2,4974 & 0 & -0,0812 & 0 & 0 & -0,0812 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,1757 & 0 & 0 & 0,0812 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1757 & 0 & 0 & 0 & -0,1757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0,0812 & 0 & 0 & 0,0812 & 0 & 2,4974 & 0 & 0 & -2,4974 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0,0812 & 0 & 0 & -0,0812 & 0 & -2,4974 & 0 & 0 & 2,4974 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0,1757 & 0 & 0 & 0 & 0,1757 & 3,9923 & 0 & 0 & 0 & -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0,1757 & 0 & 0 & 0 & -0,1757 & -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 6,4896 & 0 & 0 & -2,4974 & -3,9923 & 0,2568 & 0 & 0 & -0,0812 & -0,1757 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -0,2568 & 0 & 0 & 0,0812 & 0,1757 & 6,4896 & 0 & 0 & -2,4974 & -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{H}_m =$

$$\mathbf{H}_s = \begin{bmatrix}
 \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} & u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\
 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -2,4974 & 0 & 0 & 2,4974 & 0 & -0,0812 & 0 & 0 & 0,0812 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 3,9923 & -0,1757 & 0 & 0 & 0 & 0,1757 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0,0812 & 0 & 0 & -0,0812 & 0 & -2,4974 & 0 & 0 & 2,4974 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\
 0,1757 & 0 & 0 & 0 & -0,1757 & -3,9923 & 0 & 0 & 0 & 3,9923 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 \delta_1 \\
 P_4 \\
 P_5 \\
 Q_4 \\
 Q_5
 \end{bmatrix}$$

As condições operacionais, tratadas como informação *a priori* de topologia, devem estar associadas à matriz \mathbf{P} . Para tal, parte-se da partida plana para a topologia presumida a ser processada pelo estimador de estados, conforme adotado anteriormente.

Desta forma, as variâncias das informações *a priori* da topologia são computadas de acordo com a Equação (4.7), em que são necessários dois fatores: a constante de calibração k_p e a média das variâncias \bar{R}_m . O valor adotado para a constante de calibração⁶ é $k_p = 0,020$. Desta forma, a variância para tais informações é:

$$p = 0,00865$$

O inverso deste valor define a ponderação no processo de estimação de estados, e é dada por:

$$d_i = 115,57$$

Com a partida plana para os *status* dos disjuntores, todos os estados de fluxo do problema são ponderados de modo a traduzir a incerteza desta informação inicial, conforme o valor de variância acima. Já os estados restantes, correspondentes às variáveis de estado convencionais, terão ponderação nula (variância infinita). Desta forma, particionando a matriz \mathbf{P} em quatro submatrizes correspondentes às matrizes de covariâncias relativas dos ângulos, magnitude de tensão, fluxo de potência ativa e fluxo de potência reativa nos ramos chaveáveis, têm-se:

$$\mathbf{P}_\delta = \begin{bmatrix} \phi_\infty & & & & & \\ & \phi_\infty & & & & \\ & & \phi_\infty & & & \\ & & & \phi_\infty & & \\ & & & & \phi_\infty & \\ & & & & & \phi_\infty \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_V = \begin{bmatrix} \phi_\infty & & & & & \\ & \phi_\infty & & & & \\ & & \phi_\infty & & & \\ & & & \phi_\infty & & \\ & & & & \phi_\infty & \\ & & & & & \phi_\infty \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{t_{ij}} = \begin{bmatrix} 0,00865 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,00865 \end{bmatrix}$$

⁶Este valor foi encontrado a partir de sucessivas simulações para diversos valores de k_p e respeitando o intervalo adotado de $0 < k_p < 1$. Neste sentido, verificou-se que quanto maior seu valor, maior é a importância do termo das informações *a priori*, o que aumenta o custo computacional para as simulações, inclusive quando são considerados a presença de erros topologia assim como os erros grosseiros em medidas analógicas. Portanto, o valor adotado consegue realizar o balanceamento entre os termos da função-objetivo sem a interferência no custo de simulação, quanto no processamento de anomalias.

$$\mathbf{P}_{u_{ij}} = \begin{bmatrix} 0,00865 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,00865 \end{bmatrix}$$

em que ϕ_∞ é um valor real e positivo que tende ao infinito.

Logo, a matriz \mathbf{P} de covariância associada aos estados do problema fica:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_\delta & & & \\ & \mathbf{P}_V & & \\ & & \mathbf{P}_{t_{ij}} & \\ & & & \mathbf{P}_{u_{ij}} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Neste exemplo ilustrativo é apresentado o passo-a-passo da estratégia de inserção das condições operacionais em informação *a priori* de topologia baseado no método de ajuste interno, apresentado na Subseção 4.3.2. Os resultados serão comparados com o método de resolução baseado na estratégia de ajuste externo, resolvido por ambos os métodos de Equação Normal e G3M, conforme apresentado na Subseções 4.2.1 e 4.3.1, respectivamente.

Desta forma, as inicializações da matrizes $\mathbf{D}^{(0)}$ e $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$ são dadas, respectivamente, por:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{(0)} &= \mathbf{P}^{-1} \\ \bar{\mathbf{U}}^{(0)} &= \mathbf{I}_{n_a \times n_a} \end{aligned}$$

Destaca-se que na inversão da matriz \mathbf{P} , os termos infinitos nas linhas correspondentes são nulos na matriz $\mathbf{D}^{(0)}$.

Por sua vez, a matriz \mathbf{R} é uma matriz diagonal com os valores das variâncias mostrados na Tabela 4.2, e com as variâncias das restrições estruturais, tratadas como pseudomedidas de alta precisão; e \mathbf{R} é formada como apresentado na Equação (4.2c).

As matrizes \mathbf{H}_m , \mathbf{H}_s , e os vetores $\Delta \mathbf{z}$ e $\Delta \bar{\mathbf{x}}$, são calculados no ponto da iteração corrente k das rotações de Givens.

O processamento da primeira iteração ($k = 0$) é inicializada pelo *Algoritmo_EIET*, que necessita dos valores iniciais para as variáveis de estado \mathbf{x}^0 , do vetor de medidas \mathbf{z} e de outros parâmetros constantes já apresentados (*ver Figura 4.3*). Na sequência, ocorre o processamento das rotações rápidas de Givens (laço interno), conforme o *Algoritmo_G3M* relatado na Figura 4.2.

A seguir são apresentados os resultados de cada etapa da iteração do método da Estimativa Integrada de Estados e Topologia. Para tal,

faz-se o uso da denotação EIET- ζ , em que ζ indica a iteração corrente processo de estimação.

1. EIET - 1: Processamento do Laço Interno - Rotações Rápidas de Givens *Algoritmo G3M*

Abaixo, são mostradas as informações mais relevantes que são processadas pelo método durante o processo iterativo:

- Quantidade total de medidas: 20, sendo:
 - Quantidade de medidas de magnitude de tensão: 2;
 - Quantidade de medidas de fluxo de potência ativa: 6;
 - Quantidade de medidas de fluxo de potência reativa: 6;
 - Quantidade de medidas de injeção de potência ativa: 3;
 - Quantidade de medidas de injeção de potência reativa: 3;
- Quantidade de restrições estruturais: 5;
- Quantidade de condições operacionais: 8;
- Quantidade de variáveis de estados calculados: 18;
- Redundância: 1,833.

O processo das rotações rápidas de Givens levou três iterações para convergir. A cada iteração se obtém diretamente os valores totais de $J(\hat{\mathbf{x}})$. Desta forma, para melhor visualização da convergência, foram calculados e denotados os termos referentes aos resíduos das medidas e pseudomedidas, $J_r(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{r}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}$, e das informações *a priori*, $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}}) = (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{P}^{-1} (\hat{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})$. Os valores por iteração são apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Decréscimo dos Termos da Função-Objetivo (EIET - 1)

Iteração	$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$J(\hat{\mathbf{x}})$
1	456,372	96,337	552,709
2	2,389	95,174	97,563
3	2,324	95,139	97,463

Os valores das normas infinitas dos vetores $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ e $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$ são apresentados na Tabela 4.4, sendo que o primeiro termo é o critério de

Tabela 4.4 – Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ (EIET - 1)

Iteração	$\ \Delta\hat{\mathbf{x}}\ _{\infty}$	$\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})\ _{\infty}$
1	$7,8271 \times 10^{-1}$	$9,2499 \times 10^{-2}$
2	$6,8559 \times 10^{-2}$	$1,0377 \times 10^{-3}$
3	$6,8730 \times 10^{-4}$	$2,2651 \times 10^{-7}$

parada utilizado no algoritmo das rotações rápidas de Givens, o qual é suficiente para atender as restrições estruturais.

Com o *Algoritmo_G3M* convergido, obtêm-se como resultado estimativas das variáveis de estado de tensão nodal e de fluxo. Tais valores são comparados com os resultados do fluxo de potência, e observados nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 – Valores das Tensões Complexas nas Barras (EIET - 1)

Barra	Valores do Fluxo de Potência		Valores Estimados	
	Tensão (p.u)	Ângulo rad	Tensão (p.u)	Ângulo rad
1	1,0000	0,0000	0,9998	0,0000
2	0,9137	-0,1739	0,9140	0,0000
3	0,9118	-0,2187	1,0000	0,0000
4	0,9137	-0,1739	0,9137	-0,1744
5	0,9118	-0,2187	0,9117	-0,2179

Tabela 4.6 – Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis (EIET - 1)

Disjuntor	Valores do Fluxo de Potência		Valores Estimados	
	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)
1	-0,4000	-0,1500	-0,3880	-0,1482
2	0,0000	0,0000	-0,0152	-0,0021
3	0,0000	0,0000	-0,0132	-0,0008
4	-0,8000	-0,2000	-0,7817	-0,1980

Como resultados adicionais, são calculadas as métricas para os erros de estimação em relação aos valores do fluxo de potência convergido. Portanto, abaixo são mostrados os valores das métricas de tensão

e fluxo de potência:

- Métrica de V. M_V [68]: 0,2764;
- Métrica de t_{ij} , $M_{t_{ij}}$: 0,0297;
- Métrica de u_{ij} , $M_{u_{ij}}$: 0,0035;
- Média dos erros de V: 0,0773;
- Média dos erros de t_{ij} : 0,0147;
- Média dos erros de u_{ij} : 0,0017;
- Desvio-padrão dos erros de V: 0,1079;
- Desvio-padrão dos erros de t_{ij} : 0,00275;
- Desvio-padrão dos erros de u_{ij} : 0,00062.

Na Tabela 4.7 são apresentados os erros de tensão em cada barra, utilizando a norma da diferença das tensões complexas, presente na métrica em [68], e os erros de fluxo de potência ativa, t_{ij} , e reativa, u_{ij} , nos disjuntores:

Tabela 4.7 – Erros de Estimação dos Estados (EIET - 1)

(a) Erros de Tensão Complexa

Tensão	$Erro_V$
V_1	0,0002
V_2	0,1587
V_3	0,2263
V_4	0,0005
V_5	0,0007

(b) Erros de Fluxo de Potência

Disj.	$Erro_t$	$Erro_u$
1	0,0120	0,0018
2	0,0152	0,0021
3	0,0132	0,0008
4	0,0183	0,0020

2. EIET - 1: Análise de Erro Grosseiro

Como a análise de erro grosseiro é processada nas iterações⁷ do *Algoritmo G3M*, o teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ é aplicado e então, o valor obtido para o limiar K com uma probabilidade de falso alarme de $\alpha = 0,05$ é:

$$K = 24,996$$

⁷Neste trabalho adota-se que o processamento de erros grosseiros será realizado a partir da segunda iteração das rotações rápidas de Givens.

De acordo com a Tabela 4.3, neste caso ocorre $J(\hat{\mathbf{x}}) > K$ em duas iterações (2^a e 3^a iterações) com a análise de erro grosseiros ativada, indicando a ocorrência de anomalia, que pode ser devida à presença de erro de topologia e/ou erro grosseiro em medidas. Em consequência, faz-se a indicação da detecção de anomalia, e a etapa de identificação de medida espúria é processada para averiguar se a medida que possui o máximo resíduo normalizado está contaminada ou não por erro grosseiro.

Assim, a Tabela 4.8 indica o processo de análise de medida espúria, apresentando a iteração de detecção, o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$, as características de análise da medida (resíduo normalizado e magnitude do erro em termos de desvios-padrão) e a indicação de remoção.

Tabela 4.8 – Análise de Erro Grosseiro

Iter.	$J(\hat{\mathbf{x}})$	Medida	r_i^N	\hat{b}_i	Remove?
2	97,563	t_{24}	0,2862	0,3329	NÃO

Desta forma, percebe-se que a medida selecionada não possui erro grosseiro, pois no processo de identificação na segunda iteração foi relatado que a medida de maior resíduo normalizado está dentro dos padrões de sua classe de exatidão e não precisa ser removida. Com isto, nenhuma outra medida do plano de medição é suspeita de erro grosseiro, de modo que o procedimento para a identificação de medida errônea pode ser desativado nas iterações posteriores, mesmo que o teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$ seja positivo, como ocorre na terceira iteração.

3. EIET - 1: Termos da Função-Objetivo

Após a execução das rotações rápidas de Givens, processado pelo *Algoritmo_G3M*, tem-se como resultado os termos da função-objetivo (soma ponderada do quadrado dos resíduos), apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Termos da Função-Objetivo ao Final da Primeira Iteração

Termo	Valor
$J(\hat{\mathbf{x}})$	97,463
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	2,324
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	95,139

4. EIET - 1: Validação da Topologia

Para o cálculo dos limiares é fixada a probabilidade de falso alarme também no valor de $\alpha = 0,05$. Os respectivos valores para os estados de fluxos são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Limiares para as Variáveis de Estado de Fluxo

Estado	ε_{fluxo_t}	Estado	ε_{fluxo_u}
t_{24}	0,0204	u_{24}	0,0132
t_{25}	0,0243	u_{25}	0,0156
t_{34}	0,0239	u_{34}	0,0151
t_{35}	0,0240	u_{35}	0,0135

Portanto, permite-se validar a topologia presumida como correta ou errada através da comparação dos fluxos obtidos do estimador de estados e os limiares correspondentes, assim como realizar as devidas alterações, caso haja discordância entre os *status* presumidos e estimados. A Tabela 4.11 apresenta os *status* estimados e presumidos.

Tabela 4.11 – Estimação e Validação da Topologia

Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_t}	Status estimado	Status presumido
t_{24}	-0,3880	0,0204	F	A
t_{25}	-0,0152	0,0243	A	A
t_{34}	-0,0132	0,0239	A	A
t_{35}	-0,7817	0,0240	F	A
Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_u}	Status estimado	Status presumido
u_{24}	-0,1482	0,0132	F	A
u_{25}	-0,0021	0,0156	A	A
u_{34}	-0,0008	0,0151	A	A
u_{35}	-0,1980	0,0135	F	A

As notações empregadas na Tabela 4.11 para os *status* dos disjuntores são: F para disjuntor Fechado; e A para disjuntor Aberto. Verifica-se que ocorre discordância da topologia estimada com a presumida, sendo necessárias modificações nas condições operacionais para a execução de mais uma iteração da EIET.

5. EIET - 1: Alterações das Condições Operacionais

As modificações realizadas nas condições operacionais alteram consequentemente as informações *a priori* da topologia. Nesta etapa,

as informações relativas aos *status* estimados no item anterior são modeladas e inseridas como uma nova topologia presumida, e assim como a primeira, também deve ser confirmada ou corrigida pelo estimador de estados. Portanto, as novas condições operacionais são:

$$\begin{aligned} \delta_2 - \delta_4 &= 0 & V_2 - V_4 &= 0 \\ \delta_3 - \delta_5 &= 0 & V_3 - V_5 &= 0 \\ t_{25} &= 0 & u_{25} &= 0 \\ t_{34} &= 0 & u_{34} &= 0 \end{aligned}$$

Logo, as submatrizes de covariância das informações *a priori* ficam:

$$\mathbf{P}_\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 \\ \phi_\infty & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_\infty & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_\infty \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ \phi_\infty & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_\infty & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_\infty \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}_{t_{ij}} = \begin{bmatrix} t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} \\ \phi_\infty & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_\infty \end{bmatrix} \quad \mathbf{P}_{u_{ij}} = \begin{bmatrix} u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\ \phi_\infty & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,00865 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,00865 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \phi_\infty \end{bmatrix}$$

Em sequência, a matriz \mathbf{P} é formada de acordo com a Equação (4.18), e utilizada para a inicialização da matriz $\mathbf{D}^{(0)} = \mathbf{P}^{-1}$. A matriz $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$ também é ajustada para a inserção das informações *a priori* da topologia. Considerando a partição em submatrizes, têm-se que:

$$\bar{\mathbf{U}}_\delta = \begin{bmatrix} \delta_1 & \delta_2 & \delta_3 & \delta_4 & \delta_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{U}}_V = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{U}}_{t_{ij}} = \begin{bmatrix} t_{24} & t_{25} & t_{34} & t_{35} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \bar{\mathbf{U}}_{u_{ij}} = \begin{bmatrix} u_{24} & u_{25} & u_{34} & u_{35} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por fim, $[\bar{\mathbf{U}} \mid \Delta\bar{\mathbf{x}}]$ é dada pela Equação (4.19) e é inicializada

uma nova iteração da EIET.

$$[\bar{\mathbf{U}} \mid \Delta \bar{\mathbf{x}}] = \left[\begin{array}{cccc|c} \mathbf{U}_\delta & & & & \mathbf{0} \\ & \mathbf{U}_V & & & \mathbf{0} \\ & & \mathbf{U}_{t_{ij}} & & \mathbf{0} \\ & & & \mathbf{U}_{u_{ij}} & \mathbf{0} \\ & & & & 1 \end{array} \right] \quad (4.19)$$

6. EIET - 2: Processamento do Laço Interno - Rotações rápidas de Givens

Com as novas informações *a priori* da topologia, o algoritmo das rotações rápidas de Givens convergiu também em três iterações, e os valores são apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Decréscimo dos Termos da Função-Objetivo (EIET - 2)

Iteração	$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$J(\hat{\mathbf{x}})$
1	445,325	9,821	455,146
2	0,1846	0,0922	0,2768
3	0,2195	$1,23 \times 10^{-4}$	0,2196

Os valores das normas infinitas dos vetores $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ e $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$ são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ (EIET - 2)

Iteração	$\ \Delta \hat{\mathbf{x}}\ _\infty$	$\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})\ _\infty$
1	$8,0028 \times 10^{-1}$	$9,3131 \times 10^{-2}$
2	$6,8970 \times 10^{-2}$	$1,0342 \times 10^{-3}$
3	$6,8657 \times 10^{-4}$	$1,6479 \times 10^{-8}$

Em seguida, obtêm-se as estimativas das variáveis de estado, que são comparadas com os valores correspondentes do fluxo de potência convergido. Os resultados são apresentados nas Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 – Valores das Tensões Complexas nas Barras (EIET - 2)

Barra	Valores Verdadeiros		Valores Estimados	
	Tensão (p.u)	Ângulo rad	Tensão (p.u)	Ângulo rad
1	1,0000	0,0000	0,9998	0,0000
2	0,9137	-0,1739	0,9140	-0,1739
3	0,9118	-0,2187	0,9117	-0,2187
4	0,9137	-0,1739	0,9138	-0,1739
5	0,9118	-0,2187	0,9117	-0,2187

Tabela 4.15 – Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis (EIET - 2)

Disjuntor	Valores Verdadeiros		Valores Estimados	
	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)
1	-0,4000	-0,1500	-0,3999	-0,1496
2	0,0000	0,0000	-0,0008	-0,0002
3	0,0000	0,0000	-0,0002	+0,0005
4	-0,8000	-0,2000	-0,7990	-0,1993

Abaixo são apresentados os valores das métricas de tensão e fluxo de potência:

- Métrica de V, M_V [68]: 0,00048;
- Métrica de t_{ij} , $M_{t_{ij}}$: 0,00126;
- Métrica de u_{ij} , $M_{u_{ij}}$: 0,00100;
- Média dos erros de V: 0,00020;
- Média dos erros de t_{ij} : 0,00050;
- Média dos erros de u_{ij} : 0,00047;
- Desvio-padrão dos erros de V: 0,00007
- Desvio-padrão dos erros de t_{ij} : 0,00044;
- Desvio-padrão dos erros de u_{ij} : 0,00020.

