

Estimação de Estado em Sistemas Eletricos de Energia

NUNO TIAGO DE SOUSA RIBEIRO PEREIRA

outubro de 2018

ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

Nuno Tiago de Sousa Ribeiro Pereira



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular de DSEE -
Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

Candidato: Nuno Tiago de Sousa Ribeiro Pereira Nº 1070171, 1070171@isep.ipp.pt

Orientação científica: Professor Doutor José António Beleza Carvalho, jbc@isep.ipp.pt

Coorientação científica: Professor Manuel João Dias Gonçalves, mdg@isep.ipp.pt



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2018

“Um caminho de mil quilómetros começa com o primeiro passo”

Lao Tse

Aos meus Pais, pelo sacrifício e dedicação.

Agradecimentos

Gostaria de começar por agradecer ao Professor Doutor José António Beleza Carvalho pela sua simpatia, permanente disponibilidade e dedicação, que sem a qual a realização deste trabalho não teria sido possível.

Ao Professor Manuel João Dias Gonçalves pelos esclarecimentos sobre Estimação de Estado, e pela bibliografia recomendada.

Aos meus Pais, Rodrigo e Maria Helena, pelo amor, sacrífico, apoio e dedicação em todos os momentos da minha vida.

À Lúcia, minha companheira, por toda a insistência, compreensão, paciência e apoio, nos momentos mais complicados.

Ao Milton Rodrigues, Moisés Silva, Ricardo Antunes, Francisco Rocha e João Ferreira, pela amizade e apoio em toda a minha carreira académica.

Finalmente, e não menos importante, gostaria de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, instituição onde efetuei a minha formação académica, pelas facilidades proporcionadas na conclusão deste trabalho, bem como em todo o meu percurso.

A todos, o meu muito obrigado.

Resumo

Os Sistemas Elétricos de Energia (SEE), são atualmente sistemas de grandes dimensões e enorme complexidade. Para ser possível uma monitorização rigorosa da segurança dos sistemas, os operadores devem conhecer em tempo real o estado do sistema do Sistema Elétrico de Energia que operam.

Tendo por base os dados disponíveis da rede, recorre-se à Estimação de Estado, para que de uma maneira rápida e fiável, seja possível obter uma “imagem” do estado do sistema.

O Estimador de Estado é um programa de cálculo numérico e estatístico, que processando um conjunto redundante de medidas provenientes da rede, permite calcular o vetor de estado e obter uma base de dados coerente e fiável que traduz o Estado do Sistema, tornando-se assim, um elemento preponderante na análise de segurança e funcionamento dos Centros de Operação e Controlo da Rede.

O principal objetivo do presente trabalho, consiste no desenvolvimento de um algoritmo de Estimação de Estado implementado na ferramenta MATLAB[®], onde são analisadas diversas redes de teste, e comparados os valores medidos com os valores “estimados” em diversas simulações adotando diferentes configurações de medidas.

O algoritmo desenvolvido permite estimar grandezas que efetivamente não são medidas, e avaliar o seu grau de confiança através de metodologias de Detecção e Identificação de erros Grosseiros.

Palavras-Chave

Erros Grosseiros, Estimação de Estado, Mínimos Quadrados Ponderados, Sistemas Elétricos de Energia.

Abstract

The Electrical Power Systems (EPS) are currently large systems with enormous complexity. In order to ensure strict system security monitoring, the operators must know in real time the state of the system of the Electrical Power System.

Based on the data available from the network, State Estimation (SE) is used, so that an estimated image of the Network can be obtained in a fast and reliable way.

The State Estimator is a numerical and statistical calculation program, which processes a redundant set of measurements and information from the network, allows the calculation of the state vector, and obtain a coherent and reliable database that translates the State of the System, which is a key element in the safety and operational analysis of the Operation and Control Centers.

The main objective of the present work is the development of a State Estimation algorithm implemented in MATLAB[®] tool, where several test networks will be analyzed, and where the measured values will be compared with the "estimated" values in several simulations.

The developed algorithm, will also allow to estimate quantities that are not effectively measured, and evaluate their degree of confidence through a routine of Detection and Identification of Gross Errors.

Keywords

Bad Data Identification, Electric Power Systems, State Estimation, Weighted Least Squares.

Índice

INTRODUÇÃO	3
1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	3
1.2 – OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	7
ESTIMAÇÃO DE ESTADO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA	11
2.1 – INTRODUÇÃO	11
2.2 – ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA	15
2.3 – APLICAÇÕES DA ESTIMAÇÃO DE ESTADO NOS SEE	17
2.4 – ESTRUTURA DE UM ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO	19
2.5 – MODELO MATEMÁTICO DE UM ESTIMADOR DE ESTADO E MODELIZAÇÃO DA REDE.....	22
2.5.1 – INTRODUÇÃO	22
2.5.2 – MODELO DE REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DE UM SEE ..	25
2.5.3 – MEDIDAS E EQUAÇÕES DE MEDIDA.....	27
2.5.4 – A PRECISÃO DAS MEDIDAS E O DESVIO PADRÃO σ_i	30
2.6 – CONCLUSÃO	36
MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO	39
3.1 – INTRODUÇÃO	39
3.2 – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS (WLS) – ALGORITMO BASE	39
3.2.1 – CRITÉRIOS DE ARRANQUE E PARAGEM.....	45
3.2.2 – DETERMINAÇÃO DE δ_x , δ_h e r : LINEARIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MEDIDA.....	47
3.2.3 – CONSTRUÇÃO DA MATRIZ JACOBIANA DE MEDIDA – $H(x)$	49
3.2.4 – ESTRUTURA DAS MATRIZES H e G	53
3.3 – MÉTODO DE FACTORIZAÇÃO ORTOGONAL	54
3.4 – MÉTODO DAS EQUAÇÕES NORMAIS COM RESTRIÇÕES	55
3.5 – MÉTODO DE HACHTEL’S DE MATRIZ AMPLIADA	56
3.6 – MÉTODO DE PETER E WILKINSON.....	57
3.7 – MÉTODO WLAV (WEIGHTED LEAST ABSOLUTE VALUE).....	58
3.8 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO BASEADA NA LOGICA FUZZY	60
3.9 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO RECORRENDO A PMU’s	62

3.9.1 – INCLUSÃO DAS MEDIDAS FASORIAIS NUM PROCESSO DE ESTIMAÇÃO ÚNICO	63
3.9.2 – UTILIZAÇÃO DE MEDIDAS FASORIAIS APÓS O PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO	66
3.10 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO PELO MÉTODO RÁPIDO BASEADO NO PRINCÍPIO DE DESACOPLAMENTO	70
3.10.1 – ESTIMADOR DESACOPLADO	70
3.10.2 – ESTIMADOR DE ESTADO LINEARIZADO. MODELO DC.....	75
3.11 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO DINÂMICA.....	79
3.12 – CONCLUSÃO	82
METODOLOGIAS DE DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	85
4.1- INTRODUÇÃO.....	85
4.2 – DEFINIÇÃO DE ERRO GROSSEIRO	88
4.3 – DETEÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	90
4.3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	90
4.3.2 – TESTE DO $J(\mathbf{x})$	93
4.3.3 – TESTE DOS RESÍDUOS NORMALIZADOS (R_N) E DOS RESÍDUOS PONDERADOS (R_W).....	95
4.3.4 – TESTE DA AMPLITUDE DO ERRO GROSSEIRO (b_i)	97
4.4 – IDENTIFICAÇÃO, ELIMINAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	98
4.4.1 – IDENTIFICAÇÃO POR ELIMINAÇÃO (IBE).....	99
4.4.2 – IDENTIFICAÇÃO POR CRITÉRIOS NÃO-QUADRATICOS (NQC).....	101
4.4.3 – IDENTIFICAÇÃO POR TESTE DE HIPÓTESES (HTI)	103
4.5 – CONCLUSÃO	105
TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS	109
5.1 – INTRODUÇÃO	109
5.2 – CARACTERÍSTICAS DE SIMULAÇÃO	110
5.2.1 – METODOLOGIAS ADOTADAS NAS SIMULAÇÕES	110
5.2.2 – ALGORITMO IMPLEMENTADO.....	113
5.3 – REDES DE TESTE UTILIZADAS E CONFIGURAÇÕES DE MEDIDA	116
5.3.1 – CONFIGURAÇÕES DE MEDIDA	119
5.4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	121
5.4.1 – REDE DE TESTE IEEE DE 14 BARRAMENTOS	121