Na Tabela 4.16 são apresentados os erros de tensão em cada barra e os erros de fluxo de potência ativa, t_{ij} , e reativa, u_{ij} , nos disjuntores:

Tabela 4.16 – Erros de Estimação dos Estados (EIET - 2)

(a) Erros de Tensão Complexa

Tensão	Erro _V
V_1	0,00016
V_2	0,00033
V_3	0,00018
V_4	0,00017
V_5	0,00018

(b) Erros de Fluxo de Potência

Disj.	Erro _t	Erro _u
1	0,0001	0,0004
2	0,0008	0,0002
3	0,0002	0,0005
4	0,0010	0,0007

7. EIET - 2: Análise de Erro Grosseiro

Com base na Tabela 4.12 e com o limiar $K = 24,996$, não há detecção de erro grosseiro no decorrer processo de convergência, pois os valores de $J(\hat{\mathbf{x}})$ não atingem o limiar K nas iterações que se permite a análise de erro grosseiro (a partir da 2^o iteração).

8. EIET - 2: Termos da Função-Objetivo

Tabela 4.17 – Termos da Função-Objetivo ao Final da Segunda Iteração

Termo	Valor
$J(\hat{\mathbf{x}})$	0,2196
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	0,2195
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,23 \times 10^{-4}$

9. EIET - 2: Validação da Topologia

Os valores dos limiares de fluxo de potência nos ramos chaveáveis são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Limiares para as Variáveis de Estado de Fluxo

Estado	ε_{fluxo_t}	Estado	ε_{fluxo_u}
t_{24}	0,0206	u_{24}	0,0132
t_{25}	0,0245	u_{25}	0,0156
t_{34}	0,0240	u_{34}	0,0151
t_{35}	0,0243	u_{35}	0,0135

Tabela 4.19 – Estimação e Validação da Topologia

Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_t}	Status estimado	Status presumido
t_{24}	-0,3999	0,0206	F	F
t_{25}	-0,0008	0,0245	A	A
t_{34}	-0,0002	0,0240	A	A
t_{35}	-0,7990	0,0243	F	F
Estado	Valor estimado	ε_{fluxo_u}	Status estimado	Status presumido
u_{24}	-0,1496	0,0132	F	F
u_{25}	-0,0002	0,0156	A	A
u_{34}	0,0005	0,0151	A	A
u_{35}	-0,1993	0,0135	F	F

A Tabela 4.19 apresenta os *status* estimados, assim como a comparação com os *status* presumidos.

Deste modo, com os resultados apresentados na Tabela 4.19, percebe-se que os *status* estimados são iguais aos *status* presumidos no início desta nova iteração do algoritmo, e portanto não há ajustes a serem feitos na topologia. Logo, o processo de estimação de estados é encerrado.

4.8.1 Análise Comparativa dos Algoritmos de EIET

De forma a realizar uma comparação dos resultados obtidos da aplicação do método acima, o mesmo problema foi resolvido pelos algoritmos apresentados previamente baseados no método de ajuste externo, aplicando as rotinas de resolução pela Equação Normal expandida e pelas rotações rápidas de Givens.

Assim, na primeira iteração do EIET, todos os algoritmos convergiram em três iterações para os seus laços internos, obtendo os mesmos resultados, e os valores dos termos da função-objetivo são mostrados na Tabela 4.20, em que a segunda coluna se refere aos resultados obtidos pelo *método de ajuste interno* já apresentados anteriormente (denotado de *GMA.INT*); a terceira coluna refere-se aos resultados do algoritmo apresentado na Subseção 4.3.1, baseado no *método de ajuste externo* (denotado de *GMA.EXT*), e a quarta coluna faz referência aos resultados obtidos pela Equação Normal.

Na mesma Tabela, são visualizados os valores da iteração final dos algoritmos, sendo que houve convergência em três iterações para

Tabela 4.20 – Termos da Função-Objetivo no Processo Iterativo

EIET - 1			
<i>Função-objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	97,463	97,463	97,463
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	2,324	2,324	2,324
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	95,139	95,139	95,139
EIET - 2			
<i>Função-objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	0,21962	0,21962	0,21962
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	0,21950	0,21950	0,21950
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,235 \times 10^{-04}$	$1,176 \times 10^{-04}$	$1,176 \times 10^{-04}$

laço interno do processo de estimação em *GMA.INT*, e quatro iterações para os algoritmos *GMA.EXT* e *Eq. Normal*. Observa-se que os valores finais são diferenciados a partir do 5º dígito decimal para o termo $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$. Também pode-se comparar os valores das variáveis de estado obtidos pelos algoritmos no encerramento do processo de estimação, a partir da Figura 4.5, que mostra os desvios absolutos dos estados convencionais em relação aos valores do fluxo de potência convergido (magnitudes de tensão e ângulos), e da Figura 4.6, que apresenta os desvios absolutos das variáveis de fluxo de potência ativa e reativa nos dispositivos chaveáveis. Para ambas as figuras observa-se que a estimação integrada realizada pelos algoritmos levam a resultados iguais.

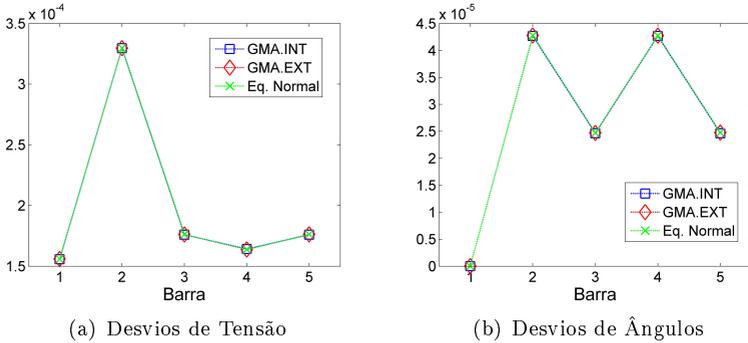


Figura 4.5 – Desvios dos Estados de Tensão Nodal

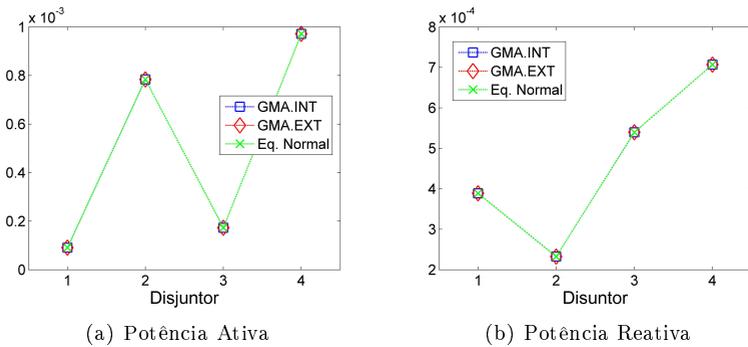


Figura 4.6 – Desvios dos Estados de Fluxo

4.9 Conclusão

Este capítulo introduz o método de Estimação Integrada de Estados e Topologia (EIET). O princípio deste método é o tratamento da topologia da rede elétrica (condições operacionais do sistema) como informação de estado *a priori*, e a consideração de que as medidas analógicas possuem intrinsecamente informações sobre os *status* dos dispositivos chaveáveis. Então, é possível estimar os estados convencionais, assim como os *status* dos disjuntores presentes em uma parte da rede detalhada no nível de seção de barra.

A formulação do problema utiliza o critério dos mínimos quadrados ponderados, tendo sido consideradas as resoluções pela Equação Normal e por rotações rápidas de Givens. Nesta última exploram-se as características do método para a inclusão de informações *a priori*, assim como para o processamento de medidas portadoras de erros grosseiros. Desta forma, foram propostos dois métodos de implementação das condições operacionais: o Método de Ajuste Externo, que independe das características do algoritmo para a solução da estimação de estados; e o Método de Ajuste Interno, o qual tira proveito das características de inicialização das rotações de Givens. As estratégias para a estimação e validação da topologia também são apresentadas. O método proposto é aplicado a um sistema ilustrativo de pequeno porte, tendo apresentado boas características de convergência e bom desempenho na estimação dos estados.

Para avaliar de forma mais extensiva o desempenho do método, os algoritmos propostos foram aplicados a sistemas em que são modelados quantidades maiores de dispositivos chaveáveis e diferentes configurações de arranjos de subestação. Os resultados e discussões são apresentados no Capítulo 5.

5 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

5.1 Introdução

Este capítulo é dedicado à avaliação do desempenho e da qualidade dos resultados fornecidos pelo estimador integrado de estados e topologia, aplicando a referida metodologia a sistemas de médio porte. Para tal, três sistemas-teste do IEEE, 14, 30 e 57 barras, com a modelagem de parte da rede no nível de seção de barra, são utilizados. Para a análise de erros grosseiros é utilizado apenas o sistema-teste do IEEE 14 barras, porém as observações e discussões realizadas podem ser estendidas aos outros sistemas.

O capítulo é dividido da seguinte forma: a Seção 5.2 aborda algumas considerações sobre os aspectos computacionais e simulações; a Seção 5.3 apresenta os resultados da aplicação do método no sistema-teste IEEE 14 barras; os resultados referentes ao sistema-teste IEEE 30 barras são apresentados na Seção 5.4 e os referentes ao sistema do IEEE 57 barras são discutidos na Seção 5.5; os resultados do processamento de erros grosseiros aplicado ao sistema-teste IEEE 14 barras são apresentados na Seção 5.6; finalmente, as Seções 5.7 e 5.8 sumarizam os comentários finais e conclusões.

5.2 Ambiente de Simulação e Considerações Computacionais

Um ambiente computacional foi desenvolvido na linguagem MATLAB para o desenvolvimento de todas as etapas do trabalho proposto. Todas as simulações partem de resultados do fluxo de potência no nível de seção de barra, apresentados nos estudos em [8] e [9], que fornecem os valores “verdadeiros” para os estados convencionais, fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis e demais variáveis da rede elétrica. Os modelos de arranjos das subestações dos sistemas-teste foram obtidos de estudos empregados em [23, 39, 41, 69, 70].

Para testar a capacidade do estimador em realizar análises da topologia do sistema, seja para corrigir e/ou confirmar topologias presumidas, são considerados alguns estudos de caso em função dos *status* dos disjuntores, como descrito a seguir:

Caso A: A partir da configuração inicial dos sistemas-teste, uma linha de transmissão é excluída erroneamente através de informações

incorretas dos *status* de um ou mais disjuntores;

Caso B: Um ou vários ramos são adicionados indevidamente ao modelo do sistema;

Caso C: Erro nas informações sobre os *status* de alguns disjuntores, que levam a uma interconexão indevida de dois circuitos de transmissão incidentes em uma subestação, desconsiderando as conexões que nela existem. Este tipo de erro é denominado de *by-pass*;

Caso D: A inicialização do processo parte de nenhum conhecimento prévio sobre os dispositivos chaveáveis, de modo que estes são considerados todos abertos. Tal condição é referida como *partida plana* de topologia;

Caso E: Neste caso, a topologia presumida é igual à topologia verdadeira dos referidos sistemas-teste.

Nestes casos detalhados, as medidas analógicas dos sistemas são consideradas livres de erros grosseiros.

Os valores iniciais das variáveis de estado do processo iterativo são: 1,0 *p.u.* para as magnitudes de tensão, 0,0 *rad* para os ângulos nas barras e 0,0 *p.u.* para os fluxos de potência ativa e reativa dos disjuntores.

A estratégia escolhida para o tratamento das condições operacionais como informações *a priori* é a abordada na Subseção 4.3.2, a qual utiliza a inicialização matriz triangular superior das rotações rápidas de Givens (método de ajuste interno), e a partir dela são apresentados os resultados em detalhes. Entretanto, de modo a comparar o desempenho do outro método proposto (método de ajuste externo), são apresentados os principais valores numéricos dos casos simulados nos sistemas-teste. Com o intuito de diferenciá-los, os resultados são denotados conforme realizado na aplicação ilustrativa do método de EIET, em que **GMA.INT** apresenta resultados obtidos através do método de ajuste interno, **GMA.EXT** se refere aos resultados do método de ajuste externo fazendo o uso das rotações rápidas de Givens, como apresentado na Subseção 4.3.1, e **Eq. Normal** apresenta os resultados obtidos pela Equação Normal, considerando o método de ajuste externo.

Os resultados para as simulações com erros grosseiros são apresentados em duas partes. Primeiramente, são relatadas simulações onde há somente erros grosseiros, enquanto a topologia está livre de erros. Em seguida, são apresentadas as simulações em que erros grosseiros e erros de topologia ocorrem ao mesmo tempo. Para os testes, a escolha

das medidas é compatível com a seleção de parte da área modelada no nível de seção de barra, e nelas são introduzidos erros de magnitude 15σ , onde σ é o valor do respectivo desvio-padrão.

Assim, os casos simulados com erros grosseiros são descritos a seguir:

Caso F: Uma única medida é simulada com erro grosseiro. Apresenta-se uma discussão sobre medidas espúrias e redundância das medidas analógicas na monitoração direta de dispositivos chaveáveis. A topologia presumida é igual à verdadeira;

Caso G: Com redundância elevada das medidas realizadas no sistema-teste, múltiplos erros grosseiros são simulados, e a topologia está livre de erros. Medidas com erros interativos também são processadas;

Caso H: Neste caso, erros grosseiros e erros de topologia ocorrem ao mesmo tempo.

Cada simulação é caracterizada pelo mesmo conjunto de medidas dos sistemas-teste em questão, sendo diferenciadas somente pelas sementes que fornecem os erros aleatórios inseridos nas medidas analógicas.

5.3 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema-teste IEEE 14 barras, mostrado na Figura 5.1, na qual também são indicadas as medidas analógicas do modelo barra-ramo. Para a aplicação do método, as subestações 6 e 13 são modeladas em detalhes e os dispositivos chaveáveis e interconexões são apresentados na Figura 5.2. No Apêndice A são mostrados os parâmetros do sistema e o detalhamento do plano de medição utilizado.

Com a adição da modelagem no nível de seção de barra, o sistema passa a conter 25 nós elétricos e 35 ramos, dos quais 15 são chaveáveis, formando um total de 80 variáveis de estado, o que inclui as variáveis das tensões nodais e de fluxo. A Figura 5.2 também apresenta a indicação dos *status* atuais dos disjuntores, assim as medições realizadas nos nós e ramos. A Tabela 5.1 realiza uma síntese dos casos simulados, mostrando como os disjuntores são designados e também seus *status* corretos.

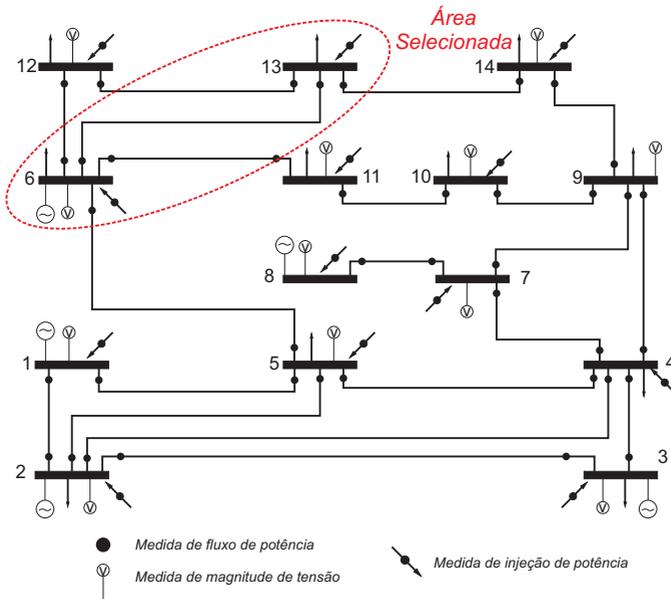


Figura 5.1 – Sistema IEEE 14 barras com plano de medição

Na área selecionada arbitrariamente, que envolve as subestações 6 e 13, são simuladas anomalias que a princípio envolvem somente erros de topologia presumida (uma análise de erros grosseiros envolvendo as mesmas subestações é apresentada na subseção 5.6).

Analisando o modelo físico das subestações, nota-se que três arranjos do tipo disjuntor e meio e um do tipo disjuntor duplo formam a subestação 6. A mesma apresenta um compensador síncrono instalado no nó 21 para fornecimento de potência reativa. No total, a subestação contém 9 nós elétricos e 11 disjuntores que, além da compensação reativa, fazem a distribuição de potência para dois pontos de carga, e conecta a referida barra às outras quatro adjacentes.

Já a subestação 13 apresenta o modelo físico denominado de arranjo em anel, com quatro disjuntores e quatro nós elétricos, sendo que um possui carga acoplada e os outros conectam a subestação às barras adjacentes, inclusive a subestação 6.

As simulações realizadas para o Caso A são divididas em duas etapas, conforme apresentado na Tabela 5.1. A primeira consiste em simular a exclusão de uma linha de transmissão do sistema (A1), presumindo que o disjuntor $D9$ está aberto. Isto leva a desconectar a

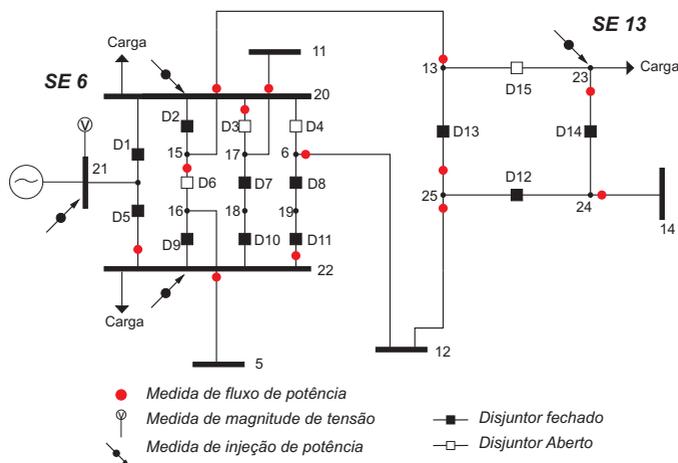


Figura 5.2 – Detalhamento das subestações 6 e 13 no nível de seção de barras

linha de transmissão entre o nó 16 e a barra 5 (ver Figura 5.2), ou seja, o erro interrompe a conexão entre as barras 5 e 6 do sistema. A segunda consiste em simular uma exclusão múltipla de linhas (A2), a partir da alteração dos *status* dos disjuntores $D5$, na subestação 6, e $D12$ e $D13$, na subestação 13. Isto acarreta duas consequências independentes: (1) separação da subestação 6 em duas barras (*bus split error*), interrompendo o fornecimento de potência reativa para parte do sistema; (2) e a inoperação das linhas que interconectam os nós 13 e 15, e o nó 25 à barra 12 (desconexão da barra 13 com as barras 6 e 12, respectivamente).

São apresentados em maiores detalhes os resultados numéricos para o Caso A1, evidenciando os processo de convergência do laço interno do método de EIET (executado pelo *Algoritmo_Givens* abordado na Subseção 4.3.3) e os valores dos estados estimados. A discussão dos demais casos é mais sucinta, com apresentação dos principais valores numéricos da função-objetivo nas iterações do Algoritmo de EIET e a validação da topologia.

Tabela 5.1 – Síntese dos Casos Simulados - IEEE 14 Barras

Caso	Simulação	Disj.	Correto	Simulado
A1	Exclusão Simples	D9	Fechado	Aberto
A2	Exclusão Múltipla	D5	Fechado	Aberto
		D12	Fechado	Aberto
		D13	Fechado	Aberto
B	Inclusão de Ramo	D3	Aberto	Fechado
C	<i>By-pass</i>	D2	Fechado	Aberto
		D6	Aberto	Fechado
		D9	Fechado	Aberto
D	Partida Plana	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> 5.2	Todos Abertos
E	Topologia Correta	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> 5.2	<i>ver</i> <i>Figura</i> 5.2

5.3.1 Sistema de 14 Barras - Caso A1

O Caso A1 leva duas iterações do laço externo do método de EIET. Os valores da função-objetivo $J(\hat{\mathbf{x}})$ da primeira iteração e os termos que o compõem são visualizados na Tabela 5.2, em que $J_r(\hat{\mathbf{x}})$ é referente ao termos dos resíduos das medidas e pseudomedidas (restrições estruturais) e $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$ das informações *a priori*. Nela, nota-se que são necessárias 3 iterações para a convergência do laço interno (algoritmo *GMA.INT*). Também ressalta-se que o valor final $J(\hat{\mathbf{x}}) = 16,55$ atingido é atingindo de forma aproximada já na segunda iteração, entretanto, como o critério de parada não é atingido, o algoritmo se encerra ao final da terceira. Isto pode ser observado na Tabela 5.3, em que a norma infinita do vetor de incrementos $\Delta\hat{\mathbf{x}}$ não atinge a tolerância estipulada na segunda iteração. Da mesma forma, observa-se que o resultado final referente à norma das restrições estruturais atinge um valor da ordem de 1×10^{-7} .

Após a convergência das rotações rápidas de Givens, são obtidos os valores estimados das variáveis de estado. A Tabela 5.4 apresenta as estimativas obtidas para as variáveis convencionais, ou seja, magnitudes de tensão e ângulos nos nós elétricos. Estes valores são comparados com os fornecidos pelo estudo de fluxo de potência. Pode-se perceber que os valores estimados e reais não são iguais, o que se deve aos erros aleatórios introduzidos nas medidas simuladas. Adicionalmente,

Tabela 5.2 – Termos da Função-Objetivo do Processo de Convergência - *Caso A1*

Iteração EIET 01			
Iteração	$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$J(\hat{\mathbf{x}})$
1	$2,241.10^2$	$7,624.10^1$	$3,004.10^2$
2	$2,050.10^0$	$1,450.10^1$	$1,655.10^1$
3	$2,084.10^0$	$1,447.10^1$	$1,655.10^1$

Tabela 5.3 – Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ - *Caso A1*

Iteração EIET 01		
Iteração	$\ \Delta\hat{\mathbf{x}}\ _\infty$	$\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})\ _\infty$
1	$4,290.10^{-1}$	$2,999.10^{-2}$
2	$5,147.10^{-2}$	$2,125.10^{-4}$
3	$1,622.10^{-4}$	$3,378.10^{-7}$

percebe-se que mesmo com o erro na topologia, o estimador é capaz de fornecer bons resultados para as estimativas dos estados, pois os valores se encontram próximos aos “verdadeiros”, com diferenças na quarta casa decimal. Também são estimados os valores dos fluxos ativos e reativos nos ramos chaveáveis, que são apresentados na Tabela 5.5, juntamente com os respectivos valores do fluxo de potência convergido. De forma semelhante aos estados convencionais, as estimativas dos valores das variáveis de fluxos são próximas aos do fluxo de potência, com diferenças na terceira casa decimal entre os valores estimados e “verdadeiros”. Nota-se que os fluxos estimados para o disjuntor $D9$ (nós 16-22) claramente não atendem o *status* presumido como aberto.

Os resultados das estimativas podem ser qualificados pelas métricas discutidas na Seção 4.4. O desvio padrão e o valor médio dos erros das estimativas para as tensões complexas são $0,00035 p.u.$ e $0,00060 p.u.$, respectivamente. O valor da métrica para a tensão é $0,0035 p.u.$ Por estes resultados, pode-se qualificar o bom desempenho do estimador com relação às variáveis de estados. Para os estados de fluxo dos ramos chaveáveis, os valores estatísticos em relação ao fluxo de potência são do mesmo nível de qualidade, em que o desvio padrão, o valor médio e a métrica dos erros são $0,0053 p.u.$, $0,0050 p.u.$ e $0,0277 p.u.$ para os fluxos de potência ativa e $0,0008 p.u.$, $0,0008 p.u.$ e $0,0045 p.u.$ fluxos de potência reativa.

Como consequência do processo de validação da topologia, é evi-

Tabela 5.4 – Valores das Tensões Complexas nas Barras na Primeira Iteração - *Caso A1*

Barra	Iteração EIET 01			
	Verdadeiros		Estimados	
	Tensão (p.u)	Ângulo rad	Tensão (p.u)	Ângulo rad
1	1,0600	0,0000	1,0597	0,0000
2	1,0450	-0,0879	1,0447	-0,0879
3	1,0100	-0,2240	1,0098	-0,2242
4	1,0142	-0,1814	1,0139	-0,1815
5	1,0180	-0,1543	1,0177	-0,1544
6	1,0000	-0,2619	0,9992	-0,2617
7	1,0284	-0,2415	1,0281	-0,2414
8	1,0900	-0,2414	1,0896	-0,2409
9	0,9989	-0,2738	0,9986	-0,2736
10	0,9913	-0,2774	0,9911	-0,2772
11	0,9920	-0,2724	0,9921	-0,2721
12	0,9849	-0,2791	0,9840	-0,2792
13	0,9804	-0,2812	0,9792	-0,2812
14	0,9716	-0,2968	0,9713	-0,2968
15	1,0000	-0,2619	0,9987	-0,2619
16	1,0000	-0,2619	0,9997	-0,2609
17	1,0000	-0,2619	1,0002	-0,2616
18	1,0000	-0,2619	0,9998	-0,2617
19	1,0000	-0,2619	0,9993	-0,2617
20	1,0000	-0,2619	0,9989	-0,2619
21	1,0000	-0,2619	0,9990	-0,2618
22	1,0000	-0,2619	0,9994	-0,2617
23	0,9804	-0,2812	0,9801	-0,2814
24	0,9804	-0,2812	0,9801	-0,2814
25	0,9804	-0,2812	0,9795	-0,2813

denciada a discordância entre os *status* presumidos e estimados, e portanto ocorre a correção do *status* do disjuntor *D9*. Em consequência, é realizada uma segunda iteração do método de EIET. As rotações rápidas de Givens são novamente processadas e levam três iterações para a convergência. Os valores dos termos da função-objetivo são apresentados na Tabela 5.6 e os valores das normas infinitas de $\Delta \hat{\mathbf{x}}$ e $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$ são mostrados na Tabela 5.7. Ao final do processo, o valor da soma ponderada do quadrado dos resíduos apresenta um decréscimo em relação à primeira iteração, passando para $J(\hat{\mathbf{x}}) = 1,644$. Dentre os termos que o formam, destacam-se os valores de $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$ ao fim da primeira e segunda iteração, os quais possuem uma relativa diferença numérica, o que leva a indicar que as estimativas finais das variáveis de estado correspondem com as informações *a priori* de topologia (con-

Tabela 5.5 – Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis na Primeira Iteração - *Caso A1*

Disjuntor			Iteração EIET 01			
			Verdadeiros		Estimados	
Nº	De	P/	t_{ij} (<i>p.u.</i>)	u_{ij} (<i>p.u.</i>)	t_{ij} (<i>p.u.</i>)	u_{ij} (<i>p.u.</i>)
1	20	21	-0,2324	-0,0989	-0,2349	-0,0959
2	15	20	-0,1764	-0,0614	-0,1723	-0,0591
3	17	20	+0,000	+0,000	-0,0017	+0,002
4	6	20	+0,000	+0,000	-0,0023	+0,003
5	21	22	-0,2224	+0,442	-0,2269	+0,436
6	15	16	+0,000	+0,000	-0,0082	-0,0009
7	17	18	-0,0784	-0,0325	-0,0632	-0,0317
8	6	19	-0,0771	-0,0224	-0,0757	-0,0227
9	16	22	+0,4339	+0,481	+0,4211	+0,476
10	18	22	-0,0784	-0,0325	-0,0632	-0,0317
11	19	22	-0,0771	-0,0224	-0,0757	-0,0227
12	24	25	-0,1893	-0,0613	-0,1893	-0,0617
13	13	25	+0,1741	+0,566	+0,1738	+0,567
14	23	24	-0,1350	-0,0580	-0,1336	-0,0592
15	13	23	+0,000	+0,000	+0,044	-0,0013

dições operacionais presumidas no início da segunda iteração). Em relação ao critério de parada da segunda iteração, o valor é atendido e visualizado na Tabela 5.7. Em relação às restrições estruturais $\mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})$, o valor obtido para a respectiva norma está na ordem de 1×10^{-7} .

Tabela 5.6 – Termos da Função-Objetivo do Processo de Convergência na Segunda Iteração - *Caso A1*

Iteração EIET 02			
Iteração	$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$J(\hat{\mathbf{x}})$
1	$2,180.10^2$	$6,628.10^1$	$2,843.10^2$
2	$1,610.10^0$	$3,424.10^{-2}$	$1,644.10^0$
3	$1,643.10^0$	$7,725.10^{-4}$	$1,644.10^0$

Os resultados finais das variáveis de estado estimadas para as magnitudes de tensão e ângulos nas barras e das variáveis de fluxo de potência ativa e reativa através dos disjuntores são apresentados na Tabela 5.8 e 5.9, respectivamente. Adicionalmente, calculam-se os dados estatísticos sobre os erros de estimação das variáveis e têm-se que o desvio padrão e o valor médio para as tensões complexas são respectivamente $0,0003 \text{ p.u.}$ e $0,0006 \text{ p.u.}$ O valor da métrica para a tensão é $0,0032 \text{ p.u.}$ Para os estados de fluxo dos ramos chaveáveis

Tabela 5.7 – Valores das Normas Infinitas para um Critério de Parada com $tol = 1 \times 10^{-3}$ - *Caso A1*

Iteração EIET 02		
Iteração	$\ \Delta\hat{\mathbf{x}}\ _{\infty}$	$\ \mathbf{h}_s(\hat{\mathbf{x}})\ _{\infty}$
1	$4,426 \cdot 10^{-1}$	$2,997 \cdot 10^{-2}$
2	$5,289 \cdot 10^{-2}$	$2,191 \cdot 10^{-4}$
3	$1,640 \cdot 10^{-4}$	$1,569 \cdot 10^{-7}$

têm-se que o desvio-padrão, o valor médio e a métrica dos erros são 0,0019 *p.u.*, 0,0019 *p.u.* e 0,0101 *p.u.* para os fluxos de potência ativa e 0,0008 *p.u.*, 0,0007 *p.u.* e 0,0041 *p.u.* para os fluxos de potência reativa.

Tabela 5.8 – Valores das Tensões Complexas nas Barras na Segunda Iteração - *Caso A1*

Barra	Iteração EIET 02			
	Verdadeiros		Estimados	
	Tensão (<i>p.u.</i>)	Ângulo <i>rad</i>	Tensão (<i>p.u.</i>)	Ângulo <i>rad</i>
1	1,0600	0,0000	1,0597	0,0000
2	1,0450	-0,0879	1,0447	-0,0879
3	1,0100	-0,2240	1,0098	-0,2242
4	1,0142	-0,1814	1,0139	-0,1815
5	1,0180	-0,1543	1,0177	-0,1544
6	1,0000	-0,2619	0,9991	-0,2619
7	1,0284	-0,2415	1,0281	-0,2414
8	1,0900	-0,2414	1,0896	-0,2409
9	0,9989	-0,2738	0,9986	-0,2736
10	0,9913	-0,2774	0,9911	-0,2772
11	0,9920	-0,2724	0,9921	-0,2721
12	0,9849	-0,2791	0,9840	-0,2793
13	0,9804	-0,2812	0,9794	-0,2813
14	0,9716	-0,2968	0,9713	-0,2968
15	1,0000	-0,2619	0,9988	-0,2620
16	1,0000	-0,2619	0,9996	-0,2621
17	1,0000	-0,2619	1,0002	-0,2616
18	1,0000	-0,2619	0,9998	-0,2618
19	1,0000	-0,2619	0,9993	-0,2619
20	1,0000	-0,2619	0,9989	-0,2620
21	1,0000	-0,2619	0,9990	-0,2620
22	1,0000	-0,2619	0,9994	-0,2619
23	0,9804	-0,2812	0,9801	-0,2814
24	0,9804	-0,2812	0,9801	-0,2814
25	0,9804	-0,2812	0,9795	-0,2813

Tabela 5.9 – Valores dos Fluxos nos Ramos Chaveáveis na Segunda Iteração - *Caso A1*

Disjuntor			Iteração EIET 02			
			Verdadeiros		Estimados	
			t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)
Nº	De	P/				
1	20	21	-0,2324	-0,0989	-0,2373	-0,0961
2	15	20	-0,1764	-0,0614	-0,1785	-0,0595
3	17	20	+0,000	+0,000	-0,0007	+0,002
4	6	20	+0,000	+0,000	-0,0009	+0,004
5	21	22	-0,2224	+0,442	-0,2280	+0,436
6	15	16	+0,000	+0,000	+0,007	-0,0002
7	17	18	-0,0784	-0,0325	-0,0742	-0,0320
8	6	19	-0,0771	-0,0224	-0,0767	-0,0228
9	16	22	+0,4339	+0,481	+0,4343	+0,480
10	18	22	-0,0784	-0,0325	-0,0742	-0,0320
11	19	22	-0,0771	-0,0224	-0,0767	-0,0228
12	24	25	-0,1893	-0,0613	-0,1888	-0,0617
13	13	25	+0,1741	+0,566	+0,1734	+0,566
14	23	24	-0,1350	-0,0580	-0,1346	-0,0592
15	13	23	+0,000	+0,000	+0,022	-0,0014

A validação da topologia em todo o processo de estimação é apresentado na Tabela 5.10, na qual são mostrados os *status* presumidos no início do processo e os estimados de cada iteração do método de EIET. Deste modo, verifica-se que o disjuntor *D9*, iniciado como aberto, é estimado como fechado ao final da primeira iteração. Esta informação é tomada como presumida na próxima iteração com o intuito de ser validada. Finalmente, os *status* estimados na segunda iteração são iguais aos presumidos, ou seja, sem quaisquer alterações, e portanto o algoritmo é encerrado.

Tabela 5.10 – Validação da Topologia - Exclusão Simples - *Caso A1*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	F	F	F	F
3	A	A	A	A
4	A	A	A	A
5	F	F	F	F
6	A	A	A	A
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	A	F	F	F

Continua na próxima página

Tabela 5.10 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
10	F	F	F	F
11	F	F	F	F
12	F	F	F	F
13	F	F	F	F
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A

O Caso A1 leva um tempo de 0,8279 segundos para completar todo o processo. A Tabela 5.11 mostra resumidamente os valores da função-objetivo em cada iteração, evidenciando a redução nos valores dos componentes da função-objetivo.

Tabela 5.11 – Função-Objetivo - Exclusão Simples - *Caso A1*

Função-objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	16,550	1,644
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	2,084	1,643
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	14,465	$7,72 \cdot 10^{-4}$

A Tabela 5.12 realiza a comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos propostos. Uma das diferenças é o número de iterações necessárias para convergência pelo laço interno do método de EIET. Os dois algoritmos *GMA.EXT* e *Eq.Normal* levam 8 iterações, tanto na primeira quanto na segunda. Os valores dos resultados finais são bem próximos entre si. Pequenas diferenças podem ser observadas nos valores do termo $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$.

Tabela 5.12 – Comparação dos Algoritmos - Exclusão Simples - *Caso A1*

Iteração 1			
Função-objetivo	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	16,550	16,550	16,550
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	2,084	2,084	2,084
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	14,465	14,466	14,466
Iteração 2			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	1,6441	1,6517	1,6517
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	1,6434	1,6434	1,6434
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$7,725 \cdot 10^{-4}$	$8,287 \cdot 10^{-3}$	$8,288 \cdot 10^{-3}$

5.3.2 Sistema de 14 Barras - Caso A2

Os resultados do processamento do laço externo do Caso A2 são apresentados na Tabela 5.13. O algoritmo leva duas iterações do laço externo para estimar, corrigir e validar a topologia correta sendo que, em cada uma delas, as rotações rápidas de Givens convergem em 3 iterações. Verifica-se novamente que os erros de topologia afetam diretamente o termo das informações *a priori*. Na Tabela 5.14 é mostrado como os *status* dos disjuntores $D5$, $D12$ e $D13$ são corrigidos durante o processo. O tempo total de processamento deste caso foi de 1,143 segundos.

A Tabela 5.15 mostra os resultados obtidos pelos demais algoritmos. Em relação ao número de iterações do laço interno, os algoritmos *GMA.EXT* e *Eq. Normal* convergem em 8 tanto na primeira quanto na segunda iteração do laço externo. Nota-se que os resultados em ambas iterações do laço externo do método EIET são próximos de uns aos outros, o que valida o desempenho dos algoritmos propostos.

Tabela 5.13 – Função-objetivo - Exclusão Múltipla - *Caso A2*

Função-objetivo	Estimaco Inicial	Estimaco Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	18,314	3,278
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	3,511	3,277
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	14,803	$9,69 \cdot 10^{-4}$

Tabela 5.14 – Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - *Caso A2*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	F	F	F	F
3	A	A	A	A
4	A	A	A	A
5	A	F	F	F
6	A	A	A	A
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	F	F	F	F
10	F	F	F	F
11	F	F	F	F
12	A	F	F	F
13	A	F	F	F
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A

Tabela 5.15 – Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - *Caso A2*

Iteração 1			
<i>Função-objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	18,314	18,314	18,314
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	3,511	3,511	3,511
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	14,803	14,803	14,803
Iteração 2			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	3,2781	3,2782	3,2782
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	3,2772	3,2771	3,2771
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$9,695 \cdot 10^{-4}$	$1,095 \cdot 10^{-3}$	$1,098 \cdot 10^{-3}$

5.3.3 Sistema de 14 Barras - Caso B

O Caso B se refere à simulação de um erro de topologia do tipo inclusão de ramo, como descrito na Tabela 5.1. Desta forma, o disjuntor $D3$ é simulado inicialmente como fechado. São necessárias 2 iterações do laço externo do algoritmo EIET, sendo que, em cada uma, o laço interno converge em 3 iterações. Os valores dos termos da função-objetivo nas iterações do laço externo são apresentados na Tabela 5.16. O tempo gasto no processamento foi de 0,9726 segundos. Percebe-se que este erro de topologia não afeta de maneira significativa o valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ como nos casos apresentados anteriormente, do tipo erro exclusão

de ramo. Isto se deve ao fato de que um disjuntor aberto pode ser simulado como fechado, contendo um fluxo de baixa magnitude [33].

Outro fator observado está relacionado às diferentes informações sobre o disjuntor $D3$ (nós 17-20) que são processadas em cada uma das iterações. Na primeira, o referido disjuntor é presumido erroneamente como fechado; logo, as informações levadas ao estimador são que as diferenças de tensão e ângulo entre os terminais que o conectam sejam nulas. Basicamente, tal fato é verdadeiro, pois devido às interconexões da subestação 6, todos os nós internos devem possuir os mesmos valores de ângulo e magnitude de tensão (*ver Figura 5.2*). Entretanto, com base nas medidas analógicas disponíveis, pode-se estimar os valores dos fluxos de potência ativa e reativa sobre o dispositivo seccionador e juntamente com a aplicação do teste de hipótese, discutido na Seção 4.5, permite-se identificar e corrigir o *status* do disjuntor. Desta forma, o processamento da segunda iteração inicia com a informação de disjuntor aberto.

Os resultados da estimação de estados nas duas iterações para os nós da subestação 6 podem ser visualizados na Tabela 5.18, onde enfatizam-se os nós elétricos 17 e 20, os quais conectam o disjuntor $D3$. Os valores estimados para fluxos no disjuntor em destaque são apresentados na Tabela 5.19. Finalmente, a Tabela 5.20 apresenta os valores obtidos no processamento dos outros algoritmos. O número de iterações dos laços internos foram de 8 para os algoritmo $GMA.EXT$ e $Eq. Normal$, nas duas iterações externas.

Tabela 5.16 – Função-objetivo - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Função-objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	3,268	3,268
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	3,267	3,267
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,13.10^{-3}$	$7,80.10^{-4}$

Tabela 5.17 – Validação da Topologia - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	F	F	F	F
3	F	A	A	A
4	A	A	A	A
5	F	F	F	F

Continua na próxima página

Tabela 5.17 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
6	A	A	A	A
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	F	F	F	F
10	F	F	F	F
11	F	F	F	F
12	F	F	F	F
13	F	F	F	F
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A

Tabela 5.18 – Valores das Tensões Complexas da Subestação 6 - *Caso B*

Barra	Verdadeiros		Iteração 1		Iteração 2	
	Tensão (p.u)	Ângulo rad	Tensão (p.u)	Ângulo rad	Tensão (p.u)	Ângulo rad
6	1,000	-0,2619	0,9998	-0,2619	0,9998	-0,2620
15	1,000	-0,2619	0,9992	-0,2619	0,9996	-0,2621
16	1,000	-0,2619	0,9994	-0,2627	0,9994	-0,2627
17	1,000	-0,2619	0,9986	-0,2617	0,9986	-0,2617
18	1,000	-0,2619	0,9986	-0,2617	0,9994	-0,2620
19	1,000	-0,2619	0,9998	-0,2620	0,9999	-0,2621
20	1,000	-0,2619	0,9998	-0,2619	1,0006	-0,2622
21	1,000	-0,2619	1,0017	-0,2620	1,0017	-0,2622
22	1,000	-0,2619	0,9999	-0,2621	1,0001	-0,2623

Tabela 5.19 – Valores dos Fluxos no Disjuntor *D3* - *Caso B*

Disjuntor		Valores Reais		Iteração 1		Iteração 2	
		t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	Estimados		Estimados	
Nº	De-P/	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)	t_{ij} (p.u)	u_{ij} (p.u)
3	17-20	0,0000	0,0000	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$8,93 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$9,17 \cdot 10^{-5}$

Tabela 5.20 – Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Iteração 1			
Função-objetivo	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{x})$	3,268	3,270	3,270
$J_r(\hat{x})$	3,267	3,267	3,267
$J_{InfP}(\hat{x})$	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
Iteração 2			
$J(\hat{x})$	3,2682	3,2685	3,2685
$J_r(\hat{x})$	3,2674	3,2675	3,2675
$J_{InfP}(\hat{x})$	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$

5.3.4 Sistema de 14 Barras - Caso C

O tipo de erro *by pass* introduzido na topologia é simulado pelo Caso C. Os resultados dos termos da função-objetivo são apresentados na Tabela 5.21. Na Tabela 5.22 são mostrados como os *status* são corrigidos e confirmados nas duas iterações de processamento do método. Na mesma tabela, enfatiza-se a correção dos *status* dos disjuntores *D2*, *D6* e *D9*, os quais fazem parte do ramo com arranjo disjuntor e meio e presumidos erroneamente. Este caso leva 0,808 segundos para todo o processamento. A Tabela 5.23 realiza a comparação dos resultados processados pelos outros algoritmos de EIET.