5.4.2 – REDE DE TESTE IEEE DE 118 BARRAMENTOS	157
5.5 – CONCLUSÃO	186
DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	191
6.1 – DETEÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	191
6.2 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS	201
6.3 – CONCLUSÃO	212
CONCLUSÕES.....	217
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223
ANEXO A.....	237
ANEXO B.....	238
ANEXO C.....	241

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Diagrama de estado de um sistema de operação de energia [2].....	4
Figura 1.2 – Diagrama de transição de estados do sistema [3].....	5
Figura 2.1 – Conceito de Estimação de Estado (EE).....	11
Figura 2.2 – A Estimação de Estado no funcionamento do SEE [12].....	13
Figura 2.3 – A estimação de estado e análise de segurança de um SEE [5].....	14
Figura 2.4 – Objectivo de um estimador de estado estático.	19
Figura 2.5 – Algoritmo desenvolvido de um estimador de estado em SEE[5].	21
Figura 2.6 – Entradas e saídas de um estimador de estado estático.	22
Figura 2.7 – Esquema equivalente em π de uma linha ou de um transformador.....	25
Figura 2.8 – Esquema equivalente em π de uma linha.	26
Figura 2.9 – Esquema equivalente de um transformador com tomadas.....	26
Figura 2.10 – Cadeia de transmissão de medidas [53].	31
Figura 2.11 – Estrutura geral das funções de um Estimador de Estado em SEE [7].....	35
Figura 3.1 – Algoritmo de Gauss-Newton aplicado na estimação de estado pelo método WLS.....	44
Figura 3.2 – Algoritmo de estimação de estado integrando conceitos de lógica fuzzy.....	61
Figura 3.3 – Blocos de um sistema PMU associado a Sistema de Energia [72].	62
Figura 3.4 – Representação de EE com integração de PMU's e medidas convencionais [64].	63
Figura 3.5 – Representação de EE em que se incorpora PMU's após realização do processo de EE convencional [64].....	66
Figura 3.6 – Fluxograma exemplificativo de implementação de um algoritmo de EE que representa a abordagem em que se incorpora medidas provenientes de PMU's após realização do processo de EE convencional [64].	69
Figura 3.7 – Fluxograma de um estimador desacoplado (FDSE) [81].....	78
Figura 3.8 – Etapas de previsão e filtragem de um estimador dinâmico baseado no filtro de Kalman [8].....	81
Figura 4.1 – Regiões de aceitação e rejeição associadas a um teste unilateral.....	93
Figura 4.2 – Teste do $J(x)$ para um pequeno número de graus de liberdade (gráfico da esquerda), e para um elevado número de graus de liberdade (gráfico da direita).	95
Figura 4.3 – Teste dos resíduos normalizados rN	96

Figura 4.4 – Teste de rN e rW (rP).....	97
Figura 4.5 – Funções de custo não quadráticas utilizadas nos estimadores BDS (“Bad Data Supression”)	103
Figura 4.6 – Fluxograma sucinto do procedimento HTI.	104
Figura 5.1 – Rede construída em PowerWorld Simulator® respeitante à rede IEEE de 14 barramentos	117
Figura 5.2 – Rede construída em PowerWorld Simulator® respeitante à rede IEEE de 118 barramentos.	118
Figura 5.3 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1A.	124
Figura 5.4 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1A.	124
Figura 5.5 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1B.	128
Figura 5.6 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1B.	128
Figura 5.7 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1C.	132
Figura 5.8 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1C.	132
Figura 5.9 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C (Real vs Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.	134
Figura 5.10 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C (Real vs Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.	134
Figura 5.11 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C – Rede IEEE 14 Barramentos.	135
Figura 5.12 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C – Rede IEEE 14 Barramentos.	136

Figura 5.13 – Características de convergência dos testes 14C1A, 14C1B e 14C1C - Rede IEEE 14 Barramentos.	137
Figura 5.14 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas.	138
Figura 5.15 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2A.	142
Figura 5.16 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2A.	142
Figura 5.17 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2B.	146
Figura 5.18 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2B.	146
Figura 5.19 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2C.	150
Figura 5.20 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2C.	150
Figura 5.21 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C (Real vs. Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.	152
Figura 5.22 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C (Real vs. Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.	152
Figura 5.23 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C – Rede IEEE 14 Barramentos.	153
Figura 5.24 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C – Rede IEEE 14 Barramentos.	154
Figura 5.25 – Características de convergência dos testes 14C1A, 14C1B e 14C1C - Rede IEEE 14 Barramentos.	155
Figura 5.26 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas (14C2A, 14C2B e 14C2C).	156

Figura 5.27 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C1.	167
Figura 5.28 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C1.	168
Figura 5.29 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C2.	178
Figura 5.30 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C2.	179
Figura 5.31 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 (Real vs Estimado) – Rede IEEE 118 Barramentos.	181
Figura 5.32 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 (Real vs Estimado) – Rede IEEE 118 Barramentos.	181
Figura 5.33 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 – Rede IEEE 118 Barramentos.	182
Figura 5.34 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 – Rede IEEE 118 Barramentos.	183
Figura 5.35 – Características de convergência dos testes 118C1 e 118C2 - Rede IEEE 118 Barramentos.	184
Figura 5.36 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas (118C1 e 118C2).	185
Figura 6.1 – Comparação dos erros de estimação no vetor de estado para a configuração 14C1A (Com e sem erros grosseiros).	206
Figura 6.2 – Comparação dos erros de estimação no vetor de estado para a configuração 14C2A (Com e sem erros grosseiros).	211
Figura B.1 – Esquema unifilar da rede de teste IEEE de 14 Barramentos.	238
Figura C.1 – Esquema unifilar da rede de teste IEEE de 118 Barramentos.	241

Índice de Tabelas

Tabela 4.1 – Tabela de decisão para um teste de hipóteses.....	92
Tabela 5.1 – Características da Rede IEEE de 14 Barramentos	116
Tabela 5.2 – Características da Rede IEEE de 118 Barramentos	117
Tabela 5.3 – Configurações de medida para a rede de 14 barramentos e redundância de 1.78.	119
Tabela 5.4 – Configurações de medidas para a rede de 14 barramentos e redundância de 2.22.	120
Tabela 5.5 – Configurações de medidas para a rede de 118 barramentos.	120
Tabela 5.7 – Configurações de medida 14C1A (rede de 14 barramentos).....	121
Tabela 5.8 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1A.	122
Tabela 5.9 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1A.	123
Tabela 5.10 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1A.	123
Tabela 5.11 – Configurações de medida 14C1B (rede de 14 barramentos)	125
Tabela 5.12 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1B.....	126
Tabela 5.13 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1B.	126
Tabela 5.14 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1B.	127
Tabela 5.15 – Configurações de medida 14C1C (rede de 14 barramentos)	129
Tabela 5.16 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1C.....	130
Tabela 5.17 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1C.	130
Tabela 5.18 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1C.	131
Tabela 5.19 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C.	133
Tabela 5.20 – Configurações de medida 14C2A (rede de 14 barramentos).....	139
Tabela 5.21 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2A.	140