Tabela 5.21 – Função-objetivo - *by pass* - *Caso C*

Função-objetivo	Estimacão Inicial	Estimacão Final
$J(\hat{x})$	19,098	8,065
$J_r(\hat{x})$	3,854	8,063
$J_{InfP}(\hat{x})$	15,244	$2,29 \cdot 10^{-3}$

Tabela 5.22 – Validação da Topologia - *by pass* - *Caso C*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	A	F	F	F
3	A	A	A	A
4	F	A	A	A
5	F	F	F	F
6	F	A	A	A

Continua na próxima página

Tabela 5.22 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	A	F	F	F
10	F	F	F	F
11	F	F	F	F
12	F	F	F	F
13	F	F	F	F
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A

Tabela 5.23 – Comparação dos Algoritmos - *by pass* - Caso C

Iteração 1			
<i>Função-objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{x})$	19,098	19,098	19,098
$J_r(\hat{x})$	3,854	3,854	3,854
$J_{InfP}(\hat{x})$	15,244	15,244	15,244
Iteração 2			
$J(\hat{x})$	3,2679	3,2682	3,2682
$J_r(\hat{x})$	3,2673	3,2673	3,2673
$J_{InfP}(\hat{x})$	$5,94.10^{-4}$	$8,62.10^{-4}$	$8,62.10^{-4}$

5.3.5 Sistema de 14 Barras - Caso D

O Caso D simula uma situação em que se considera que não há nenhuma informação sobre os *status* dos disjuntores das subestações, e portanto, todos são inicializados como abertos. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.24 e 5.25. Para a validação da topologia foram necessárias duas iterações do laço externo, com o tempo total de 0,8537 segundos. A Tabela 5.26 apresenta os valores simulados nos algoritmos *GMA.EXT* e *Eq. Normal*.

Tabela 5.24 – Função-objetivo - Partida Plana - *Caso D*

Função-objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	40,565	5,919
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	7,310	5,918
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	33,256	$6,78.10^{-4}$

Tabela 5.25 – Validação da Topologia - Partida Plana - *Caso D*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	A	F	F	F
2	A	F	F	F
3	A	A	A	A
4	A	A	A	A
5	A	F	F	F
6	A	A	A	A
7	A	F	F	F
8	A	F	F	F
9	A	F	F	F
10	A	F	F	F
11	A	F	F	F
12	A	F	F	F
13	A	F	F	F
14	A	F	F	F
15	A	A	A	A

Tabela 5.26 – Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - *Caso D*

Iteração 1			
Função-objetivo	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	40,565	40,565	40,566
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	7,310	7,310	7,310
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	33,256	33,256	33,256
Iteração 2			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	5,9187	5,9188	5,9188
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	5,9180	5,9180	5,9180
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$6,78.10^{-4}$	$7,56.10^{-4}$	$7,56.10^{-4}$

5.3.6 Sistema de 14 Barras - Caso E

O último caso para este sistema-teste, Caso E, é simulado com os *status* dos disjuntores corretos, levando somente uma iteração, pois a topologia estimada é igual à presumida. O processo levou 0,5017 segundos. A Tabela 5.27 apresenta os resultados obtidos pelos demais

algoritmos.

Tabela 5.27 – Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - *Caso E*

Iteração 1			
<i>Função-objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	7,451	7,452	7,452
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	7,449	7,449	7,449
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,94.10^{-3}$	$2,55.10^{-3}$	$2,55.10^{-3}$

5.3.7 Consolidação de Resultados para o Sistema de 14 Barras

Para efeito de comparação, a Tabela 5.28 apresenta os resultados numéricos de todos os casos simulados pelo algoritmo *GMA.INT*, enfatizando os valores dos termos da função-objetivo em cada iteração do laço externo, assim como os valores dos índices de desempenho (média, desvio-padrão e métricas) para os erros de tensões complexas nas barras e dos erros dos fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores. Analisando estes valores para algumas simulações, percebe-se o bom desempenho do estimador integrado. Em relação aos valores da análise de desempenho, todos ficam abaixo de 1×10^{-2} p.u. ao final do processo de estimação, o que não ocorre para alguns casos na primeira iteração, pois ainda estão sob os efeitos de erros de topologia, os quais se refletem no valor da soma ponderada do quadrado dos resíduos da iteração corrente. Dentre os casos simulados, o que atinge o maior valor de $J(\hat{\mathbf{x}})$ é o Caso D, com $J(\hat{\mathbf{x}}) = 40,565$, e sofre grande redução quando os erros de topologia são corrigidos, passando para $J(\hat{\mathbf{x}}) = 5,919$.

A Tabela 5.29 apresenta uma síntese do desempenho baseada no número de iterações do laço externo e dos três algoritmos do laço interno (*GMA.INT*, *GMA.EXT*) e *Eq.Normal*. Para cada caso, os resultados são apresentados da seguinte forma: os dígitos entre parênteses representam o número de iterações para a convergência do laço interno a cada iteração do laço externo. O número de iterações do laço externo é indicado fora dos parênteses.

Na mesma Tabela 5.29, observa-se, que para todos os casos em que erros na topologia presumida são simulados, o método de EIET converge em duas iterações. A tabela também mostra que diferenças de comportamento de cada método para os tipos de erro simulados se manifestam principalmente na convergência do laço interno do algoritmo EIET.

Tabela 5.28 – Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 14 barras

Caso	Primeira Iteração											
	Função-objetivo			Tensão Complexa			Potência Ativa			Potência Reativa		
	$J_r(\hat{x})$	$J_{Tr,fP}(\hat{x})$	$J(\hat{x})$	Média	Desvios	M_V	Média	Desvios	$M_{t,i}$	Média	Desvios	$M_{u,i}$
A1	2,084	14,465	16,350	0,0006	0,0003	0,0035	0,0050	0,0053	0,0277	0,0008	0,0008	0,0045
A2	3,511	14,803	18,314	0,0437	0,1003	0,5379	0,0022	0,0022	0,0120	0,0005	0,0008	0,0035
B	3,267	$1,13 \cdot 10^{-3}$	3,268	0,0007	0,0004	0,0041	0,0010	0,0011	0,0058	0,0005	0,0005	0,0027
C	3,854	15,244	19,098	0,0012	0,0005	0,0065	0,0056	0,0049	0,0284	0,0010	0,0007	0,0048
D	7,310	33,256	40,565	0,1182	0,1356	0,8891	0,0072	0,0067	0,0375	0,0028	0,0025	0,0141
E	7,449	$1,94 \cdot 10^{-3}$	7,451	0,0011	0,0007	0,0064	0,0012	0,0012	0,0065	0,0007	0,0006	0,0036
							Segunda Iteração					
A1	1,643	$7,72 \cdot 10^{-4}$	1,644	0,0006	0,0003	0,0032	0,0019	0,0019	0,0101	0,0007	0,0008	0,0041
A2	3,277	$9,69 \cdot 10^{-4}$	3,278	0,0008	0,0004	0,0047	0,0007	0,0007	0,0036	0,0006	0,0007	0,0036
B	3,267	$7,80 \cdot 10^{-4}$	3,268	0,0007	0,0004	0,0039	0,0010	0,0011	0,0058	0,0005	0,0005	0,0027
C	3,267	$5,94 \cdot 10^{-4}$	3,268	0,0010	0,0005	0,0056	0,0008	0,0006	0,0040	0,0009	0,0007	0,0043
D	5,918	$6,78 \cdot 10^{-4}$	5,919	0,0003	0,0002	0,0019	0,0010	0,0010	0,0054	0,0014	0,0010	0,0067
E	Converge em uma iteração											

Tabela 5.29 – Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,020$

Caso	Algoritmo - laço interno		
	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A1	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
A2	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
B	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
C	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
D	2(4-3)	2(4-8)	2(10-8)
E	1(3)	1(8)	1(8)

5.3.8 Análise de Sensibilidade da EIET com Respeito a k_p

Com a finalidade de analisar os efeitos de alterações na variância das informações *a priori* sobre o desempenho da EIET, os casos apresentados para o sistema-teste IEEE 14 barras voltam a ser simulados com diferentes valores do parâmetro de calibração k_p . Tal constante possui a função de estabelecer a importância relativa das informações *a priori* de topologia perante as medidas analógicas no processo de estimação (*ver Subseção 4.2.1*).

As Tabelas 5.30, 5.31, 5.32 e 5.33, e a apresentada anteriormente (Tabela 5.29), mostram o custo computacional do processo em termos do número de iterações dos laços interno e externo do algoritmo proposto. Verifica-se que com $k_p = 0,001$ o algoritmo apresenta um desempenho que se aproxima do obtido com $k_p = 0,020$, mostrado na Tabela 5.29. Para valores maiores de k_p , como 0,10, 0,40 e 0,70, o custo computacional aumenta gradativamente, embora deva-se mencionar que em todos os casos convergidos o algoritmo tenha fornecido a solução correta.

Os resultados desta análise também são um indicativo de que o método proposto não é excessivamente sensível ao parâmetro k_p , no sentido de que pequenas variações percentuais neste parâmetro tendem a provocar variações no número de iterações, porém sem afetar a capacidade do algoritmo em convergir para os resultados corretos.

Tabela 5.30 – Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,001$

Caso	Algoritmo - laço interno		
	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A1	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
A2	2(3-3)	2(7-8)	2(7-8)
B	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
C	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
D	2(4-3)	2(4-8)	2(39-8)
E	1(3)	1(8)	1(8)

Tabela 5.31 – Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,10$

Caso	Algoritmo - laço interno		
	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A1	2(3-3)	2(8-7)	2(8-7)
A2	2(3-3)	2(7-8)	2(7-8)
B	2(3-3)	2(12-8)	2(12-8)
C	3(3-3-3)	3(8-7-8)	3(8-7-8)
D	3(7-3-3)	3(7-8-8)	3(27-8-8)
E	1(3)	1(8)	1(8)

Tabela 5.32 – Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,40$

Caso	Algoritmo - laço interno		
	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A1	3(3-4-3)	3(12-4-12)	3(12-4-12)
A2	2(3-3)	2(7-12)	2(7-12)
B	2(3-3)	2(12-12)	2(12-12)
C	3(3-4-3)	3(12-4-12)	3(12-4-12)
D	3(14-4-3)	3(14-4-12)	3(18-4-12)
E	1(3)	1(12)	1(12)

Tabela 5.33 – Iterações da EIET para o Sistema IEEE 14 barras, com $k_p = 0,70$

Caso	Algoritmo - laço interno		
	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A1	3(3-4-3)	3(12-12-12)	3(12-12-12)
A2	3(3-4-3)	3(9-13-12)	3(9-13-12)
B	2(3-3)	2(17-12)	2(17-12)
C	3(3-4-3)	3(12-12-12)	3(12-12-12)
D	3(5-4-3)	3(5-12-4)	Não Converge
E	1(3)	1(12)	1(12)

5.4 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 30 Barras

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema-teste IEEE 30 barras, mostrado na Figura 5.3, na qual também são indicadas as medidas do modelo barra-ramo. Para este sistema, são selecionadas aleatoriamente duas áreas da rede com subestações interconectadas, porém, sem ligação direta entre as áreas. O objetivo é simular a presença de erros de topologia nas regiões de forma simultânea. A primeira área é composta pelas subestações 12, 16 e 17, e a segunda com as subestações 5 e 7.

As subestações 12, 16, 17, 5 e 7 são detalhadas na Figura 5.4. No Apêndice B são mostrados os parâmetros do sistema e o detalhamento do plano de medição utilizado.

Com a representação no nível de seção de barras das subestações selecionadas, o sistema passa a conter 49 nós elétricos e 66 ramos, dos quais 25 são chaveáveis. A quantidade de variáveis de estado calculadas para o modelo expandido é de 148. A Figura 5.4 também apresenta a indicação dos *status* corretos dos disjuntores, assim como as medições presentes nas subestações. A Tabela 5.34 realiza uma síntese dos casos simulados, mostrando como os disjuntores são inicializados e também seus *status* corretos no sistema.

Em relação aos modelos físicos das subestações selecionadas, três delas (7, 16 e 17) são formadas por arranjos com disjuntores duplos, as quais possuem o papel de barras de carga. Cada uma possui 4 disjuntores e 4 nós elétricos. Ressalta-se que a subestação 7 é seccionada em duas barras, de modo que a carga no nó 7 é alimentada com potência proveniente da barra 6, e a carga do nó 49, alimentada pela potência transmitida pela barra 5 (*ver Figura 5.4*).

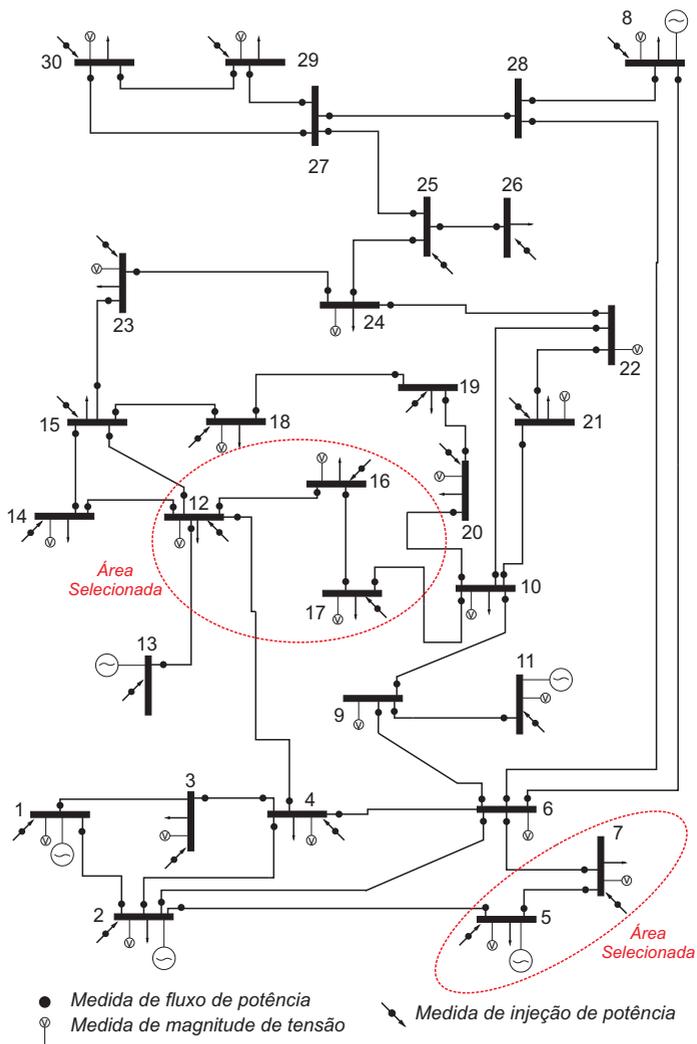


Figura 5.3 – Sistema IEEE 30 barras com plano de medição

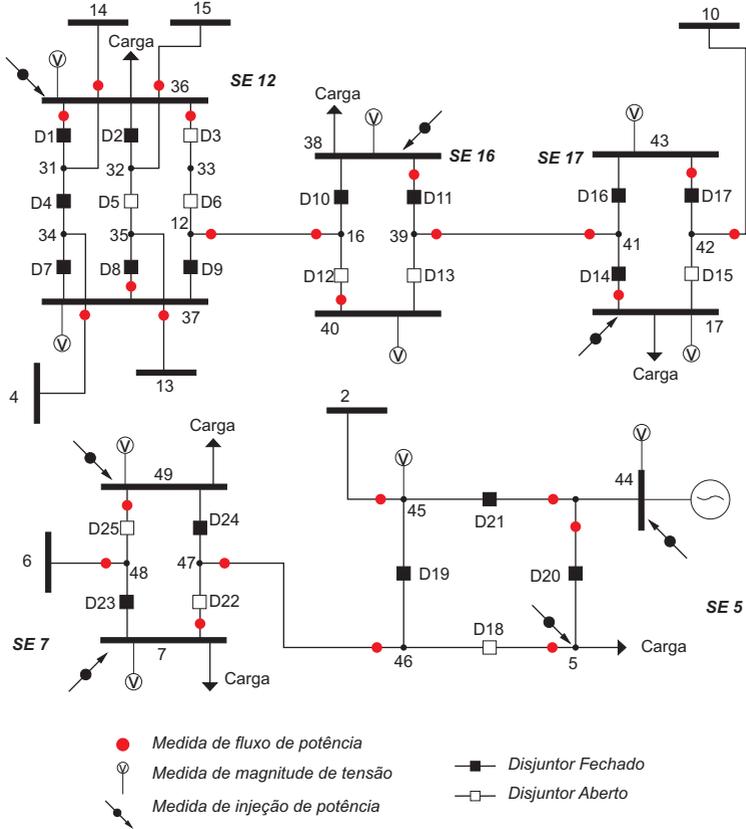


Figura 5.4 – Detalhamento das subestações 12, 16, 17, 5 e 7 no nível de seção de barras

A subestação 12 possui três arranjos do tipo disjuntor e meio. Sua função no sistema é de barra de carga e também de realizar conexão com outras cinco barras no sistema, como a barra 16, modelada no nível de subestação. No total, a subestação contém 8 nós elétricos e 9 disjuntores.

A subestação 5, cujo arranjo é em anel, é formada por quatro disjuntores e quatro nós elétricos, sendo que em um está acoplado um compensador síncrono e a outro a uma carga. Os outros nós ligam a subestação a barras adjacentes, inclusive à subestação 7.

Tabela 5.34 – Síntese dos Casos Simulados - IEEE 30 Barras

Caso	Simulação	Disj.	Correto	Simulado
A	Exclusão Múltipla	<i>D4</i>	Fechado	Aberto
		<i>D9</i>	Fechado	Aberto
		<i>D11</i>	Fechado	Aberto
		<i>D20</i>	Fechado	Aberto
		<i>D23</i>	Fechado	Aberto
B	Inclusão de Ramo	<i>D5</i>	Aberto	Fechado
		<i>D15</i>	Aberto	Fechado
		<i>D22</i>	Aberto	Fechado
C	Partida Plana	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.4</i>	Todos Abertos
D	Topologia Correta	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.4</i>	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.4</i>

5.4.1 Sistema de 30 Barras - Caso A

No Caso A é simulada uma exclusão múltipla de ramos chaveáveis, conforme apresentado na Tabela 5.34. Esta quantidade de erros traz ao sistema diversas consequências: (a) ao presumir o disjuntor *D4* como aberto, têm-se a partição da subestação 12 em duas barras (*bus split error*); (b) em relação ao erro no disjuntor *D9*, ocorre a desconexão entre as barras 12 e 16; (c) o erro no *status* do disjuntor *D11* leva à retirada de operação a linha de transmissão entre os nós 39 (barra 6) e 41 (barra 7); (d) caso semelhante ocorre ao presumir erroneamente o *status* do disjuntor *D23*, o qual tira de operação a linha entre as barras 6 e 7 (nó 48); (e) o erro no disjuntor *D20* retira o fornecimento de potência à carga na barra 5.

Os resultados do processamento do laço externo do Caso A são apresentados na Tabela 5.35. O algoritmo leva duas iterações do laço externo para estimar e validar a topologia correta sendo que, em cada uma delas, as rotações rápidas de Givens convergem em 3 iterações. O tempo total de processamento deste caso foi de 2,7512 segundos.

A validação da topologia em todo o processo de estimação é apresentada na Tabela 5.36, em que são mostrados os *status* presumidos no início do processo e os estimados de cada iteração do método de EIET. Deste modo, verifica-se que todos os disjuntores erroneamente inicializados como abertos são estimados como fechados ao final da primeira iteração. Esta informação de topologia é considerada para inicializar a próxima iteração, com o intuito de ser validada. Finalmente, os *status* estimados ao final da segunda iteração são iguais aos presumidos no início da mesma, ou seja, nenhuma alteração de *status* é introduzida, e portanto, o algoritmo é encerrado.

A Tabela 5.37 realiza a comparação dos resultados obtidos pelos algoritmos propostos, obtendo valores semelhantes, principalmente na última iteração.