Tabela 5.22 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2A.	140
Tabela 5.23 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2A.	141
Tabela 5.24 – Configurações de medida 14C2B (rede de 14 barramentos).....	143
Tabela 5.25 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2B.....	144
Tabela 5.26 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2B.	144
Tabela 5.27 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2B.	145
Tabela 5.28 – Configurações de medida 14C2C (rede de 14 barramentos).....	147
Tabela 5.29 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2C.....	148
Tabela 5.30 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2C.	148
Tabela 5.31 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2C.	149
Tabela 5.32 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C.	151
Tabela 5.33 – Configurações de medida 118C1 (rede de 118 barramentos).....	158
Tabela 5.34 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C1.	160
Tabela 5.35 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C1.	163
Tabela 5.36 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 118C1.	166
Tabela 5.37 – Configurações de medida 118C2 (rede de 118 barramentos).....	169
Tabela 5.38 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C2.	171
Tabela 5.39 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C2.	174
Tabela 5.40 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 118C2.	177
Tabela 5.41 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 118C1 e 118C2.....	180
Tabela 5.42 – Análise da esparsidade da matriz jacobiana de medida $H(x)$	187
Tabela 5.43 – Resumo dos comportamentos dos sistemas avaliados.....	188
Tabela 6.1 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida V6 – Configuração 14C1A.	193

Tabela 6.2 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida P2 – Configuração 14C1A.....	194
Tabela 6.3 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida Q4-5 – Configuração 14C1A.....	195
Tabela 6.4 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida V6 – Configuração 14C2A.....	196
Tabela 6.5 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida P2 – Configuração 14C2A.....	197
Tabela 6.6 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida Q4-5 – Configuração 14C2A.....	198
Tabela 6.7 – Resumo das amplitudes de detecção de erros grosseiros, para as configurações 14C1A e 14C2A e respectivas medidas afetadas.	199
Tabela 6.8 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 1º ciclo.....	202
Tabela 6.9 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 1º ciclo	203
Tabela 6.10 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 2º ciclo.....	203
Tabela 6.11 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 2º ciclo	203
Tabela 6.12 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 3º ciclo.....	204
Tabela 6.13 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 3º ciclo	204
Tabela 6.14 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 4º ciclo.....	205
Tabela 6.15 – Erros de estimação (Médio e Máximo) no vetor de estado estimado.....	205
Tabela 6.16 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 1º ciclo.....	207
Tabela 6.17 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 1º ciclo	207
Tabela 6.18 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 2º ciclo.....	208
Tabela 6.19 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 2º ciclo	208
Tabela 6.20 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 3º ciclo.....	209
Tabela 6.21 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 3º ciclo	209
Tabela 6.22 – Valores de $J(x)$ e Jx/χ^2 para o 4º ciclo.....	209
Tabela 6.23 – Erros de estimação (Médio e Máximo) no vetor de estado estimado.....	210
Tabela A.1 – Equações das etapas de previsão e filtragem do filtro de Kalman.....	237
Tabela B.1 – Dados e resultados do trânsito de potências – Rede IEEE de 14 Barramentos.	239
Tabela B.2 – Dados das linhas – Rede IEEE de 14 Barramentos.	239
Tabela B.3 – Dados dos transformadores – Rede IEEE de 14 Barramentos.....	240

Tabela C.1 – Dados e resultados do trânsito de potências – Rede IEEE de 118 Barramentos.....	242
Tabela C.2 – Dados das linhas – Rede IEEE de 118 Barramentos.	245
Tabela C.3 – Dados dos transformadores – Rede IEEE de 118 Barramentos.....	249
Tabela C.4 – Dados dos shunts do sistema – Rede IEEE de 118 Barramentos.....	249
Tabela C.5 – Dados dos barramentos com regulação – Rede IEEE de 118 Barramentos.	250

Lista de Símbolos e Acrónimos

Durante a escrita da dissertação, todos os símbolos utilizados encontram-se definidos e caracterizados no próprio local do texto em que são referidos pela primeira vez. Todavia, tendo em vista o facilitar da leitura desta dissertação, apresenta-se a lista dos símbolos e abreviaturas mais utilizados. Relativamente à notação adotada na estimação de estado de Sistemas Elétricos de Energia, é de salientar que, qualquer grandeza estimada será afetada por um acento circunflexo (^).

x :	Vetor de estado do Sistema Elétrico de Energia, $x = [\theta, V]^T$
\hat{x} :	Estimativa do vetor de estado x
θ_i :	Fase da tensão no barramento i
V_i :	Módulo da tensão no barramento i
\underline{Y} :	Matriz das admitâncias da rede
\underline{Y}_{ij} :	Elemento da linha i , coluna j de \underline{Y} , $\underline{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$
P_i :	Potência ativa injetada no barramento i
Q_i :	Potência reativa injetada no barramento i
P_{ij} :	Trânsito de potência ativa no ramo que liga os barramentos i e j
Q_{ij} :	Trânsito de potência reativa no ramo que liga os barramentos i e j
z :	Vetor das medidas efetuadas no sistema
z_P :	Vetor de medidas ativas
z_Q :	Vetor de medidas reativas
$h(.)$:	Vetor das funções não lineares que relacionam as medidas com as variáveis de estado
$h_P(.)$:	Vetor das funções não lineares que relacionam as medidas ativas com as variáveis de estado
$h_Q(.)$:	Vetor das funções não lineares que relacionam as medidas reativas com as variáveis de estado
H :	Matriz Jacobiana de h relativamente a x

$HP\theta$:	Matriz Jacobiana de hP relativamente a θ
HPV :	Matriz Jacobiana de hP relativamente a V
$HQ\theta$:	Matriz Jacobiana de hQ relativamente a θ
HQV :	Matriz Jacobiana de hQ relativamente a V
G :	Matriz de ganho (algoritmo de Gauss)
R :	Matriz covariância do ruído de medida, $R = \text{diag}(\sigma_i)$
RP :	Matriz covariância do ruído que afeta as medidas ativas zP
RQ :	Matriz covariância do ruído que afeta as medidas reativas zQ
e :	Vetor do ruído total de medida
v :	Vetor do ruído (normal) de medida
b :	Vetor dos erros grosseiros de medida
N :	Número de barramentos da rede
m :	Número total de medidas efetuadas na rede
m_1 :	Número total de medidas do tipo P_{ij} e P_i
m_2 :	Número total de medidas do tipo Q_{ij} , Q_i e V
n :	Número de variáveis de estado do sistema, $n = 2N-1$
η :	Redundância de medida, $\eta = m / n$
$J(x)$:	Função de custo
r :	Vetor dos resíduos de medida
r_N :	Vetor dos resíduos normalizados de medida
r_W :	Vetor dos resíduos ponderados de medida
W :	Matriz sensibilidade dos resíduos aos erros de medida
Σ :	Matriz covariância do erro de estimação para o vetor x
$\text{cov}(a)$:	Matriz covariância de a
$\text{var}(a)$:	Variância de a
$a \sim N(\mu_a, \Sigma_x)$:	Variável aleatória gaussiana (normal) de valor médio μ_a e matriz covariância Σ_x
$a \sim \chi^2$:	Variável aleatória com distribuição qui-quadrado
A^T :	Matriz transposta de A

A^{-1} :	Matriz inversa de A
$diag(a_i)$:	Matriz diagonal cujo termo (i,j) é igual a a_i
α :	Probabilidade de incorrer num erro tipo I (teste de hipóteses)
β :	Probabilidade de incorrer num erro tipo II (teste de hipóteses)
N_{it} :	Número de iterações necessárias à obtenção da convergência
K :	Matriz de ganho do filtro de Kalman
SEE :	Sistema Elétrico de Energia
WLS :	Método dos mínimos quadrados ponderados
WLAV :	Método dos mínimos valores absolutos ponderados
FDSE :	Estimador de estado desacoplado
IBE :	Metodologia de identificação de erros grosseiros por eliminação
NQC :	Metodologia de identificação de erros grosseiros por critérios não quadráticos
HTI :	Metodologia de identificação de erros grosseiros por teste de hipótese
CC :	Centro de controlo
OPF :	Fluxo de potência ótimo
SCADA:	Sistemas de supervisão, controlo e aquisição de dados
PMU:	Unidade de Medição Fasorial

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos finais do séc. XIX e inícios do séc. XX, Edison, Westinghouse e Tesla foram os principais impulsionadores e responsáveis pela produção e utilização da energia elétrica na forma que hoje conhecemos.

Marco importante na história foi a inauguração a 4 de Setembro de 1882 por Edison, em Nova Iorque, da primeira central de produção e distribuição de eletricidade, denominada *Pearl Street Central Station* [1]. Esta central de produção de energia, pela novidade implementada aliada à sua fiabilidade, segurança e eficiência de distribuição, adquiriu grande sucesso conseguindo competir com os preços praticados na iluminação a gás existentes na época.

Desde esse tempo, os Sistemas Elétricos de Energia (SEE) transformaram-se, e aumentaram de tamanho e complexidade, sendo a sociedade atual fortemente dependente desta forma de energia. Sectores como a utilização doméstica, transportes e indústria, através da sua rápida expansão, e evolução tecnológica a que se assistiu, assim como a rápida expansão das redes, vieram colocar novos desafios na exploração dos SEE, originando uma maior complexidade e impondo necessidades de interligação das diversas redes, originando SEE de grandes dimensões e cada vez mais complexos.

Evoluindo em dimensão e complexidade ao longo do tempo, os SEE tem que fazer face a diversos problemas de segurança, condução e exploração cada vez mais exigentes, uma vez que os intervenientes no setor liberalizado do mercado energético, agora mais orientados para objetivos comerciais e não técnicos, requerem cada vez mais informações sobre o desempenho do sistema. Este novo paradigma coloca, por isso, mais exigências técnicas e financeiras com vista a operar de forma fiável, robusta e eficiente os SEE.

Por forma a cumprir os objetivos anteriormente descritos, é realizado nos Centros de Controlo um diversificado conjunto de atividades que envolvem etapas de planeamento e exploração (incluindo a supervisão e controlo em tempo real do sistema), originando o denominado Sistema Gestor de Energia (EMS – *Energy Management System*).

É da responsabilidade dos Centros de Controlo e Condução (CC), o cumprimento de todas as exigências descritas, garantindo desta forma o funcionamento do sistema num estado fiável e seguro.

Dy Liacco, estabeleceu num artigo publicado em 1967 [2], os diferentes estados em que o sistema pode residir tendo por base as restrições abordadas anteriormente. Com a alteração das condições de funcionamento, o sistema pode estar num de três estados possíveis: normal, de emergência e restabelecimento como representado na Figura 1.1.

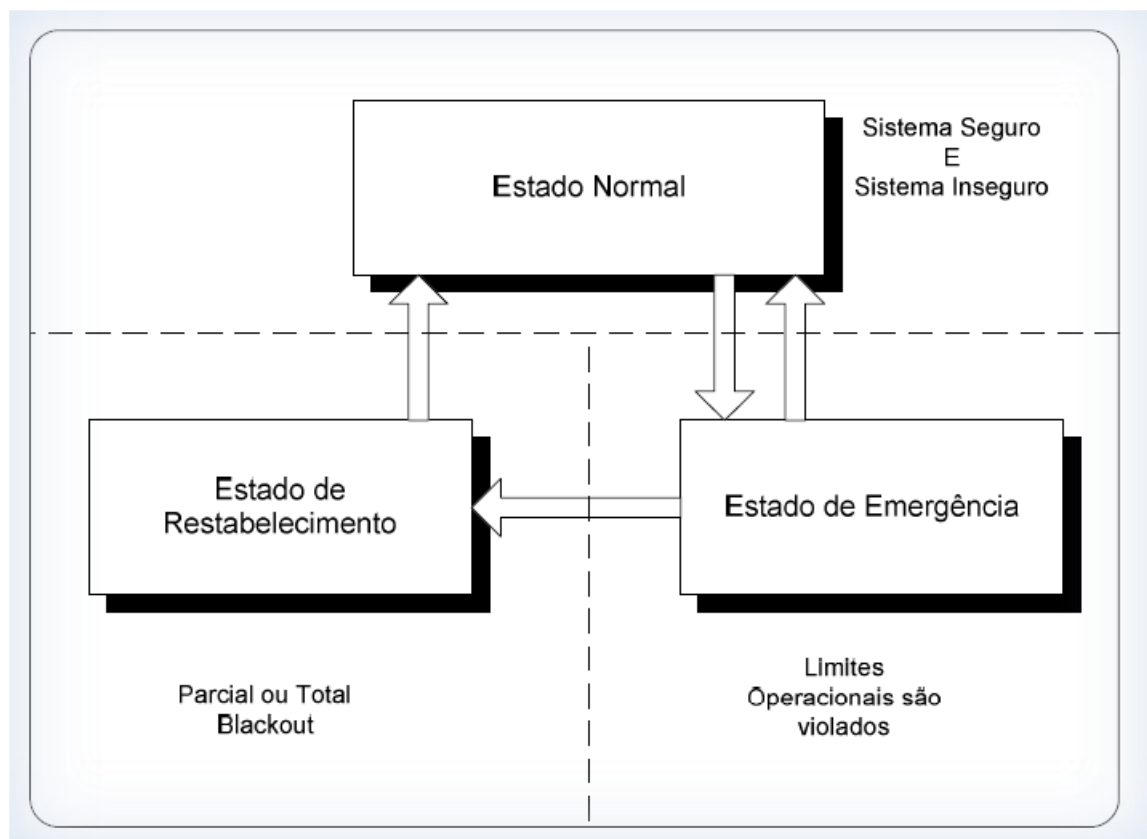


Figura 1.1 - Diagrama de estado de um sistema de operação de energia [2].

Fink e Carlsen [3] definiram o diagrama de transição de estados a partir dos estados definidos por Dy Liacco que se apresenta na Figura 1.2.