Tabela 5.35 – Função-Objetivo - Exclusão Múltipla - *Caso A*

Função-Objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	75,092	6,367
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	7,178	6,357
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	67,915	$1,03 \cdot 10^{-2}$

Tabela 5.36 – Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - *Caso A*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	F	F	F	F
3	A	A	A	A
4	A	F	F	F
5	A	A	A	A
6	A	A	A	A
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	A	F	F	F
10	F	F	F	F
11	A	F	F	F
12	A	A	A	A
13	A	A	A	A

Continua na próxima página

Tabela 5.36 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A
16	F	F	F	F
17	F	F	F	F
18	A	A	A	A
19	F	F	F	F
20	A	F	F	F
21	F	F	F	F
22	A	A	A	A
23	A	F	F	F
24	F	F	F	F
25	A	A	A	A

Tabela 5.37 – Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - Caso A

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{x})$	75,092	79,164	79,164
$J_r(\hat{x})$	7,178	7,189	7,189
$J_{InfP}(\hat{x})$	67,915	71,975	71,975
Iteração 2			
$J(\hat{x})$	6,3674	6,3706	6,3706
$J_r(\hat{x})$	6,3574	6,3578	6,3578
$J_{InfP}(\hat{x})$	$1,03 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$	$1,28 \cdot 10^{-2}$

5.4.2 Sistema de 30 Barras - Caso B

A Tabela 5.38 apresenta os resultados de simulação para o Caso B, que contempla a inicialização do algoritmo a partir de uma topologia inicial contaminada por erro de inclusão de ramos. O tempo demandado foi de 3,3413 segundos e a convergência do laço externo ocorreu em duas iterações. Nota-se também que a mudança do *status* dos dispositivos chaveáveis ocorrem exatamente para aqueles inicializados erroneamente, que são *D5*, *D15* e *D22*. A Tabela 5.39 apresenta os valores da função-objetivo no processo iterativo. A Tabela 5.40 mostra os resultados obtidos pelos três algoritmos, cujos valores são próximos em ambas iterações do estimador.

Tabela 5.38 – Validação da Topologia - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	F	F	F	F
2	F	F	F	F
3	A	A	A	A
4	A	F	F	F
5	A	A	A	A
6	A	A	A	A
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	A	F	F	F
10	F	F	F	F
11	A	F	F	F
12	A	A	A	A
13	A	A	A	A
14	F	F	F	F
15	A	A	A	A
16	F	F	F	F
17	F	F	F	F
18	A	A	A	A
19	F	F	F	F
20	A	F	F	F
21	F	F	F	F
22	A	A	A	A
23	A	F	F	F
24	F	F	F	F
25	A	A	A	A

Tabela 5.39 – Função-Objetivo - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Função-Objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	6,995	5,366
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	5,361	5,361
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	1,635	$5,86.10^{-3}$

Tabela 5.40 – Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	6,995	6,996	6,996
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	5,361	5,361	5,361
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	1,6346	1,6353	1,6353
Iteração 2			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	5,3663	5,3682	5,3682
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	5,3607	5,3603	5,3603
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$5,86 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$	$7,96 \cdot 10^{-3}$

5.4.3 Sistema de 30 Barras - Caso C

O Caso C simulado neste sistema inicializa com a partida plana dos *status* dos disjuntores, isto é, todos são presumidos como abertos. O processo leva duas iterações do laço externo do algoritmo EIET para convergir em um tempo de 4,2194 segundos. Os valores da função-objetivo e dos termos que a compõem em cada iteração são mostrados na Tabela 5.41. A correção e validação da topologia podem ser observadas na Tabela 5.42. Nota-se que, apesar da quantidade de disjuntores presentes modelados neste sistema-teste, o método proposto é capaz de corrigir os *status* na primeira iteração e confirmá-los na seguinte. Finalmente, a Tabela 5.43 contém os valores da função-objetivo simulados nos três algoritmos. Percebe-se o bom desempenho dos mesmos comparando os valores ao final de cada uma das iterações.

Tabela 5.41 – Função-Objetivo - Partida Plana - *Caso C*

Função-Objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	188,318	6,351
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	9,738	6,348
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	178,580	$3,23 \cdot 10^{-3}$

Tabela 5.42 – Validação da Topologia - Partida Plana - *Caso C*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	A	F	F	F
2	A	F	F	F

Continua na próxima página

Tabela 5.42 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
3	A	A	A	A
4	A	F	F	F
5	A	A	A	A
6	A	A	A	A
7	A	F	F	F
8	A	F	F	F
9	A	F	F	F
10	A	F	F	F
11	A	F	F	F
12	A	A	A	A
13	A	A	A	A
14	A	F	F	F
15	A	A	A	A
16	A	F	F	F
17	A	F	F	F
18	A	A	A	A
19	A	F	F	F
20	A	F	F	F
21	A	F	F	F
22	A	A	A	A
23	A	F	F	F
24	A	F	F	F
25	A	A	A	A

Tabela 5.43 – Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - *Caso C*

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{x})$	188,318	188,318	188,318
$J_r(\hat{x})$	9,738	9,738	9,738
$J_{InfP}(\hat{x})$	178,580	178,580	178,580
Iteração 2			
$J(\hat{x})$	6,3537	6,3541	6,3541
$J_r(\hat{x})$	6,3477	6,3467	6,3467
$J_{InfP}(\hat{x})$	$6,23 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-3}$	$7,42 \cdot 10^{-3}$

5.4.4 Sistema de 30 Barras - Caso D

O Caso D, referente à simulação com os *status* dos disjuntores presumidos corretamente, leva somente uma iteração do laço externo

para convergir, pois a topologia estimada é igual à presumida. O processo levou 1,4673 segundos. A Tabela 5.44 apresenta os resultados obtidos pelos três algoritmos.

Tabela 5.44 – Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - Caso D

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	8,1809	8,1846	8,1846
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	8,1656	8,1661	8,1661
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,56 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$

5.4.5 Consolidação dos Resultados para o Sistema de 30 Barras

A Tabela 5.45 apresenta os resultados numéricos de todos os casos simulados pelo algoritmo *GMA.INT*. Pode-se nela observar o comportamento dos valores dos termos da função-objetivo em cada uma das iterações do laço externo, assim como os resultados dos índices de desempenho (média, desvio-padrão e métrica) para os erros das tensões complexas nas barras e dos fluxos de potência ativa e reativa nos disjuntores. Em relação aos valores e $J(\hat{\mathbf{x}})$, percebe-se a redução numérica no final do processo de estimação dos casos simulados. A redução mais acentuada ocorre no caso C, quando o valor passa de $J(\hat{\mathbf{x}}) = 188,318$ para $J(\hat{\mathbf{x}}) = 6,354$. As maiores contribuições dos valores de $J(\hat{\mathbf{x}})$ na primeira iteração estão associadas ao termo das informações *a priori* $J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$, devido ao processamento de estimação de estados ocorrer com erros de topologia presumida. Em relação à qualidade dos estados estimados, observa-se que todos os índices de desempenho ao final do processo apresentam valores inferiores a 2×10^{-2} p.u., validando o bom desempenho do estimador integrado.

A Tabela 5.46 apresenta uma síntese do desempenho baseada no número de iterações do laço externo e dos três algoritmos do laço interno (*GMA.INT*, *GMA.EXT*) e *Eq.Normal*. Para cada caso, os resultados são apresentados da seguinte forma: os dígitos entre parênteses representam o número de iterações para a convergência do laço interno a cada iteração do laço externo. O número de iterações do laço externo é indicado fora dos parênteses.

Tabela 5.45 – Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 30 barras

Caso	Função-Objetivo			Primeira Iteração				Segunda Iteração				
	$J_r(\mathcal{K})$	$J_{inf}(\mathcal{K})$	$J(\mathcal{K})$	Média	Desvios	M_V	Média	Desvios	$M_{t,i}$	Média	Desvios	$M_{t,i}$
A	7,178	67,915	75,092	0,0271	0,0790	0,5793	0,0029	0,0039	0,0240	0,0012	0,0010	0,0077
B	5,361	1,635	6,995	0,0037	0,0184	0,1300	0,0007	0,0015	0,0083	0,0006	0,0005	0,0039
C	9,738	178,580	188,318	0,1762	0,4085	3,0869	0,0047	0,0043	0,0316	0,0041	0,0053	0,0331
D	8,166	1,56,10 ⁻²	8,181	0,0012	0,0008	0,0098	0,0015	0,0018	0,0118	0,0017	0,0020	0,0132
Segunda Iteração												
A	6,357	1,03,10 ⁻²	6,367	0,0010	0,0007	0,0090	0,0015	0,0015	0,0104	0,0010	0,0010	0,0071
B	5,361	5,86,10 ⁻³	5,366	0,0010	0,0011	0,0102	0,0007	0,0015	0,0083	0,0006	0,0005	0,0039
C	6,348	6,23,10 ⁻³	6,354	0,0014	0,0008	0,0114	0,0011	0,0010	0,0072	0,0009	0,0010	0,0067
D	Convergiu na Primeira Iteração											

Tabela 5.46 – Iterações da ELET para o Sistema IEEE 30 barras, com $k_p = 0,020$

<i>Algoritmo - laço interno</i>	
Caso	<i>GMA.INT GMA.EXT Eq. Normal</i>
A	2(3-3) 2(6-7)
B	2(4-3) 2(7-7)
C	2(6-3) 2(6-7) 2(22-7)
D	1(3) 1(7)

5.5 Resultados para o Sistema-Teste IEEE 57 Barras

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos para o sistema-teste IEEE 57 barras, mostrado na Figura 5.5, na qual também são indicadas as medidas analógicas do modelo barra-ramo. Neste estudo, é selecionada a área, indicada na Figura 5.5, contendo cinco subestações que supostamente apresentam erros de topologia. Assim sendo, as subestações 12, 14, 15, 16 e 17 são representadas no nível de seção de barra e incluídas ao modelo. No Apêndice C são mostrados os parâmetros do sistema e o detalhamento do plano de medição utilizado.

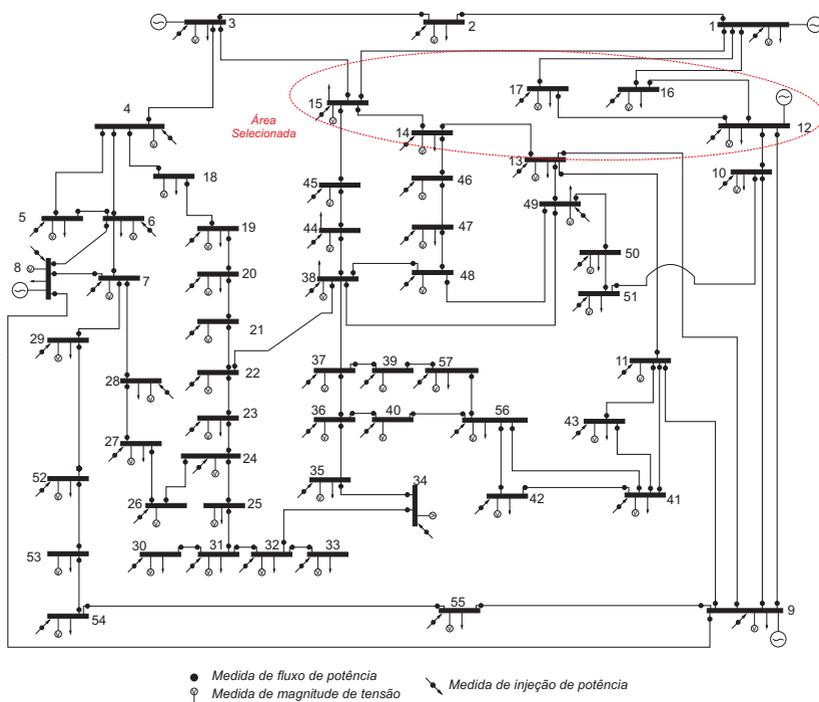


Figura 5.5 – Sistema IEEE 57 barras com plano de medição

Dentre as simulações realizadas neste trabalho, este sistema é o que possui maior porte. Devido ao detalhamento das subestações selecionadas, o sistema passa a conter 85 nós elétricos e 121 ramos, dos quais 43 são chaveáveis, totalizando em 256 variáveis de estado

(ângulos, magnitudes de tensão e fluxos de potência ativa e reativa). Na Figura 5.6 são apresentados os modelos das subestações assim como os dispositivos chaveáveis, interconexões e as medições realizadas nos nós e ramos.

Os arranjos das subestações detalhadas no nível de seção de barra possuem características semelhantes às dos outros sistemas-teste. A subestação 12 possui 16 disjuntores dispostos em três arranjos do tipo disjuntor e meio, três de disjuntor duplo e um ramo simples, configurados de tal modo que, na condição de operação considerada, a subestação encontra-se particionada em duas barras, isto é, uma parte dos nós terá uma tensão complexa diferente da parte restante. A subestação apresenta três nós com geração acoplada, dois pontos de carga e nós que realizam a interligação com outras 5 barras do sistemas (9, 10, 13, 16 e 17).

A subestação 14 apresenta o modelo de arranjo em anel, com quatro disjuntores e quatro nós elétricos. A mesma possui carga acoplada e conexão com outras três barras do sistema. A subestação 15 é formada por seis arranjos de disjuntor duplo e um simples, e possui a função de barra de carga, assim como a subestação 16, com dois arranjos do tipo disjuntor duplo. Por fim, a subestação 17 apresenta dois arranjos do tipo disjuntor e meio, com distribuição de carga e interligações a outras duas subestações.

A Tabela 5.47 apresenta uma síntese dos casos simulados, mostrando como os *status* dos disjuntores são presumidos e também seus *status* corretos.

Tabela 5.47 – Síntese dos Casos Simulados - IEEE 57 Barras

Caso	Simulação	Disj.	Correto	Simulado
A	Exclusão Múltipla	<i>D6</i> <i>D28</i>	Fechado Fechado	Aberto Aberto
B	Inclusão de Ramo	<i>D11</i> <i>D30</i>	Aberto Aberto	Fechado Fechado
C	Partida Plana	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.6</i>	Todos Abertos
D	Topologia Correta	Todos	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.6</i>	<i>ver</i> <i>Figura</i> <i>5.6</i>

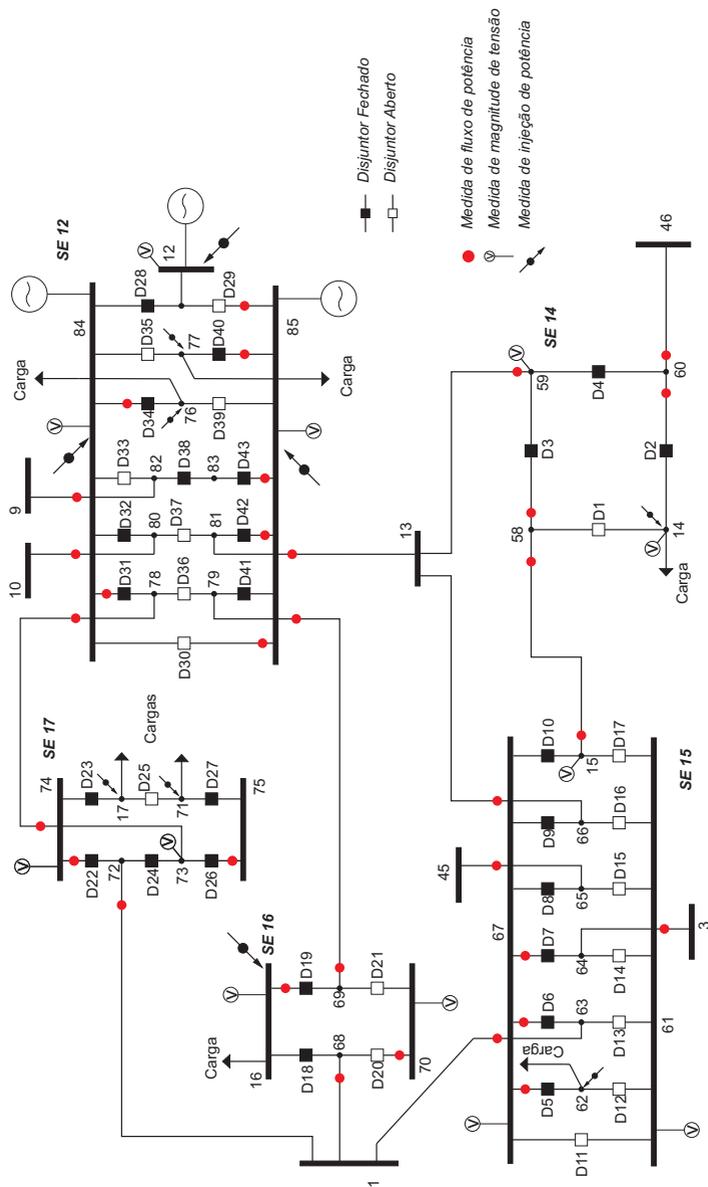


Figura 5.6 – Detalhamento das subestações 12,14,15,16 e 17 no nível de seção de barras

5.5.1 Sistema de 57 Barras - Caso A

O primeiro caso, Caso A, consiste em simular os erros de exclusão de uma linha de transmissão e um gerador da rede. O primeiro evento ocorre presumindo que o disjuntor $D6$ esteja aberto, retirando de operação a linha entre as barras 1 e 15 (nó 63); e o segundo evento, com o *status* do disjuntor $D28$ também presumido como aberto, desconecta um dos geradores da barra 12 (ver Figura 5.6).

Os resultados do laço externo referentes ao Caso A são apresentados na Tabela 5.48. O laço externo do algoritmo do método de EIET leva duas iterações para estimar e validar a topologia correta sendo que, em cada uma delas, as rotações rápidas de Givens convergem em 3 iterações. Na Tabela 5.49 são mostrados como os *status* dos disjuntores $D6$ e $D28$ são corrigidos durante o processo. O tempo total de processamento deste caso foi de 8,2546 segundos.

A Tabela 5.50 mostra os resultados obtidos pelos demais algoritmos. Nota-se que os resultados em ambas as iterações do laço externo do método de EIET são iguais uns aos outros na precisão dos valores apresentados, o que mostra a consistência dos algoritmos propostos na aplicação a um sistema deste porte.

Tabela 5.48 – Função Objetivo - Exclusão Múltipla - *Caso A*

Função Objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	137,445	10,664
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	12,534	10,639
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	124,911	$2,48 \cdot 10^{-2}$

Tabela 5.49 – Validação da Topologia - Exclusão Múltipla - *Caso A*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	A	A	A	A
2	F	F	F	F
3	F	F	F	F
4	F	F	F	F
5	F	F	F	F
6	A	F	F	F
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	F	F	F	F
10	F	F	F	F

Continua na próxima página

Tabela 5.49 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
11	A	A	A	A
12	A	A	A	A
13	A	A	A	A
14	A	A	A	A
15	A	A	A	A
16	A	A	A	A
17	A	A	A	A
18	F	F	F	F
19	A	A	A	A
20	F	F	F	F
21	F	F	F	F
22	F	F	F	F
23	F	F	F	F
24	F	F	F	F
25	A	A	A	A
26	F	F	F	F
27	F	F	F	F
28	A	F	F	F
29	A	A	A	A
30	A	A	A	A
31	F	F	F	F
32	F	F	F	F
33	A	A	A	A
34	F	F	F	F
35	A	A	A	A
36	A	A	A	A
37	A	A	A	A
38	F	F	F	F
39	A	A	A	A
40	F	F	F	F
41	F	F	F	F
42	F	F	F	F
43	F	F	F	F

Tabela 5.50 – Comparação dos Algoritmos - Exclusão Múltipla - *Caso A*

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	137,445	137,445	137,445
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	12,534	12,534	12,534
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	124,911	124,911	124,911
Iteração 2			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	10,6638	10,6638	10,6638
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	10,6389	10,6389	10,6389
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$2,48.10^{-2}$	$2,48.10^{-2}$	$2,48.10^{-2}$

5.5.2 Sistema de 57 Barras - Caso B

O Caso B se refere à simulação de um erro de topologia do tipo inclusão de ramos, como descrito na Tabela 5.47. A Tabela 5.51 apresenta os resultados obtidos com o método *GMA.INT*. O tempo demandado foi de 10,6728 segundos e ocorreu em duas iterações. As mudanças do *status* dos dispositivos chaveáveis ocorrem exatamente nos disjuntores inicializados erroneamente, que são *D11* e *D30*. A Tabela 5.52 apresenta os valores da função-objetivo no processo iterativo. Por fim, a Tabela 5.53 mostra os resultados obtidos pelos demais algoritmos, revelando a proximidade dos valores da função-objetivo nas duas iterações do estimador.