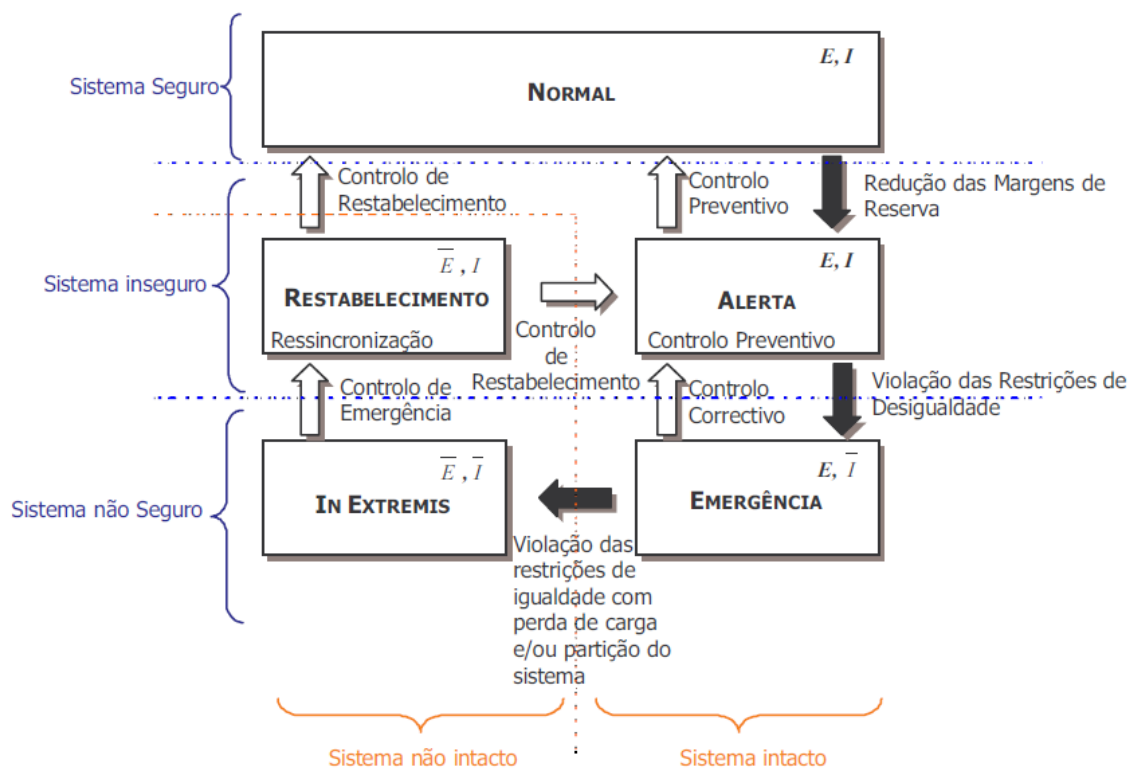


Figura 1.2 - Diagrama de transição de estados do sistema [3].

A função dos Centros de Controlo e Condução (CC) é monitorizar e conduzir em segurança o SEE, tendo para isso de recorrer ao uso da mais avançadas tecnologias informáticas que permita em tempo real analisar e processar a informação proveniente da rede através do sistema SCADA por forma a ter uma imagem o mais real possível do sistema. Dadas as grandes dimensões das redes, recorre-se a simulações computacionais do desempenho estático e dinâmico dos SEE, uma vez que a informação recebida apesar de ser em tempo real, permite apenas numa primeira fase uma pré-filtragem da informação através de verificações elementares (verificações e comparações de valores medidos de determinadas grandezas com níveis de alarme pré-definidas), inviabilizando uma verdadeira análise da segurança do SEE.

Os estimadores de estado (EE) são parte essencial de qualquer CC, pois através das medidas obtidas na rede (recorrendo a Sistemas SCADA na sua grande maioria e a PMU's mais recentemente), permitem obter uma base de dados completa, coerente e fiável, que disponibilizará aos operadores, uma estimativa fiável do estado do sistema, permitindo a condução segura do mesmo.

A estimação de estado é um órgão vital dos centros de controlo, sendo que a optimalidade de qualquer função executada nos CC, como despacho económico, Trânsitos de Potencia Ótimos (OPF) e análise de segurança, estão intimamente ligados aos resultados obtidos pelo estimador de estado [4].

Deste modo, tendo em vista ao bom funcionamento dos SEE, as bases de dados construídas atualmente, têm proveniência num conjunto redundante de telemedidas, digitais e analógicas, que compõe o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*).

Com a constante evolução tecnológica e dando resposta às novas exigências impostas pelos SEE, surgiram outros sistemas de obtenção de medidas, destacando-se o sistema que utiliza o uso das Unidades de Medição Fasorial, mais conhecidas como PMUs (*Phasor Measurement Units*).

As PMUs permitem a realização da medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes por utilizarem uma fonte de sincronização, através do sistema GPS (Global Positioning System), conseguem uma taxa de amostragem até 60 medidas por segundo e com elevada precisão angular, preenchendo assim os requisitos da maioria das aplicações de monitorização e controlo. Tais características vêm ao encontro das necessidades tecnológicas atuais, e representam um novo paradigma para a supervisão e controlo do sistema em tempo real [5].

A utilização de medidas provenientes da rede e que são efetuadas por equipamentos sujeitos a erros instrumentares e a outros erros associados com a sua transmissão para os CC, tornam o conjunto das medidas vulnerável, deixando os Centros de Condução expostos a perturbações, uma vez que ao serem utilizadas pelo EE, provocam um impacto significativo na qualidade dos resultados obtidos [6].

Desta forma, para que a informação recolhida da rede seja devidamente validada para utilização pelo estimador de estado, utilizam-se rotinas de deteção e identificação de erros grosseiros na informação que chega ao centro de controlo, para que a base de dados obtida pelo EE seja confiável, podendo assim ser usada de forma segura na tomada de decisões nos Centros de Controlo dos SEE.

1.2 - OBJETIVOS E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho desenvolvido na presente dissertação está intimamente relacionado com o controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia. Conforme referido anteriormente, a Estimação de Estado aplicada aos SEE, tem como principal objetivo obter informação fidedigna para que seja possível ao decisor conhecer o estado do SEE, tendo em vista a sua correta condução, cumprindo com as normas de segurança pré-estabelecidas e da forma mais económica possível. Para tal, é necessário possuir a cada momento informação fidedigna sobre o verdadeiro estado do sistema.

O principal objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento de um algoritmo de Estimação de Estado implementado na ferramenta MATLAB®, onde são analisadas diversas redes de teste, sendo comparados os valores medidos com os valores “estimados” após as diversas simulações, explorando o comportamento do estimador para um conjunto típico de medidas, trânsitos e injeções de potências, bem como a deteção e identificação de erros grosseiros.

A presente dissertação, incluindo este capítulo de introdução ao problema, encontra-se dividida em 7 Capítulos:

- No segundo capítulo é feita uma abordagem do problema da Estimação de Estado, e é apresentado o estado da arte do tema. Apresenta-se a estrutura de um estimador de estado estático e é analisada a formulação matemática do estimador em SEE.
- No terceiro capítulo apresentam-se alguns dos algoritmos e metodologias mais utilizados na EE aplicada em SEE.
- No quarto capítulo é desenvolvida a temática que consiste na Deteção e Identificação de Erros Grosseiros.
- No quinto capítulo é apresentado o algoritmo desenvolvido e são apresentados os resultados obtidos, bem como é efetuada a devida análise aos mesmos.
- No sexto capítulo apresentam-se os resultados obtidos aplicando os conceitos estudados de Deteção e Identificação de Erros Grosseiros.
- Por fim, o sétimo capítulo apresenta as conclusões do trabalho realizado e deixam-se algumas indicações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

Capítulo 2

ESTIMAÇÃO DE ESTADO NOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE ENERGIA

2.1 - INTRODUÇÃO

A Estimação de Estado é uma ferramenta informática fundamental na análise e controlo dos Sistemas Eléctricos de Energia [4, 8]. A mesma tem como objetivo, o cálculo do valor mais aproximado possível das variáveis de estado do sistema a partir da informação disponível obtida pelas diferentes aparelhagens de medida, através do processamento de um conjunto redundante de medidas [9]. A operação e condução de um SEE obriga à obtenção de informações sobre o sistema, sendo que o EE obtém bases de dados com alguma precisão onde nas mesmas constam os valores complexos das tensões em todos os barramentos da rede, dá a conhecer os trânsitos de potências ativas e reativas em todas a linhas bem como as potências geradas nos diferentes barramentos.

Na reestruturação do setor eléctrico, e a conseqüente liberalização que engloba os vários participantes do mercado de energia eléctrica, a Estimação de Estados assume um papel ainda mais importante. Este novo contexto contrapõe a crescente exigência de garantia da segurança na condução da rede que é da responsabilidade do operador do sistema, a tendência de uma cada vez menor disponibilidade, em tempo útil, de informações relativas ao desempenho operacional das empresas intervenientes no mercado energético [10].

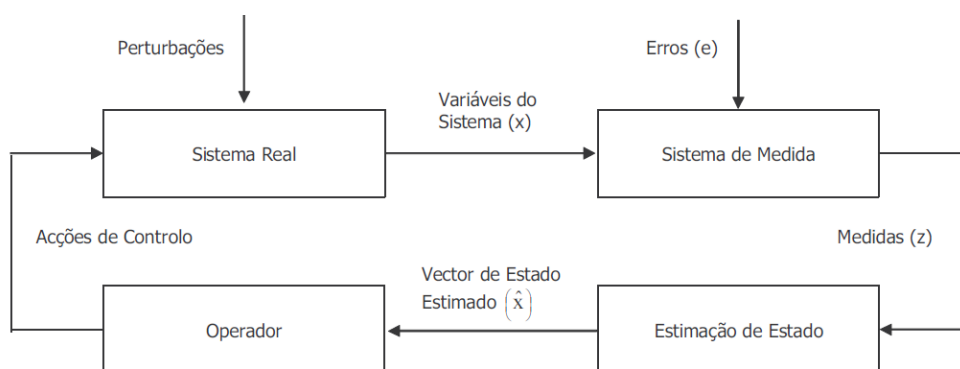


Figura 2.1 - Conceito de Estimação de Estado (EE).

Uma vez que o conjunto de medidas recolhidas podem estar contaminadas por erros, o estimador de estado propicia a correção destes dados, através de metodologias de deteção e identificação e eliminação de erros grosseiros. O estimador pode também ser dotado de ferramentas de análise da observabilidade com vista a avaliação da qualidade da base de dados utilizada.

Das possíveis causas para a existência dos erros salientam-se as seguintes:

- Ruído proveniente do equipamento de medida e transmissão da informação;
- Má calibração dos aparelhos;
- Falta de leituras por avarias no sistema;
- Erros nos valores assumidos nos parâmetros da rede;
- Erros na topologia assumida para a rede;
- Não simultaneidade das medidas;
- Medidas efetuadas durante fenómenos transitórios;
- Modelos matemáticos imprecisos;
- Erros devido a assimetrias no sistema;

De forma a compensar a existência destes erros, utilizam-se alguns tipos de informação disponíveis nos CC no algoritmo de estimação de estado, nomeadamente [11]:

a) Medidas em tempo Real;

- ◆ *Medidas analógicas*: módulos das tensões nos barramentos, potências injetadas e potências que transitam nos ramos da rede (ativas e reativas).
- ◆ *Pseudomedidas*: valores obtidos através do registo histórico existente no CC (previsões de carga a curto prazo, repartição das cargas pelos geradores, experiência dos operadores, etc...).
- ◆ *Medidas lógicas*: informação do estado dos seccionadores e disjuntores (aberto/fechado), permitindo o conhecimento da configuração da rede.
- ◆ *Medidas virtuais*: potências injetadas (de valor nulo) em barramentos sem produção e sem carga.

- b) Redundância no conjunto de valores medidos.
- c) Modelo matemático do sistema.
- d) Processamento estatístico dos erros de medida.

Deste modo, se o conjunto de medidas for em quantidade suficiente e bem distribuídos geograficamente na rede, o algoritmo estimador de estado apresentará uma fiel estimativa do estado real do sistema (na ausência de erros grosseiros). Verdadeiramente, este é o real objetivo do estimador de estado. Desta forma a EE define-se como uma metodologia que recorrendo a dados recolhidos em tempo real, organiza e trabalha os dados recorrendo a métodos estatísticos, e cria uma base de dados completa, coerente e fiável do SEE em análise.

Assim, o estimador permite um melhor conhecimento das possibilidades do sistema, facilita a tomada de decisões, reduzindo o tempo em situações críticas e minimiza o risco de decisões erradas que coloquem em causa toda a segurança do sistema.

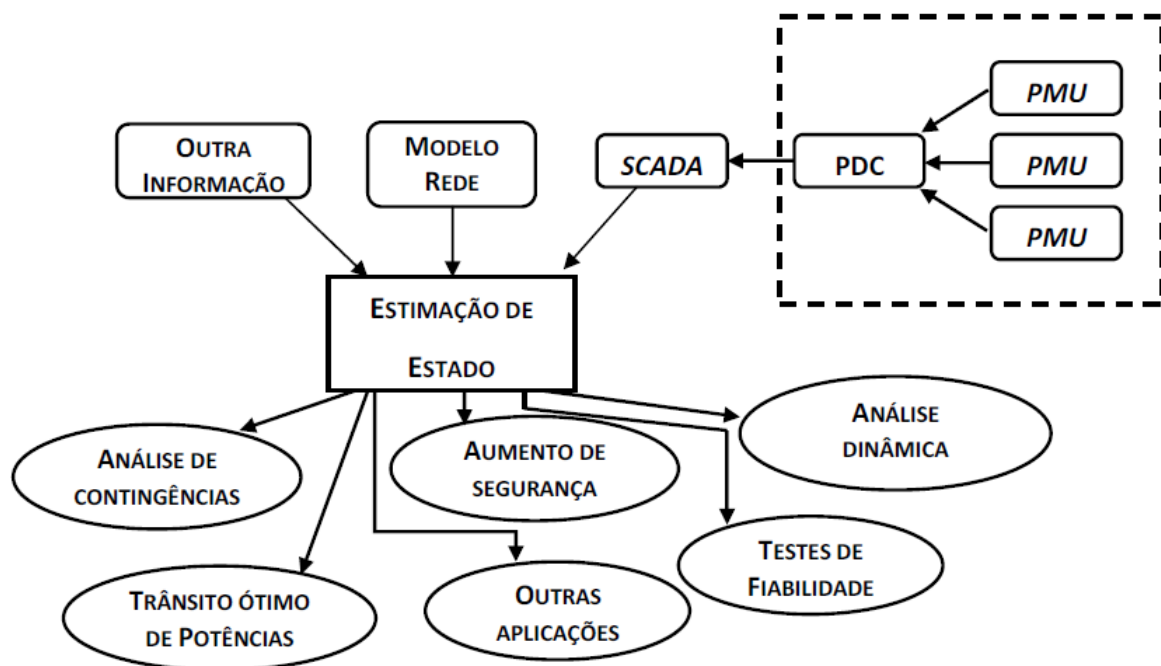


Figura 2.2 - A Estimação de Estado no funcionamento do SEE [12].

Na figura 2.3, é representada a relação existente entre a análise de segurança de um SEE e a estimação de estado, onde se representam as ligações funcionais e de dados entre as várias aplicações envolvidas no processo de análise de segurança.