Tabela 5.51 – Validação da Topologia - Inclusão de Ramos - *Caso B*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
1	A	A	A	A
2	F	F	F	F
3	F	F	F	F
4	F	F	F	F
5	F	F	F	F
6	F	F	F	F
7	F	F	F	F
8	F	F	F	F
9	F	F	F	F
10	F	F	F	F
11	F	A	A	A
12	A	A	A	A
13	A	A	A	A
14	A	A	A	A
15	A	A	A	A

Continua na próxima página

Tabela 5.51 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2	
	Presumido	Estimado	Presumido	Estimado
16	A	A	A	A
17	A	A	A	A
18	F	F	F	F
19	A	A	A	A
20	F	F	F	F
21	F	F	F	F
22	F	F	F	F
23	F	F	F	F
24	F	F	F	F
25	A	A	A	A
26	F	F	F	F
27	F	F	F	F
28	F	F	F	F
29	A	A	A	A
30	F	A	A	A
31	F	F	F	F
32	F	F	F	F
33	A	A	A	A
34	F	F	F	F
35	A	A	A	A
36	A	A	A	A
37	A	A	A	A
38	F	F	F	F
39	A	A	A	A
40	F	F	F	F
41	F	F	F	F
42	F	F	F	F
43	F	F	F	F

Tabela 5.52 – Função-Objetivo - Inclusão de Ramos - Caso B

Função-Objetivo	Estimação Inicial	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	9,496	9,489
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	9,452	9,452
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-2}$

Tabela 5.53 – Comparação dos Algoritmos - Inclusão de Ramo - *Caso B*

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{x})$	9,496	9,505	9,493
$J_r(\hat{x})$	9,452	9,452	9,452
$J_{InfP}(\hat{x})$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$5,30 \cdot 10^{-2}$	$4,17 \cdot 10^{-2}$
Iteração 2			
$J(\hat{x})$	9,4885	9,4886	9,4886
$J_r(\hat{x})$	9,4519	9,4519	9,4519
$J_{InfP}(\hat{x})$	$3,67 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$	$3,68 \cdot 10^{-2}$

5.5.3 Sistema de 57 Barras - Caso C

Os resultados da aplicação do método de EIET no Caso C, com partida plana dos *status* dos disjuntores, são mostrados na Tabela 5.54, em que o prefixo “Pres.” significa *status* presumido e “Est.” expressa *status* estimado. Neste caso, a convergência do laço externo do algoritmo EIET é alcançada em três iterações. Ao finalizar a primeira iteração, somente um *status* de um disjuntor (*D11*) é estimado erroneamente em relação à atual condição de operação do sistema (*ver Figura 5.6*). Entretanto, isto é corrigido ao final da segunda iteração e confirmado na terceira. O tempo total gasto para o processamento foi de 20,8923 segundos. Os valores da função-objetivo para este caso são apresentado na Tabela 5.55, e pode-se perceber que os valores resultantes no final do processo são menores em relação aos da primeira iteração. A Tabela 5.56 apresenta os valores da função-objetivo fornecidos pelos algoritmos *GMA.INT* e *Eq. Normal* para a iteração inicial e final.

Tabela 5.54 – Validação da Topologia - Partida Plana - *Caso C*

Disj.	Iteração 1		Iteração 2		Iteração 3	
	Pres.	Est.	Pres.	Est.	Pres.	Est.
1	A	A	A	A	A	A
2	A	F	F	F	F	F
3	A	F	F	F	F	F
4	A	F	F	F	F	F
5	A	F	F	F	F	F
6	A	F	F	F	F	F
7	A	F	F	F	F	F
8	A	F	F	F	F	F
9	A	F	F	F	F	F

Continua na próxima página

Tabela 5.54 – Continuação da página anterior

Disj.	Iteração 1		Iteração 2		Iteração 3	
	Pres.	Est.	Pres.	Est.	Pres.	Est.
10	A	F	F	F	F	F
11	A	F	F	A	A	A
12	A	A	A	A	A	A
13	A	A	A	A	A	A
14	A	A	A	A	A	A
15	A	A	A	A	A	A
16	A	A	A	A	A	A
17	A	A	A	A	A	A
18	A	F	F	F	F	F
19	A	A	A	A	A	A
20	A	F	F	F	F	F
21	A	F	F	F	F	F
22	A	F	F	F	F	F
23	A	F	F	F	F	F
24	A	F	F	F	F	F
25	A	A	A	A	A	A
26	A	F	F	F	F	F
27	A	F	F	F	F	F
28	A	F	F	F	F	F
29	A	A	A	A	A	A
30	A	A	A	A	A	A
31	A	F	F	F	F	F
32	A	F	F	F	F	F
33	A	A	A	A	A	A
34	A	F	F	F	F	F
35	A	A	A	A	A	A
36	A	A	A	A	A	A
37	A	A	A	A	A	A
38	A	F	F	F	F	F
39	A	A	A	A	A	A
40	A	F	F	F	F	F
41	A	F	F	F	F	F
42	A	F	F	F	F	F
43	A	F	F	F	F	F

Tabela 5.55 – Função-Objetivo - Partida Plana - *Caso C*

Função-Objetivo	Estimação 1	Estimação 2	Estimação Final
$J(\hat{\mathbf{x}})$	613,121	7,062	7,055
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	17,039	7,020	7,020
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	596,082	$4,22 \cdot 10^{-2}$	$3,51 \cdot 10^{-2}$

Tabela 5.56 – Comparação dos Algoritmos - Partida Plana - *Caso C*

Iteração Inicial			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	613,121	613,121	613,121
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	17,039	17,039	17,039
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	596,082	596,082	596,082
Iteração Final			
$J(\hat{\mathbf{x}})$	7,0549	7,0550	7,0550
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	7,0199	7,0198	7,0198
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$3,51 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-2}$

5.5.4 Sistema de 57 Barras - Caso D

Uma simulação adicional, denotada como Caso D, no qual a topologia é iniciada com os *status* corretos dos dispositivos chaveáveis, converge em apenas uma iteração. O tempo de processamento foi igual a 6,1832 segundos, sendo inferior aos dos demais casos processados anteriormente para este sistema-teste. A Tabela 5.57 apresenta os resultados obtidos pelos demais algoritmos.

Tabela 5.57 – Comparação dos Algoritmos - Topologia Correta - *Caso D*

Iteração 1			
<i>Função-Objetivo</i>	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
$J(\hat{\mathbf{x}})$	10,519	10,519	10,519
$J_r(\hat{\mathbf{x}})$	10,501	10,501	10,501
$J_{InfP}(\hat{\mathbf{x}})$	$1,83 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$

5.5.5 Consolidação dos Resultados para o Sistema de 57 Barras

A Tabela 5.58 apresenta os resultados numéricos de todos os casos simulados pelo algoritmo *GMA.INT*, e verifica-se o comportamento dos valores nos termos da função-objetivo e na qualidade da estimação dos estados em cada iteração do laço externo, isto é, com e sem presença de erros de topologia presumida.

A Tabela 5.59 apresenta uma síntese do desempenho baseada no número de iterações do laço externo e dos três algoritmos do laço

interno (*GMA.INT*, *GMA.EXT*) e *Eq.Normal*. Para cada caso, os resultados são apresentados da seguinte forma: os dígitos entre parênteses representam o número de iterações para a convergência do laço interno a cada iteração do laço externo. O número de iterações do laço externo é indicado fora dos parênteses.

Tabela 5.58 – Resultados numéricos dos casos - Sistema IEEE 57 barras

Caso	Função-Objetivo			Tensão Complexa			Potência Ativa			Potência Reativa		
	$J_f(\hat{x})$	$J_{In,fp}(\hat{x})$	$J(\hat{x})$	Média	Desvios	M/V	Média	Desvios	M/t_{ij}	Média	Desvios	M/u_{ij}
A	12,534	124,911	137,445	0,0028	0,0187	0,1732	0,0036	0,0035	0,0329	0,0018	0,0021	0,0180
B	9,452	4,46.10 ⁻²	9,496	0,0023	0,0125	0,1166	0,0033	0,0040	0,0338	0,0007	0,0013	0,0098
C	17,039	596,082	613,121	0,0340	0,0601	0,6336	0,0290	0,0541	0,3989	0,0072	0,0152	0,1090
D	10,501	1,83.10 ⁻²	10,5189	0,0006	0,0003	0,0063	0,0021	0,0025	0,0211	0,0005	0,0007	0,0057
Iteração Final												
A	10,639	2,48.10 ⁻²	10,664	0,0007	0,0009	0,0106	0,0024	0,0017	0,0193	0,0013	0,0021	0,0160
B	9,452	3,67.10 ⁻²	9,489	0,0006	0,0003	0,0064	0,0034	0,0034	0,0312	0,0007	0,0013	0,0097
C	7,020	3,51.10 ⁻²	7,055	0,0008	0,0004	0,0081	0,0032	0,0032	0,0292	0,0007	0,0010	0,0080
D	Convergiu na Primeira Iteração											

Tabela 5.59 – Iterações da ELET para o Sistema IEEE 57 barras, com $k_p = 0,020$

<i>Algoritmo - laço interno</i>			
Caso	<i>GMA.INT</i>	<i>GMA.EXT</i>	<i>Eq. Normal</i>
A	2(3-3)	2(8-8)	2(8-8)
B	2(4-3)	2(8-8)	2(8-8)
C	3(6-3-3)	2(6-8-8)	2(16-8-8)
D	1(3)	1(7)	1(7)

5.6 Processamento de Erros Grosseiros na EIET

Esta seção dedica-se à análise dos resultados referentes às simulações do sistema-teste IEEE 14 barras, visualizado na Figura 5.1, com a presença de erros grosseiros nas medidas analógicas disponíveis ao Estimador Integrado de Estados e Topologia (EIET). Para isso, três tipos de casos, previamente estipulados na Seção 5.2, são simulados conforme sumarizado na Tabela 5.60, a qual contém as medidas errôneas e os respectivos valores reais e simulados.

Tabela 5.60 – Síntese dos Casos Simulados para Erros Grosseiros

Caso	Simulação	Medida	Valor Real	Valor Simulado
F1	Erro em uma Medida	t_{15-13}	+0,176	-0,067
F2		t_{15-16}	0,0	-0,278
G1	Erros Grosseiros Múltiplos	V_{11}	+0,992	1,034
		t_{17-11}	+0,058	-0,166
G2	Erros Grosseiros Múltiplos Interativos	t_{13-15}	-0,174	-0,470
		t_{25-13}	-0,174	+0,121
H	Erro Grosseiro e Erro de Topologia Presumida	P_{23}	-0,135	-0,413
		<i>status</i> dos disj.	<i>ver</i> Figura 5.2	Todos Abertos

Os resultados das simulações com o processamento de erros grosseiros na EIET são obtidos seguindo a estratégia abordada na Seção 4.6, a qual possui como base as rotações rápidas de Givens, e os testes de hipóteses $J(\hat{\mathbf{x}})$ e \hat{b} . Para todos os casos testados, o nível de significância (probabilidade de falso alarme) para o teste do qui-quadrado é 5%, o que indica um limiar para o sistema-teste em questão de $K = 129,92$. O limiar para a magnitude do erro estimada pelo teste- $\hat{\beta}$ em números de desvios-padrão é 4.

A inicialização dos testes segue o procedimento descrito na Seção 5.2. Como relatado no exemplo ilustrativo da Seção 4.7 do Capítulo 4, o teste de detecção de anomalia, para todos os casos, é inicializado na segunda iteração do algoritmo de G3M, presente no laço interno do algoritmo proposto de EIET.

A Tabela 5.61 apresenta os resultados da identificação de medidas espúrias após detecção pelo algoritmo *GMA.INT* para os casos da Tabela 5.60, sendo que cada um deles é discutido a seguir.

O Caso F retrata a simulação de erro grosseiro em uma única

medida do plano de medição, e é subdividido em dois testes, nos quais as medidas espúrias são fluxos de potência ativa, como segue: (F1) com simulação de uma medida errônea presente em uma linha de transmissão convencional do sistema, medida t_{15-13} ; e (F2) com simulação de uma medida errônea relacionada diretamente a um fluxo em um dispositivo seccionador, medida t_{15-16} , associada ao fluxo no disjuntor $D6$. Esta última é processada em uma área de baixa redundância das medidas analógicas, e tem o objetivo de investigar os efeitos dessa condição severa no desempenho do método proposto.

A estratégia descrita na Seção 4.6 apresenta um bom desempenho para o Caso F1, identificando a medida com erro grosseiro. Entretanto, o mesmo não ocorre para o Caso F2, devido à baixa redundância de medidas no local (o símbolo * na Tabela 5.61 refere-se ao plano de medição inicialmente considerado, apresentado no Apêndice A). Apesar disto, a detecção de presença de anomalia é bem sucedida, porém a medida P_{20} é identificada ao invés da medida portadora de erro grosseiro t_{15-16} . Realizando uma análise da observabilidade da região em questão e considerando o referido plano de medição (*ver Figura 5.2*), nota-se que as duas medidas compõem um par crítico. Desta maneira, o processo de identificação falha devido o fato de que erros grosseiros em membros de pares críticos não são identificáveis. Para quebrar tal criticidade, uma nova medida (fluxo de potência ativa t_{20-15}) relacionada ao disjuntor $D2$ é adicionada ao conjunto de medidas. Nestas novas condições, o erro grosseiro é identificado e removido corretamente (resultados referente ao caso F2**).

O Caso G também é dividido em dois: (G1) erros grosseiros em duas medidas arbitrariamente selecionadas dentro da zona de anomalia, e (G2) erros grosseiros múltiplos interativos. No Caso G2, as duas medidas de fluxo de potência ativa selecionadas (t_{13-15} e t_{25-13}) produzem erros grosseiros interativos porque, conforme indicado na Figura 5.2, fornecem a mesma informação sobre o fluxo que flui da subestação 6 para a subestação 13. Na Tabela 5.61, visualiza-se o bom desempenho do algoritmo no processamento dos erros.

Finalmente, o Caso H apresenta uma simulação em que ocorrem, de forma simultânea, erros grosseiros em medidas analógicas e erros de topologia. A simulação do erro grosseiro é na medida de injeção de potência P_{23} , localizada na subestação 13, e a topologia é inicializada com a partida plana dos disjuntores. No processamento, a medida errônea é detectada, identificada e removida na segunda iteração do método G3M, e na primeira iteração do método de EIET. Como pode ser observado na Tabela 5.61, após da remoção da medida analógica, o valor

de $J(\hat{\mathbf{x}})$ diminui, embora continue grande devido à existência de erros de topologia. Em seguida, os *status* dos disjuntores são averiguados e corrigidos, e uma próxima iteração é realizada para validar os *status* alterados. Como consequência deste procedimento, as mudanças dos *status* dos dispositivos chaveáveis seguem exatamente como apresentado na Tabela 5.25.

Os resultados destas simulações enfatizam a importância de um nível de redundância adequado para as medidas que permita o bom desempenho do algoritmo proposto. Considerando particularmente as regiões de anomalia, as condições de redundância devem prevenir a ocorrência de conjuntos críticos de medidas [71, 72], pois isto claramente é prejudicial ao desempenho de qualquer método de processamento de erros grosseiros.

Os mesmos casos foram simulados pelo estimador integrado de estados baseado no método por ajuste externo e utilizando as rotações rápidas de Givens (algoritmo *GMA.EXT*) no laço interno. Os resultados são apresentados na Tabela 5.62. Percebe-se o mesmo desempenho na detecção, identificação e remoção das medidas com erro grosseiro, analisando os resíduos normalizados e as magnitudes dos erros grosseiros, assim como as iterações em que ocorrem as detecções dos erros. A diferença é evidenciada no número de iterações do laço interno, que é maior para este algoritmo, uma vez que 8 iterações são necessárias em quase todos os casos.

Tabela 5.61 – Resultados da Identificação de Medidas após Detecção para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras - Algoritmo GMA-INT

Caso	Medida com Erro Grossoeiro Identificada	Resíduo Normalizado r_i^N	Magnitude do Erro \hat{b}	Herruções de Givers de Detecção	Valor de $J(\hat{x})$ Antes da Eliminação	Valor de $J(\hat{x})$ Após a Eliminação	Herruções de Givers após Eliminação	Valor Final de $J(\hat{x})$
F1	t_{15-13}	12,493	15,207	2	159,908	3,738	1	3,743
F2*	P_{23}	10,091	33,762	2	132,309	41,854	1	41,85****
F2***	t_{15-16}	12,355	14,730	2	161,662	3,292	1	3,302
G1	t_{17-11} V_{11}	11,484 11,883	14,294 14,874	2 3	278,598 146,803	146,656 5,203	2 1	- 5,209
G2	t_{13-15} t_{25-13}	18,126 10,965	21,872 14,988	2 3	454,236 134,702	135,701 4,158	3 2	- 4,143
H	P_{23}	7,712	13,398	2	159,967	80,098	2	80,08****

* Simulação com plano de medição inicialmente considerado

** Simulação com plano de medição com medida adicionada em subestação

*** Valor obtido ao final da iteração corrente de IEFT

Tabela 5.62 – Resultados da Identificação de Medidas após Detecção para o Sistema-Teste IEEE 14 Barras - Algoritmo GMA.EXT

Caso	Medida com Erro Grosseiro Identificada	Resíduo Normalizado r_i^N	Magnitude do Erro \hat{b}	Iteração de Givens de Detecção	Valor de $J(\hat{x})$ Antes da Eliminação	Valor de $J(\hat{x})$ Após a Eliminação	Iterações de Givens após Eliminação	Valor Final de $J(\hat{x})$
F1	t_{15-13}	12,492	15,206	2	170,010	13,837	6	3,743
F2*	P_{23}	10,092	33,765	2	186,934	96,480	6	44,85***
F2**	t_{15-16}	12,356	14,732	2	200,659	42,286	6	3,302
G1	t_{17-11}	11,485	14,296	2	292,261	160,353	6	-
	V_{11}	11,884	14,875	3	160,484	18,929	5	5,209
G2	t_{13-15}	18,124	21,870	2	463,400	144,880	6	-
	t_{25-13}	10,965	14,988	3	143,793	13,238	5	4,143
H	P_{24}	7,712	13,398	2	159,967	80,098	2	80,08***

* Simulação com plano de medição inicialmente considerado

** Simulação com plano de medição com medida adicionada em subestação

*** Valor obtido ao final da iteração corrente de EIET

5.7 Análise Geral dos Resultados

O método de Estimação Integrada de Estados e Topologia proposto mostra-se eficaz na estimação de estados convencionais, assim como na determinação dos *status* dos dispositivos chaveáveis pertencentes às áreas selecionadas e detalhadas no nível de seção de barra, para todos os sistemas-teste. Adicionalmente, o tratamento das condições operacionais presumidas e fornecidas ao estimador de estados como informação *a priori*, pode ser realizado de duas formas: pelos métodos de ajuste externo ou de ajuste interno, vinculados a um algoritmo de resolução especializado.

Em relação aos diversos tipos de erros na topologia presumida inseridos nos sistemas, o processamento dos algoritmos não apresentou nenhuma dificuldade de convergência, não levando mais do que três iterações. Como pode ser visualizado nas tabelas de resultados gerais de cada caso, os métodos obtiveram praticamente os mesmo valores da função-objetivo. Desta forma, as diferenças entre os algoritmos estão destacadas no número de iterações do laço interno, sendo que o método de ajuste externo obteve custo computacional maior, devido ao fato de que a inclusão das informações *a priori* da topologia é feita de forma dinâmica a cada iteração, o que leva a uma trajetória mais longa até chegar à convergência.

Ainda com relação ao desempenho, deve-se mencionar a boa qualidade das estimativas finais para os estados, tanto para as variáveis de tensões nodais quanto para as de fluxo, independentemente do tamanho do sistema e arranjo das subestações. Isto pode ser observado quando os valores são comparados diretamente com os resultados do fluxo de potência convergido, bem como pelas métricas dos erros apresentados neste capítulo.

Outro fator observado é o processamento de erros grosseiros associado ao método de estimação integrada, que necessita de bons níveis de redundância das medidas analógicas, requisito este que é usual para execução da análise de medidas espúrias quando algoritmos de estimação de estados convencionais são utilizados.

A resolução do problema através do método dos mínimos quadrados ponderados implica na preservação das características estatísticas, de modo que erros grosseiros em medidas analógicas e erros na topologia afetam diretamente o valor da soma ponderada do quadrado dos resíduos, o que viabiliza a detecção de anomalia a partir do teste- $J(\hat{\mathbf{x}})$. Para a devida identificação das medidas espúrias, o teste- \hat{b} é aplicado às medidas analógicas para avaliar se os erros de medição estão dentro

dos limites previamente estipulados. Neste aspecto, os algoritmos propostos são capazes de processar as medidas errôneas, em combinação com as características do método das rotações rápidas de Givens.