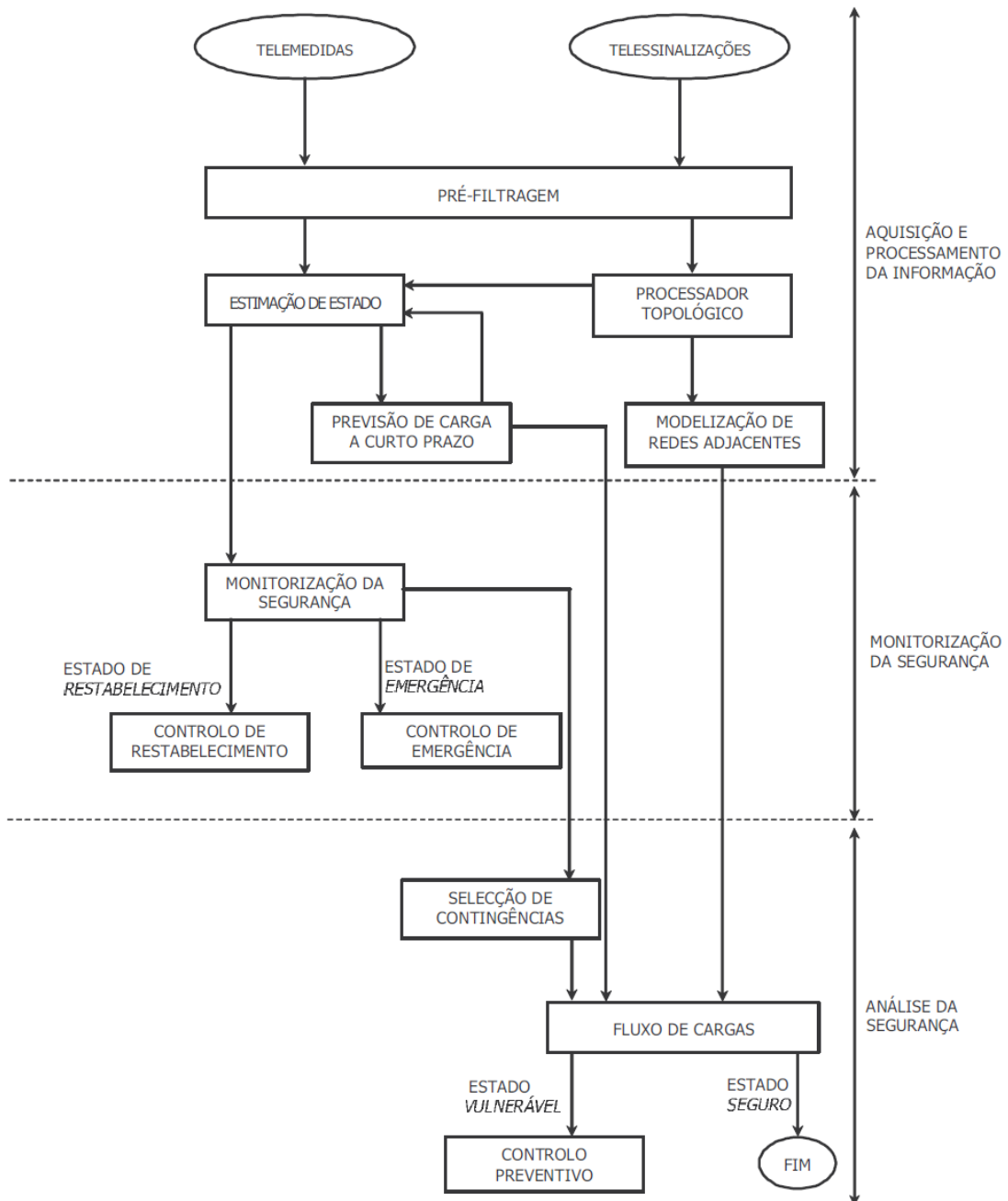


Figura 2.3 - A estimação de estado e análise de segurança de um SEE [5].

2.2 – ENQUADRAMENTO DO PROBLEMA

Com o crescente aumento do consumo de energia elétrica originado pelo constante desenvolvimento tecnológico e económico a nível mundial, é então fundamental que se desenvolvam tecnologias e sistemas que permitam garantir uma produção, transmissão e distribuição de energia de modo eficiente, de qualidade, e com elevados níveis de sustentabilidade. É essencial conhecer o sistema e as suas formas de operação por forma a garantir a operacionalização estável do sistema, mesmo quando se manifestam contingências de diversas naturezas. A eficiência de monitorização e segurança, são palavras-chave quando nos referimos à condução dos SEE.

Desta forma, é imperativo que os Centros de Condução e Controlo disponham de sistemas que permitam verificar e supervisionar a rede: Sistemas de Monitorização, Obtenção de dados e Estimadores de Estado. Assim, duas das tarefas com maior relevância nos CC de um moderno SEE são a obtenção da rede de grandezas em tempo real e a estimação de uma base de dados coerente e fiável obtida através do processamento destas mesmas medidas. Após a recolha das referidas medidas, o estimador de estado inicialmente realiza uma filtragem do ruído proveniente das leituras ou anomalias existentes, e em consonância com o modelo da rede, estima um vetor do estado do sistema, onde são apresentados no final os valores de amplitudes e fases das tensões nos diferentes barramentos. Por fim, o vetor de estado estimado (corrigido) é utilizado pelas diversas funções de monitorização de condução e segurança dos Centros de Controlo do SEE.

Tendo em vista a apresentação da evolução da estimação de estado em SEE, é efetuado seguidamente um pequeno histórico dos diversos trabalhos desenvolvidos na literatura acerca desta temática, salientando as contribuições mais relevantes.

O início do estudo da estimação de estado é atribuído a Schweppe, e aos seus colegas do MIT, onde em 1970 publicaram os primeiros artigos sobre o assunto [13, 14, 15]. Todavia, o método implementado inicialmente por Schweppe não foi utilizado de imediato pelas empresas do sector da energia, sendo adotados primeiramente métodos alternativos [16, 17, 18, 19]. Após alguns anos passados, os métodos adotados foram substituídos por uma versão melhorada, apoiada na versão original de Schweppe, sendo a mesma largamente aceite pela comunidade científica e pelos gestores dos diversos SEE [20]. A estimação de estado foi então, alvo de um alargado estudo, onde se debruçaram vários investigadores de diversas

geografias do globo, onde os mesmos estabeleceram a formulação polar do método dos mínimos quadrados ponderados como um método com boas respostas no que diz respeito à fiabilidade e precisão dos resultados obtidos para estimação de estado em SEE [13-15, 18, 21-24]. Importa salientar que nos variados algoritmos estudados na literatura, os mesmos tem sempre pontos essenciais de avaliação. São eles, a precisão numérica do estimador, a velocidade de cálculo e a robustez numérica dos algoritmos. Como se pode constatar em [25], a relação entre a velocidade de cálculo e a robustez numérica são muito conflituosos.

É de fácil aferição na literatura que existem variadas formas para a utilização e implementação dos algoritmos de estimação de estado. A grande maioria dos trabalhos publicados, abordam o problema não tendo em consideração a dinâmica do sistema, isto é, consideram o sistema como sendo estático, onde se admite o funcionamento do SEE em “regime permanente” de funcionamento [13, 24, 26, 27-30]. Apareceram também outros métodos variantes do método WLS clássico, que propõem alterações ao mesmo tentando obter melhorias no que diz respeito à robustez numérica, alterando o método iterativo das equações normais, por outros como por exemplo da utilização de transformações ortogonais [31]. Ao longo dos anos foram também publicados outros métodos inovadores, onde se aplicaram diferentes metodologias e se integraram formulações diferentes, sendo alguns exemplos as aplicações dos métodos de Peters e Wilkinson [25], o método de Hachtel [32], o estudo dos métodos LAV (Least Absolute Value) [33] e WLAV (Weighted Least Absolute Value) [34-36], bem como do surgimento dos estimadores desacoplados, que vieram trazer melhorias significativas no que diz respeito à utilização de memória e à rapidez de cálculo [37-39].

Como na realidade o sistema adquire raramente um ponto de operação estático em regime permanente (as cargas e produção estão em constante alteração de acordo com as solicitações do momento), surgiu também a abordagem do estudo da alteração do vetor estado no tempo, dando origem à estimação de estado dinâmica, estimação essa, muito mais evoluída e computacionalmente mais pesada [40-42]. Uma vez que existem muitas dificuldades na obtenção da “matriz transição de estado”, cuja função é representar a dinâmica dos SEE, a utilização dos estimadores estáticos tem maior preponderância em detrimento dos estimadores dinâmicos.