Em resumo, os resultados obtidos mediante a proposta de estimação integrada de estados e topologia, para diferentes sistemas-teste e considerando ainda a inclusão de erros de topologia e erros grosseiros em medidas analógicas, indicam que a referida metodologia de estimação é viável para a modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência.

5.8 Conclusão

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação do método proposto nos sistemas-teste IEEE 14, 30 e 57 barras.

Os algoritmos são baseados no tratamento das condições operacionais que modelam os *status* dos disjuntores da rede elétrica como informações *a priori*. Esta proposta permite a validação e/ou correção da saída do Configurador de Rede, e desta forma previne a contaminação dos estados estimados por uma topologia presumida incorreta. Diversos tipos de topologia inicial incorreta foram simulados, como erros de exclusão, erros de inclusão, erro de *by-pass*, e também com a “partida plana” dos disjuntores, caso em que não há nenhuma informação prévia dos respectivos *status*.

Quanto à ocorrência de erros grosseiros em medidas analógicas, por si só ou de forma simultânea com uma topologia inicial incorreta, os resultados preliminares obtidos indicam que a combinação dos métodos convencionais $J(\hat{\mathbf{x}})$ e $\hat{\mathbf{b}}$ para processamento de erros grosseiros apresenta bom desempenho e é uma estratégia promissora. Um requisito para seu sucesso, entretanto, é a disponibilidade de um nível adequado de redundância de medidas. A quantificação do nível de redundância mínimo para garantir a correta estimação integrada de estados e topologia mesmo na presença de erros de modelagem é ainda um problema em aberto que exige esforços de pesquisa adicionais.

Pode-se entretanto concluir que, os algoritmos propostos apresentam boas características de robustez, pois convergiram quando submetidos a vários tipos erros de modelagem, incluindo o processamento de erros grosseiros. Neste caso, o procedimento proposto realiza a detecção, a identificação e a remoção de medidas espúrias na segunda interação as rotações de rápidas Givens, considerando que o processo iterativo é inicializado a partir da partida plana dos estados. Outras

qualidades observadas são as características de robustez numérica asseguradas pelas propriedades do estimador ortogonal.

6 CONCLUSÕES GERAIS

6.1 Considerações Finais

A operação em tempo real de sistemas elétricos de potência tem como principal objetivo assegurar o suprimento de energia elétrica aos consumidores e garantir a continuidade e qualidade do serviço. Nesta perspectiva, a estimação de estados é a ferramenta essencial para permitir que o Operador do sistema elétrico monitore a condição de operação corrente, com base em informações coletadas da rede elétrica praticamente em tempo real. Os algoritmos de estimação de estados devem necessariamente levar em conta que tais dados estão sujeitos a diversos tipos de erros, que tendem a contaminar principalmente as medidas analógicas provenientes do sistema SCADA, mas também incidem sobre os dados relativos aos *status* das chaves e disjuntores presentes no sistema.

A proposta desta dissertação pode ser resumida como a concepção de algoritmos para a Estimação Integrada de Estados e Topologia (EIET), apresentada no Capítulo 4. Baseia-se no tratamento da topologia da rede elétrica fornecida pelo Configurador de Redes como informação *a priori*, considerando que uma parte do sistema é modelada no nível de seção de barra. Esta topologia presumida é então confirmada ou revisada a partir do reconhecimento de que informações sobre a topologia real estão também presentes nas medidas analógicas disponíveis ao estimador. Concomitantemente aos *status* dos dispositivos chaveáveis, também são estimadas as variáveis de estado convencionais, dadas pelos ângulos e as magnitudes das tensões nodais. Assim posto, a resolução do problema integrado é obtida mediante a utilização de algoritmos ortogonais de estimação.

Dois métodos para o tratamento da topologia como informação *a priori* são propostos e analisados neste trabalho, dando origem a duas alternativas para o laço interno do algoritmo de EIET. O primeiro consiste em se criticar e, se necessário, revisar, as condições operacionais que modelam a topologia corrente externamente, ao cabo de cada etapa do processo iterativo da estimação de estados. Por esta razão, este algoritmo é denotado *método de ajuste externo*. Verifica-se que esta abordagem é independente do algoritmo utilizado para a solução do problema, no sentido de que não requer propriedades específicas do algoritmo empregado.

O segundo método surge como uma alternativa ao método de

ajuste externo, sendo associado à aplicação do algoritmo das rotações de Givens com três multiplicadores. Nesta abordagem, as informações de topologia *a priori* são inseridas no algoritmo logo na inicialização do processo, mediante uma compatível configuração dos elementos da matriz triangular superior $\bar{\mathbf{U}}^{(0)}$. Por este motivo, esta abordagem é denominada *método de ajuste interno*. Esta estratégia para a estimação integrada tende a ser mais eficiente, pois as informações sobre os *status* dos disjuntores são processadas desde a primeira iteração do método, resultando em menor custo computacional em relação ao primeiro método.

O laço externo do algoritmo de EIET é responsável pela aquisição da topologia presumida da rede, bem como por implementar as correções e/ou validações sobre ela, com base nas informações extraídas das medidas analógicas. Para todos os casos investigados neste trabalho, o processamento dos métodos propostos não apresentou nenhuma dificuldade de convergência mesmo na presença de erros de topologia, não levando mais do que três iterações para corrigir e validar os *status* dos disjuntores.

O desempenho da metodologia pode ser aferido mediante índices específicos, desenvolvidos em [68], que permitem a comparação dos valores estimados com os obtidos de um estudo de fluxo de potência convergido [9]. Os resultados dos diversos estudos de casos realizados indicam que valores adequados para os índices de desempenho são consistentemente alcançados, independentemente do porte do sistema investigado.

Em relação ao processamento de erros grosseiros, a proposta de resolução da estimação integrada com base unicamente em critérios de mínimos quadrados ponderados, o que se contrapõe a outras propostas recentes [43, 44], implica na preservação das características estatísticas do problema. Isto viabiliza a aplicação de métodos convencionais para a detecção e identificação de anomalias. Assim, pode-se realizar testes de detecção com base no critério $J(\hat{\mathbf{x}})$, combinando-o com testes de hipóteses sobre estimativas para os erros, [30] para a identificação das medidas espúrias. Neste aspecto, os algoritmos propostos são plenamente capazes de processar medidas errôneas, usufruindo ainda das características do método das rotações rápidas de Givens.

Em resumo, pode-se inferir dos resultados numéricos apresentados neste trabalho, obtidos para os sistemas-teste do IEEE de 14, 30 e 57 barras, que a metodologia proposta para a Estimação Integrada de Estados e Topologia é viável para a aplicação na modelagem em tempo real de sistemas elétricos de potência, uma vez que os algoritmos pos-

suem boas características de robustez, pois convergiram em todos os casos, mesmo quando submetidos a vários tipos erros de modelagem.

6.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

A implementação das propostas de Estimação Integrada de Estados e Topologia apresentadas neste trabalho tem por objetivo utilizar as informações de estado *a priori* como ferramenta para a inclusão da topologia da rede elétrica, razão pela qual se justifica o uso do termo como “informação *a priori* da topologia”. As propriedades da metodologia discutida nesta dissertação indicam um grande potencial para avanço com respeito as outras propostas encontradas na literatura, como [43], [44] e [46]. Ressalta-se também as vantagens em se utilizar as informações *a priori* para melhorar o processo de estimação de estados, particularmente quando implementadas mediante métodos ortogonais sequenciais.

Os tópicos relacionados a seguir são vistos como temas potenciais para trabalhos de pesquisa futuros:

- Estudo da extensão da presente formulação para a inclusão de medidas fasoriais localizadas nas subestações, com o intuito de melhorar as estimativas das variáveis de estado;
- Implementação do método das rotações de Givens em blocos 2×2 : estudar adaptações à abordagem proposta em [73] para a aplicação da estratégia das informações *a priori* de topologia pelo método de ajuste interno utilizando a matriz de pesos \mathbf{D} ;
- Análise de erros de topologia com base nos resíduos das informações *a priori*: desenvolver uma estratégia para a detecção e identificação de erros em *status* dos dispositivos chaveáveis através dos resíduos das informações *a priori* da topologia, mediante testes de hipóteses como os propostos em [2, 30, 39], com o intuito de substituir o método de validação da topologia abordado neste trabalho;
- Processamento de erros grosseiros múltiplos em conexão com a Estimação Integrada de Estados e Topologia: investigar a associação de métodos baseados em testes de hipóteses como os propostos em [31] à metodologia proposta nesta dissertação, com o intuito de processar erros grosseiros múltiplos em medidas analógicas;

- Análise de observabilidade estendida: utilizar o presente método para o estudo da observabilidade quando o modelo no nível de seção de barra é introduzido ao problema de estimação de estados, considerado que as informações *a priori* de topologia são introduzidas como “medidas virtuais” e que fazem parte do conjunto de informações disponíveis ao estimador, juntamente com as medidas analógicas nas subestações. Deste modo, torna-se relevante avaliar o impacto do *status* de dispositivos chaveáveis sobre observabilidade da rede, bem como verificar alternativas para a sua restauração nos casos mais críticos.

APÊNDICE A – DADOS DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS

Tabela A.1 – Dados das Barras do Sistema IEEE 14 Barras

Barra	Tipo	V	δ	Pd	Qd	Pg	Qg	bsh
1	2	1,060	0,0	0,0	0,0	232,4	-16,9	0,0
2	1	1,045	0,0	21,7	12,7	40,0	42,4	0,0
3	1	1,010	0,0	94,2	19,0	0,0	23,4	0,0
4	0	1,019	0,0	47,8	-3,9	0,0	0,0	0,0
5	0	1,020	0,0	7,6	1,6	0,0	0,0	0,0
6	0	1,070	0,0	5,6	3,8	0,0	0,0	0,0
7	0	1,062	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	1	1,090	0,0	0,0	0,0	0,1	17,4	0,0
9	0	1,056	0,0	29,5	16,6	0,0	0,0	0,2
10	0	1,051	0,0	9,0	5,8	0,0	0,0	0,0
11	0	1,057	0,0	3,5	1,8	0,0	0,0	0,0
12	0	1,055	0,0	6,1	1,6	0,0	0,0	0,0
13	0	1,050	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0	1,036	0,0	14,9	5,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 06								
15	1	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	12,2	0,0
16	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
17	0	1,000	0,0	2,0	2,0	0,0	0,0	0,0
18	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
19	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
20	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
21	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	0	1,000	0,0	5,6	3,8	0,0	0,0	0,0
Subestação 13								
23	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
24	0	1,000	0,0	13,5	5,8	0,0	0,0	0,0
25	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabela A.2 – Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 14 Barras

Barras / Nós		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	BshLin (p.u.)
De	Para			
1	2	0,01938	0,05917	0,0528 [t]
1	5	0,05403	0,22304	0,0492
2	3	0,04699	0,19797	0,0438
2	4	0,05811	0,17632	0,0340
2	5	0,05695	0,17388	0,0346
3	4	0,06701	0,17103	0,0128
4	5	0,01335	0,04211	0,0000
4	7	0,00000	0,20912	0,0000
4	9	0,00000	0,55618	0,0000
5	16	0,00000	0,25202	0,0000
17	11	0,09498	0,19890	0,0000
6	12	0,12291	0,25581	0,0000
15	13	0,06615	0,13027	0,0000

Continua na próxima página

Tabela A.2 – *Continuação da página anterior*

7	8	0,00000	0,17615	0,0000
7	9	0,00000	0,11001	0,0000
9	10	0,03181	0,08450	0,0000
9	14	0,12711	0,27038	0,0000
10	11	0,08205	0,19207	0,0000
12	25	0,22092	0,19988	0,0000
24	14	0,17093	0,34802	0,0000
Ramos Chaveáveis SE 06				
20	21	0	0	0
15	20	0	0	0
17	20	9999	9999	0
6	20	9999	9999	0
21	22	0	0	0
15	16	9999	9999	0
17	18	0	0	0
6	19	0	0	0
16	22	0	0	0
18	22	0	0	0
19	22	0	0	0
Ramos Chaveáveis SE 13				
24	25	0	0	0
13	25	0	0	0
23	24	0	0	0
15	23	9999	9999	0

- Plano de Medição

O plano de medição empregado à este sistema consiste em:

- Quantidade de medidas de magnitude de tensão: 12;
- Quantidade de medidas de fluxo de potência ativa: 46;
- Quantidade de medidas de fluxo de potência reativa: 46;
- Quantidade de medidas de injeção de potência ativa: 15;
- Quantidade de medidas de injeção de potência reativa: 15;
- Quantidade de variáveis de estados calculados: 80;
- Redundância: 2,2625.

APÊNDICE B – DADOS DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS

Tabela B.1 – Dados das Barras do Sistema IEEE 30 Barras

Barra	Tipo	V	δ	Pd	Qd	Pg	Qg	bsh
1	2	1,060	0,00	0,0	0,0	260,2	-16,1	0,0
2	1	1,043	-5,48	21,7	12,7	40,0	50,0	0,0
3	0	1,021	-7,96	2,4	1,2	0,0	0,0	0,0
4	0	1,012	-9,62	7,6	1,6	0,0	0,0	0,0
5	0	1,010	-14,37	94,2	19,0	0,0	0,0	0,0
6	0	1,010	-11,34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0	1,002	-13,12	12,8	5,9	0,0	0,0	0,0
8	1	1,010	-12,10	30,0	30,0	0,0	37,3	0,0
9	0	1,051	-14,38	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0	1,045	-15,97	5,8	2,0	0,0	0,0	0,19
11	1	1,082	-14,39	0,0	0,0	0,0	16,2	0,0
12	0	1,057	-15,24	11,2	7,5	0,0	0,0	0,0
13	1	1,071	-15,24	0,0	0,0	0,0	10,6	0,0
14	0	1,042	-16,13	6,2	1,6	0,0	0,0	0,0
15	0	1,038	-16,22	8,2	2,5	0,0	0,0	0,0
16	0	1,045	-15,83	3,5	1,8	0,0	0,0	0,0
17	0	1,04	-16,14	9,0	5,8	0,0	0,0	0,0
18	0	1,028	-16,82	3,2	0,9	0,0	0,0	0,0
19	0	1,026	-17,00	9,5	3,4	0,0	0,0	0,0
20	0	1,03	-16,80	2,2	0,7	0,0	0,0	0,0
21	0	1,033	-16,42	17,5	11,2	0,0	0,0	0,0
22	0	1,033	-16,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	0	1,027	-16,61	3,2	1,6	0,0	0,0	0,0
24	0	1,021	-16,78	8,7	6,7	0,0	0,0	0,043
25	0	1,017	-16,35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
26	0	1,000	-16,77	3,5	2,3	0,0	0,0	0,0
27	0	1,023	-15,82	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0	1,007	-11,97	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0	1,003	-17,06	2,4	0,9	0,0	0,0	0,0
30	0	0,992	-17,94	10,6	1,9	0,0	0,0	0,0
Subestação 12								
31	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
32	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
33	2	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
36	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 16								
38	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
39	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
40	2	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 17								
41	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
42	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
43	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 5								
44	1	1,010	0,0	0,0	0,0	0,0	37,0	0,0
45	0	1,010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
46	0	1,010	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 7								
47	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
48	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
49	0	1,000	0,0	10,0	5,0	0,0	0,0	0,0

Tabela B.2 – Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 30 Barras

Barras / Nós		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	BshLin (p.u.)
De	Para			
1	2	0,0192	0,0575	0,0528
1	3	0,0452	0,1652	0,0408
2	4	0,0570	0,1737	0,0368
3	4	0,0132	0,0379	0,0084
2	45	0,0472	0,1983	0,0418
2	6	0,0581	0,1763	0,0374
4	6	0,0119	0,0414	0,0090
46	47	0,0460	0,1160	0,0204
6	48	0,0267	0,0820	0,0170
6	8	0,0120	0,0420	0,0090
6	9	0,0000	0,2080	0,0
6	10	0,0000	0,5560	0,0
9	11	0,0000	0,2080	0,0
9	10	0,0000	0,1100	0,0
4	34	0,0000	0,2560	0,0
35	13	0,0000	0,1400	0,0
31	14	0,1231	0,2559	0,0
32	15	0,0662	0,1304	0,0
36	38	0,0945	0,1987	0,0
14	15	0,2210	0,1997	0,0
39	41	0,0524	0,1923	0,0
15	18	0,1073	0,2185	0,0
18	19	0,0639	0,1292	0,0
19	20	0,0340	0,0680	0,0
10	20	0,0936	0,2090	0,0
10	42	0,0324	0,0845	0,0
10	21	0,0348	0,0749	0,0
10	22	0,0727	0,1499	0,0
21	22	0,0116	0,0236	0,0
15	23	0,1000	0,2020	0,0
22	24	0,1150	0,1790	0,0
23	24	0,1320	0,2700	0,0
24	25	0,1885	0,3292	0,0
25	26	0,2544	0,3800	0,0
25	27	0,1093	0,2087	0,0
28	27	0,0000	0,3960	0,0
27	29	0,2198	0,4153	0,0
27	30	0,3202	0,6027	0,0
29	30	0,2399	0,4533	0,0
8	28	0,0636	0,2000	0,0428
6	28	0,0169	0,0599	0,0130
Ramos Chaveáveis SE 12				
31	36	0	0	0
32	36	0	0	0
33	36	9999	9999	0
31	34	0	0	0
32	35	9999	9999	0
33	12	9999	9999	0
34	37	0	0	0
35	37	0	0	0
12	37	0	0	0
Ramos Chaveáveis SE 16				
16	38	0	0	0
38	39	0	0	0
40	38	9999	9999	0
40	39	9999	9999	0

Continua na próxima página

Tabela B.2 – *Continuação da página anterior*

Ramos Chaveáveis SE 17				
17	41	0	0	0
17	42	9999	9999	0
41	43	0	0	0
42	43	0	0	0
Ramos Chaveáveis SE 5				
46	5	9999	9999	0
45	46	0	0	0
5	44	0	0	0
44	45	0	0	0
Ramos Chaveáveis SE 7				
7	47	9999	9999	0
7	48	0	0	0
47	49	0	0	0
48	49	9999	9999	0

- Plano de Medição

O plano de medição empregado à este sistema consiste em:

- Quantidade de medidas de magnitude de tensão: 31;
- Quantidade de medidas de fluxo de potência ativa: 94;
- Quantidade de medidas de fluxo de potência reativa: 94;
- Quantidade de medidas de injeção de potência ativa: 26;
- Quantidade de medidas de injeção de potência reativa: 26;
- Quantidade de variáveis de estados calculados: 148;
- Redundância: 2,486.

APÊNDICE C – DADOS DO SISTEMA IEEE 57 BARRAS

Tabela C.1 – Dados das Barras do Sistema IEEE 57 Barras

Barra	Tipo	V	δ	Pd	Qd	Pg	Qg	bsh
1	2	1,040	0	55,0	17,0	128,9	-16,1	0
2	1	1,010	-1,18	3,0	88,0	0,0	-0,8	0
3	1	0,985	-5,97	41,0	21,0	40,0	-1,0	0
4	0	0,981	-7,32	0,0	0,0	0,0	0,0	0
5	0	0,976	-8,52	13,0	4,0	0,0	0,0	0
6	1	0,980	-8,65	75,0	2,0	0,0	0,8	0
7	0	0,984	-7,58	0,0	0,0	0,0	0,0	0
8	1	1,005	-4,45	150,0	22,0	450,0	62,1	0
9	1	0,980	-9,56	121,0	26,0	0,0	2,2	0
10	0	0,986	-11,43	5,0	2,0	0,0	0,0	0
11	0	0,974	-10,17	0,0	0,0	0,0	0,0	0
12	1	1,015	-10,46	0,0	0,0	110,0	44,5	0
13	0	0,979	-9,79	18,0	2,3	0,0	0,0	0
14	0	0,970	-9,33	10,5	5,3	0,0	0,0	0
15	0	1,000	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0
16	0	1,013	-8,85	43,0	3,0	0,0	0,0	0
17	0	1,000	0	21,0	4,0	0,0	0,0	0
18	0	1,001	-11,71	27,2	9,8	0,0	0,0	0,1
19	0	0,970	-13,2	3,3	0,6	0,0	0,0	0
20	0	0,964	-13,41	2,3	1,0	0,0	0,0	0
21	0	1,008	-12,89	0,0	0,0	0,0	0,0	0
22	0	1,010	-12,84	0,0	0,0	0,0	0,0	0
23	0	1,008	-12,91	6,3	2,1	0,0	0,0	0
24	0	0,999	-13,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0
25	0	0,982	-18,13	6,3	3,2	0,0	0,0	0,059
26	0	0,959	-12,95	0,0	0,0	0,0	0,0	0
27	0	0,982	-11,48	9,3	0,5	0,0	0,0	0
28	0	0,997	-10,45	4,6	2,3	0,0	0,0	0
29	0	1,010	-9,75	17,0	2,6	0,0	0,0	0
30	0	0,962	-18,68	3,6	1,8	0,0	0,0	0
31	0	0,936	-19,34	5,8	2,9	0,0	0,0	0
32	0	0,949	-18,46	1,6	0,8	0,0	0,0	0
33	0	0,947	-18,5	3,8	1,9	0,0	0,0	0
34	0	0,959	-14,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0
35	0	0,966	-13,86	6,0	3,0	0,0	0,0	0
36	0	0,976	-13,59	0,0	0,0	0,0	0,0	0
37	0	0,985	-13,41	0,0	0,0	0,0	0,0	0
38	0	1,013	-12,71	14,0	7,0	0,0	0,0	0
39	0	0,983	-13,46	0,0	0,0	0,0	0,0	0
40	0	0,973	-13,62	0,0	0,0	0,0	0,0	0
41	0	0,996	-14,05	6,3	3,0	0,0	0,0	0
42	0	0,966	-15,5	7,1	4,4	0,0	0,0	0
43	0	1,010	-11,33	2,0	1,0	0,0	0,0	0
44	0	1,017	-11,86	12,0	1,8	0,0	0,0	0
45	0	1,036	-9,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0
46	0	1,050	-11,89	0,0	0,0	0,0	0,0	0
47	0	1,033	-12,49	29,7	11,6	0,0	0,0	0
48	0	1,027	-12,59	0,0	0,0	0,0	0,0	0
49	0	1,036	-12,92	18,0	8,5	0,0	0,0	0
50	0	1,023	-13,39	21,0	10,5	0,0	0,0	0
51	0	1,052	-12,52	18,0	5,3	0,0	0,0	0
52	0	0,980	-11,47	4,9	2,2	0,0	0,0	0
53	0	0,971	-12,23	20,0	10,0	0,0	0,0	0,063
54	0	0,996	-11,69	4,1	1,4	0,0	0,0	0
55	0	1,031	-10,78	6,8	3,4	0,0	0,0	0
56	0	0,968	-16,04	7,6	2,2	0,0	0,0	0
57	0	0,965	-16,56	6,7	2,0	0,0	0,0	0

Continua na próxima página

Tabela C.1 – Continuação da página anterior

Subestação 14								
58	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
59	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
60	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 15								
61	2	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
62	0	1,000	0,0	22,0	5,0	0,0	0,0	0,0
63	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
64	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
65	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
66	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
67	0	0,988	-7,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 16								
68	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
69	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
70	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 17								
71	0	1,000	0,0	21,0	4,0	0,0	0,0	0,0
72	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
73	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
74	0	1,017	-5,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
75	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Subestação 12								
76	0	1,000	0,0	235,9	16,8	0,0	0,0	0,0
77	0	1,000	0,0	113,1	7,2	0,0	0,0	0,0
78	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
79	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
80	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
81	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
82	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
83	0	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
84	1	1,015	0,0	0,0	0,0	100,0	4,2	0,0
85	1	1,015	0,0	0,0	0,0	100,0	4,2	0,0

Tabela C.2 – Dados da Linhas e Topologia do Sistema IEEE 57 Barras

Barras / Nós		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	BshLin (p.u.)
De	Para			
1	2	0,0083	0,0280	0,1290
1	63	0,0178	0,0910	0,0988
1	68	0,0454	0,2060	0,0546
1	72	0,0238	0,1080	0,0286
2	3	0,0298	0,0850	0,0818
3	4	0,0112	0,0366	0,0380
3	64	0,0162	0,0530	0,0544
4	5	0,0625	0,1320	0,0258
4	6	0,0430	0,1480	0,0348
4	18	0,0000	0,2423	0,0000
5	6	0,0302	0,0641	0,0124
6	7	0,0200	0,1020	0,0276
6	8	0,0339	0,1730	0,0470
7	8	0,0139	0,0712	0,0194
7	29	0,0000	0,0648	0,0000
8	9	0,0099	0,0505	0,0548
9	10	0,0369	0,1679	0,0440

Continua na próxima página

Tabela C.2 – *Continuação da página anterior*

9	11	0,0258	0,0848	0,0218
9	82	0,0648	0,2950	0,0772
9	13	0,0481	0,1580	0,0406
9	55	0,0000	0,1205	0,0000
10	80	0,0277	0,1262	0,0328
10	51	0,0000	0,0712	0,0000
11	13	0,0223	0,0732	0,0188
11	41	0,0000	0,7490	0,0000
11	43	0,0000	0,1530	0,0000
81	13	0,0178	0,0580	0,0604
69	79	0,0180	0,0813	0,0216
78	73	0,0397	0,1790	0,0476
13	59	0,0132	0,0434	0,0110
13	66	0,0269	0,0869	0,0230
13	49	0,0000	0,1910	0,0000
58	15	0,0171	0,0547	0,0148
60	46	0,0000	0,0735	0,0000
65	45	0,0000	0,1042	0,0000
18	19	0,4610	0,6850	0,0000
19	20	0,2830	0,4340	0,0000
21	20	0,0000	0,7767	0,0000
21	22	0,0736	0,1170	0,0000
22	23	0,0099	0,0152	0,0000
22	38	0,0192	0,0295	0,0000
23	24	0,1660	0,2560	0,0084
24	25	0,0000	0,6028	0,0000
24	26	0,0000	0,0473	0,0000
25	30	0,1350	0,2020	0,0000
26	27	0,1650	0,2540	0,0000
27	28	0,0618	0,0954	0,0000
28	29	0,0418	0,0587	0,0000
29	52	0,1442	0,1870	0,0000
30	31	0,3260	0,4970	0,0000
31	32	0,5070	0,7550	0,0000
32	33	0,0392	0,0360	0,0000
34	32	0,0000	0,9530	0,0000
34	35	0,0520	0,0780	0,0032
35	36	0,0430	0,0537	0,0016
36	37	0,0290	0,0366	0,0000
36	40	0,0300	0,0466	0,0000
37	38	0,0651	0,1009	0,0020
37	39	0,0239	0,0379	0,0000
38	44	0,0289	0,0585	0,0020
38	49	0,1150	0,1770	0,0030
38	48	0,0312	0,0482	0,0000
39	57	0,0000	1,3550	0,0000
40	56	0,0000	1,1950	0,0000
41	42	0,2070	0,3520	0,0000
41	43	0,0000	0,4120	0,0000
44	45	0,0624	0,1242	0,0040
46	47	0,0230	0,0680	0,0032
47	48	0,0182	0,0233	0,0000
48	49	0,0834	0,1290	0,0048
49	50	0,0801	0,1280	0,0000
50	51	0,1386	0,2200	0,0000
52	53	0,0762	0,0984	0,0000
53	54	0,1878	0,2320	0,0000
54	55	0,1732	0,2265	0,0000
56	41	0,5530	0,5490	0,0000
56	42	0,2125	0,3540	0,0000

Continua na próxima página

Tabela C.2 – *Continuação da página anterior*

57	56	0,1740	0,2600	0,0
Ramos Chaveáveis SE 14				
14	58	9999	9999	0,0
14	60	0	0	0,0
58	59	0	0	0,0
59	60	0	0	0,0
Ramos Chaveáveis SE 15				
62	67	0	0	0,0
63	67	0	0	0,0
64	67	0	0	0,0
65	67	0	0	0,0
66	67	0	0	0,0
15	67	0	0	0,0
61	67	9999	9999	0,0
61	62	9999	9999	0,0
61	63	9999	9999	0,0
61	64	9999	9999	0,0
61	65	9999	9999	0,0
61	66	9999	9999	0,0
15	61	9999	9999	0,0
Ramos Chaveáveis SE 16				
16	68	0	0	0,0
16	69	9999	9999	0,0
68	70	0	0	0,0
69	70	0	0	0,0
Ramos Chaveáveis SE 17				
72	74	0	0	0,0
17	74	0	0	0,0
72	73	0	0	0,0
17	71	9999	9999	0,0
73	75	0	0	0,0
71	75	0	0	0,0
Ramos Chaveáveis SE 12				
12	84	0	0	0,0
12	85	9999	9999	0,0
84	85	9999	9999	0,0
78	84	0	0	0,0
80	84	0	0	0,0
82	84	9999	9999	0,0
76	84	0	0	0,0
77	84	9999	9999	0,0
78	79	9999	9999	0,0
80	81	9999	9999	0,0
82	83	0	0	0,0
76	85	9999	9999	0,0
77	85	0	0	0,0
79	85	0	0	0,0
81	85	0	0	0,0
83	85	0	0	0,0

- Plano de Medição

O plano de medição empregado à este sistema consiste em:

- Quantidade de medidas de magnitude de tensão: 64;
- Quantidade de medidas de fluxo de potência ativa: 171;

- Quantidade de medidas de fluxo de potência reativa: 171;
- Quantidade de medidas de injeção de potência ativa: 59;
- Quantidade de medidas de injeção de potência reativa: 59;
- Quantidade de variáveis de estados calculados: 256;
- Redundância: 2,551.

REFERÊNCIAS

- [1] ZARCO, P.; EXPOSITO, A. G. Power system parameter estimation: a survey. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 15, n. 1, p. 216–222, Fevereiro 2000.
- [2] MONTICELLI, A. *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*. New York: Kluwer's Power Electronics and Power Systems Series, 1999. 394 p.
- [3] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 4, p. 1561–1570, Novembro 1991.
- [4] MONTICELLI, A. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 1, p. 364–370, Fevereiro 1993.
- [5] MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, Agosto 1993.
- [6] ALSAÇ, O. et al. Generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13 n. 3. p, p. 1060–1075, 1998.
- [7] PINTO JR., R. R. *Fluxo de Potência em Redes Modeladas em Nível de Subestação*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Setembro 2005.
- [8] LOURENÇO, E. M.; PINTO JR., R. R.; SIMÕES COSTA, A. Power flow at substation level using newton-raphson's method. In: X SEPOPE. *X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Florianópolis, 2006. p. 1–8.
- [9] LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; PINTO JR., R. R. Steady-state solution for power networks modeled at bus section level. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 25, n. 1, p. 10–20, Fevereiro 2010.
- [10] LOURENÇO, E. M.; ROSAS, G. B.; FERNANDES, T. S. P. Modelagem de redes no nível de subestação para estudos de fluxo de potência ótimo. In: XI SEPOPE. *XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Belém, 2009. v. 1, p. 1–7.

- [11] LOURENÇO, E. M.; SILVA, N. S. da; SIMÕES COSTA, A. Fast decoupled steady-state solution for power networks modeled at the bus section level. In: *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*. Bucharest: IEEE, 2009. p. 1–7.
- [12] SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part i: Extrac model. *IEEE Transactions on Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 1, p. 120–125, Janeiro 1970.
- [13] SCHWEPPE, F. C.; ROM, D. B. Power system static-state estimation, part ii: Approximate model. *IEEE Transactions on Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 1, p. 125–130, Janeiro 1970.
- [14] SCHWEPPE, F. C. Power system static-state estimation, part iii: Implementation. *IEEE Transactions on Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 1, p. 130–135, Janeiro 1970.
- [15] SCHWEPPE, F. C.; HANDSCHIN, E. J. Static state estimation in electric power systems. *Proceedings of the IEEE*, Proceedings of the IEEE, v. 62, n. 7, p. 972–982, Julho 1974.
- [16] DY LIACCO, T. E. States estimation in control centres. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 5, n. 4, p. 218–221, Outrubro 1983.
- [17] WU, F. F. Power system state estimation: a survey. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 12, n. 2, p. 80–87, Abril 1990.
- [18] ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*. [S.l.]: Marcel Dekker, 2004. 336 p.
- [19] IRVING, M.; OWEN, R. C.; STERLING., M. Power-system state estimation using linear programming. *Electrical Engineers, Proceedings of the Intituition of*, v. 125. p, p. 879–885, 1978.
- [20] KOTIUGA, W. W.; VIDYASAGAR, K. Bad data rejection properties of weighted least absolute value techniques applied to static state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, n. 4. p, p. 844–853, 1982.
- [21] FALCÃO, D.; ASSIS, S. Linear programming state estimation: error analysis and gross error identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 3, p. 809–815, Agosto 1988.

- [22] ABUR, A.; KIM, H.; M. CELIK. Identifying the unknown circuit breaker statues in power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 10, n. 4, p. 2029–2037, Novembro 1995.
- [23] SILVA, S. N.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, A. K. Hierarchical state estimation based on state & topology coestimation at substation level. In: *PowerTech (POWERTECH), 2013 IEEE*. Grenoble, França: IEEE, 2013. p. 1–6.
- [24] VOSGERAU, F. et al. Power system state and topology coestimation. In: *VIII IREP - Symposium on Bulk Power System Dynamics and Control*. Busios, Brasil: [s.n.], 2010. p. 1–6.
- [25] ANDREOLI, E.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. A. Topology validation via simultaneous state & topology estimation with phasor data processing capability. In: 18th PSCC. *Power Systems Computation Conference*. Wroclaw, Poland, 2014.
- [26] NOCEDAL, J.; WRIGHT, S. *Numerical Opmization*. 2. ed. Nova Iorque: Springer, 2006. 664 p. (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering, XXII).
- [27] MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEUW, P. Least median of squares estimation in power system. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 2, p. 511–523, May 1991.
- [28] CELIK, M.; ABUR, A. A robust WLAV state estimation using transformations. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 7, n. 1, p. 106–113, Fev. 1992.
- [29] HANDSCHIN, E. et al. Bad data analysis for power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, PAS-94, n. 2, p. 329–337, Mar./Apr 1975.
- [30] MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Reliable bad data processing for real-time state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, PAS-102, n. 5, p. 1126–1139, May 1983.
- [31] MILI, L.; VAN CUTSEM, T.; RIBENS-PAVELLA, M. Hypotesis testing identification: a new method for bad data analysis in power state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103, n. 11, p. 3239–3252, Nov. 1984.
- [32] LUGTU, R. L. et al. Power system state estimation: Detection of topological errors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-99, n. 6, p. 2406–2412, Nov./Dec. 1980.

- [33] CLEMENTS, K.; DAVIS, P. Detection and identification of topology errors in electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3. p, p. 1748–1753, 1988.
- [34] CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Multiple bad data and detectability and identifiability: a geometric approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 1, n. 3, p. 355 – 360, July 1985.
- [35] WU, F. F.; LIU, W. E. Detection of topology errors by state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4. p, p. 176–182, 1989.
- [36] WRUBEL, J. N. et al. Practical experience with corrective switching algorithm for on-line applications. *Power Industry Computer Application Conference, 1995. Conference Proceedings., 1995 IEEE*, v. 11, n. 1, p. 415–421, Fevereiro 1995.
- [37] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; COLZANI, L. Reduced anomaly zone determination for topology error processing in generalized state estimation. In: *PowerTech 2007, IEEE*. Loussanne: IEEE, 2007. p. 137– 142.
- [38] CLEMENTS, K. A.; SIMÕES COSTA, A. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13 n. 2. p, p. 347–353, 1998.
- [39] LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. A. Bayesian-based hypothesis testing for topological error identification in generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 19 n.2. p, p. 1206–1215, 2004.
- [40] SIMÕES COSTA, A.; VIEIRA, F. Topology error identification through orthogonal estimation methods and hypothesis testing. In: *Power Tech Proceedings, 2001 IEEE*. Porto: IEEE, 2001. v. 3.
- [41] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, M. E.; VIEIRA, F. Topology error identification for orthogonal estimators considering a priori state information. *15th PSCC*, Section 26, paper 3, p. 1–7, Agosto 2005.
- [42] VEMPATI, N. et al. Topology estimation. In: *IEEE PES Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 806–810.

- [43] VOSGERAU, F. F. *Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Fevereiro 2011.
- [44] ANDREOLI, E. *Coestimação de estados e topologia em sistemas de potência representados por modelo não-linear*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Maio 2013.
- [45] YANG, H. S. T.; BOSE, A. Transition to a two-level linear state estimator - part ii: algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 26, p. 54–62, Fevereiro 2011.
- [46] KRSTULOVIC, J. et al. Towards an auto-associative topology states estimator. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 3, p. 3311–3318, Agosto 2013.
- [47] SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. H. An orthogonal row processing algorithm for power system sequential state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 8, p. 3791–3800, August 1981.
- [48] DY LIACCO, T. E. The role and implementation of state estimation in an energy management system. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 12, n. 2, p. 75–79, April 1990.
- [49] LARSON, R.; TINNEY, W.; PESCHON, J. State estimation in power systems part i: Theory and feasibility. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-89, n. 3, p. 345–352, March 1970.
- [50] SWERLING, P. Modern state estimation methods from the viewpoint of the method of least squares. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 16, n. 6, p. 707–719, December 1971.
- [51] ROUSSEAU, P.; VAN-CUTSEM, T.; DY LIACCO, T. E. Whither dynamic state estimation. *Electric Power Systems Research*, v. 12, n. 2, p. 237–244, April 1990.
- [52] COUTO FILHO, M. B. D.; GLOVER, J. D.; LEITE DA SILVA, A. M. State estimators with forecasting capability. In: IEEE (Ed.). *11th Power System Computation Conference (PSCC)*. Avignon, France, 1993. II, p. 689–695.

- [53] DO COUTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S. de; et al. Revealing gross error in critical measurements and sets via forecasting-aided state estimation. *Electric Power Systems Research*, v. 57, n. 1, p. 25–32, Jan 2011.
- [54] DO COUTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S. de. Forecasting-aided state estimation - part i: Panorama. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 24, n. 4, p. 1667–1677, November 2009.
- [55] CHEN, C.-T. *Linear System Theory and Design*. 3. ed. New York: Oxford Univerty Press, 1999. 176 p. (The Oxford Serien in Electrical and Computer Engineering).
- [56] GOUVÊA, J. P. S.; SIMÕES COSTA, A. Estimador de estados ortogonal com restrições de igualdade. In: SBA. *SBA Controle & Automação*. Formaleza: SBA, 1998. v. 9, n. 3, p. 141–148.
- [57] SIMÕES COSTA, A.; GOUVÊA, J. P. S. A constrained orthogonal state estimator for external system modeling. *Electrical Power & Energy Systems*, v. 22, p. 555–562, November 2000.
- [58] SIMÕES COSTA, A.; QUINTANA, V. H. A robust numerical technique for power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-100, n. 2, p. 691 – 698, February 1981.
- [59] VEMPATI, N.; SLUTSKER, I. W.; TINNEY, W. F. Enhancements to Givens rotations for power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 2, p. 842–849, May 1991.
- [60] KUGA, H. K. *Análise numérica preliminar dos métodos de estimação seqüencial*. São José dos Campos: INPE, 1982.
- [61] GENTLEMAN, W. M. Least squares computations by givens transformations without square roots. *Journal of the Institut of Mathematical Applications*, v. 12, p. 329–336, 1973.
- [62] HAMMARLING, S. A note on modifications to the Givens plane rotations. *Journal of the Institut of Mathematical Applications*, v. 13, p. 215–218, 1974.
- [63] DOPAZO, J. F.; KLITIN, O. A.; SASSON, A. M. State estimation for power systems: Detection and identification for gross measurements errors. In: *Proceedings of the IEEE PICA conference*. [S.l.: s.n.], 1973.

- [64] LOURENÇO, E. M. *Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- [65] DAUN, Z.; LI, X. R. The role of pseudo measurements in equality constrained state estimation. *IEEE Transactions on Electronic Systems*, v. 49, n. 3, p. 15–19, Julho 2013.
- [66] GJELSVIK, A.; AAM, A.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method: A rapid method for improving numerical stability in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, PAS-104, n. 6, p. 2987–2993, November 1985.
- [67] LOURENÇO, E. M.; SOUZA, L. B. de; SIMÕES COSTA, A. A unified approach for bad data and topology error identification in generalized state estimation. In: IEEE (Ed.). *16th PSCC*. Glasgow, Scotland, 2008. p. 1–7.
- [68] KEMA. *Metrics for Determining the Impact of Phasor Measurements on Power System State Estimation*. [S.l.], Jan 2006.
- [69] FINK, D. G.; BEATY, H. W. *Standard handbook of electrical engineering*. 15. ed. [S.l.]: Mc. Hill Professional, 2006. 2304 p.
- [70] GOMES-EXPOSITO, A.; JAEN, A. de la. Reduced substation models for generalized state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 16, n. 4, p. 839–846, November 2001.
- [71] CLEMENTS, K. A. Discussion of the paper: Hypothesis testing identification (L. Milli, Th. Van Cutsem and M. Ribbens-Pavella). *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-103, n. 11, p. 3239–3252, November 1984.
- [72] SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS, K. A. Power system topological observability analysis including switching branches. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 250–256, May 2002.
- [73] BEZ, D. M. *Estratégia em dois estágios utilizando rotações de Givens em blocos para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados em sistemas de potência*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Maio 2013.