2.3 - APLICAÇÕES DA ESTIMAÇÃO DE ESTADO NOS SEE

A utilização de algoritmos de estimação de estado é determinada principalmente por quatro aspetos fundamentais [43]:

1. Garantia de um controlo mais eficiente do sistema, dada a utilização em tempo real de uma base de dados coerente e fiável, utilizada para análises de segurança “on-line”.
2. Detecção de anomalias, diagnóstico de defeitos, etc., o que vai permitir nomeadamente:
 - Melhor conhecimento das capacidades do sistema;
 - Maior facilidade na tomada de decisões;
 - Maior rapidez na tomada de decisões em situações críticas;
 - Menor risco de tomar decisões erradas;
 - Detecção de avarias nos equipamentos de medida.
3. Implementação de ações de controlo, minimizando as exigências de investimento adicional em equipamento de medida e teletransmissão.
4. Melhor exploração da rede, pois tem-se um conhecimento correto do seu estado, sendo assim possível efetuar com segurança a condução da rede mais perto dos seus limites técnicos.

Todo um conjunto importante de informações resultante, direta ou indiretamente, da realização da estimação de estado, podem ser fornecidos ao operador do centro de controlo, sendo que a aplicação de estudos provenientes do estimador de estado pode ser caracterizada de duas formas, “on-line” ou “off-line”.

O uso “off-line” dos resultados obtidos pelo estimador de estado, podem ser utilizados no treino de operadores dos CC onde os mesmos realizam ações de controlo aquando da ocorrência de situações anómalas, uma vez que existe a possibilidade de simular com alguma exatidão cenários reais de funcionamento do SEE. Outra aplicação é a de permitir a elaboração de estudos sobre a precisão e localização dos aparelhos de medida a

colocar na rede, bem como a comparação de diferentes configurações de medida que possibilitam uma melhoria substancial das características de detecção e identificação de erros grosseiros. Existem estudos efetuados e trabalhos publicados [16, 44, 45], onde se aborda a temática apresentada e onde se refere este tipo de estudos como essenciais no processo de otimização entre o custo do investimento adicional em equipamento de medida e transmissão, e a precisão da estimativa obtida.

Os resultados da estimação de estado utilizados em estado “on-line” obtidos pela estimação de estado, criam bases de dados imprescindíveis à correta operação do sistema de qualquer SEE. Recorrendo a esta base de dados, apresenta-se de seguida algumas funções de controlo e monitorização, que direta ou indiretamente beneficiam do estado “on-line”:

- Análise de contingências;
- Despacho ótimo de potência ativa e reativa;
- Reservas de produção e estimativas de potências nas linhas;
- Controlo Carga-Frequência;
- Planeamento de saídas de serviço;
- Defeitos existentes no sistema e determinação da sua possível localização;
- Análise de segurança do SEE.

Com o evoluir do tempo e dos recursos disponíveis ao dispor do operador devido à introdução de sistemas informáticos mais poderosos, mais concretamente no uso da estimação “on-line”, o papel do operador foi-se modificando. Como as funções de medida e de armazenamento de informação são no presente realizadas de uma forma rápida e eficiente, o operador assume uma função de natureza mais analítica, analisando dados e tomando decisões executando-as. Esta interface “Homem-Máquina” possibilita que enormes quantidades de informação sejam analisadas e selecionadas de uma forma mais simples e eficiente, e que as diversas ações necessárias a efetuar no SEE possam ser tomadas com maior rapidez e confiança.

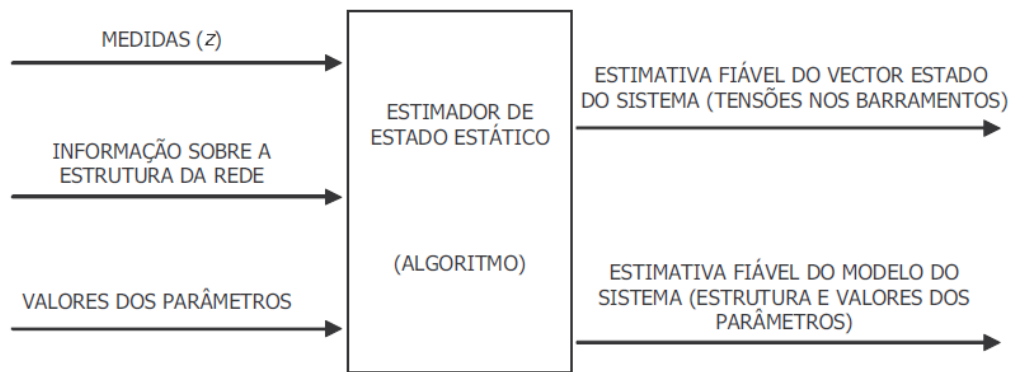


Figura 2.4 - Objetivo de um estimador de estado estático.

2.4 - ESTRUTURA DE UM ALGORITMO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

Basicamente, a estrutura de um algoritmo de estimação de estado estática é formado por quatro blocos fundamentais, conforme o esquema de funcionamento básico do algoritmo de estimação de estado ilustrado na Figura 2.5. Deste modo os quatro blocos são os seguintes:

- Pré-filtragem;
- Análise de observabilidade;
- Filtragem;
- Detecção de Anomalias.

Conforme abordado anteriormente, os dados disponíveis nos CC provenientes do terreno num dado instante, dividem-se essencialmente em medidas de natureza analógica ou digital.

Na etapa de pré-filtragem, toda a informação disponibilizada é processada com a realização de testes tendo em vista a avaliação de coerência das mesmas. No decorrer deste processo e no caso de se detetar alguma incoerência ou erro (Erros Grosseiros), e seja possível identificar a sua origem, poderá proceder-se de imediato à eliminação de algumas medidas ou acionar-se o processador topológico. O referido processador só é utilizado aquando da existência de alterações na configuração da rede que poderá ser sinalizada ou detetada.

Na etapa seguinte é analisada a observabilidade do SEE. A análise de observabilidade prende-se com a necessidade de se encontrar uma estimativa do estado do sistema como um todo, ou seja, se existirem medidas em número e qualidade suficientes que possibilite a EE, então considera-se a rede “Observável”. Uma vez que a observabilidade depende diretamente do número de medidas disponíveis e da sua distribuição geográfica, as medidas disponíveis deverão ser redundantes. Caso a rede não seja observável é sempre possível recorrer a pseudomedidas. Temporariamente o sistema pode ficar não observável devido por exemplo a alterações de topologia de rede ou a falhas na transmissão de informação.

Terminada a etapa de análise de observabilidade, é executada a etapa de filtragem, que consiste na determinação, baseada na informação disponível, de uma solução para ao vetor estado do sistema. O bloco de inicialização das tensões destina-se a estabelecer um valor inicial (x^0) do vetor de estado do sistema, que permita o arranque do processo iterativo da estimação de estado. Este valor inicial é normalmente o valor nominal da tensão ($|V|=1\text{p.u.}$ e $\theta=0^\circ$) ou pode ser o vetor de estado obtido na última estimação realizada pois, caso não se tenham verificado grandes alterações no sistema, este vetor representará, com razoável precisão, o estado atual do sistema.

Por ultimo, na fase de deteção de anomalias ou erros grosseiros, são efetuados um conjunto de testes (por norma estatísticos), que avaliam ou não, a existência de erros grosseiros. Na existência de erros grosseiros, inicializam-se procedimentos de identificação, eliminação e correção, sendo que a estimação voltará novamente ao processo de observabilidade. No final são analisados os resultados e na inexistência de erros grosseiros, o algoritmo regista e armazena as estimativas calculadas, juntamente com a medida de confiança das mesmas [11].

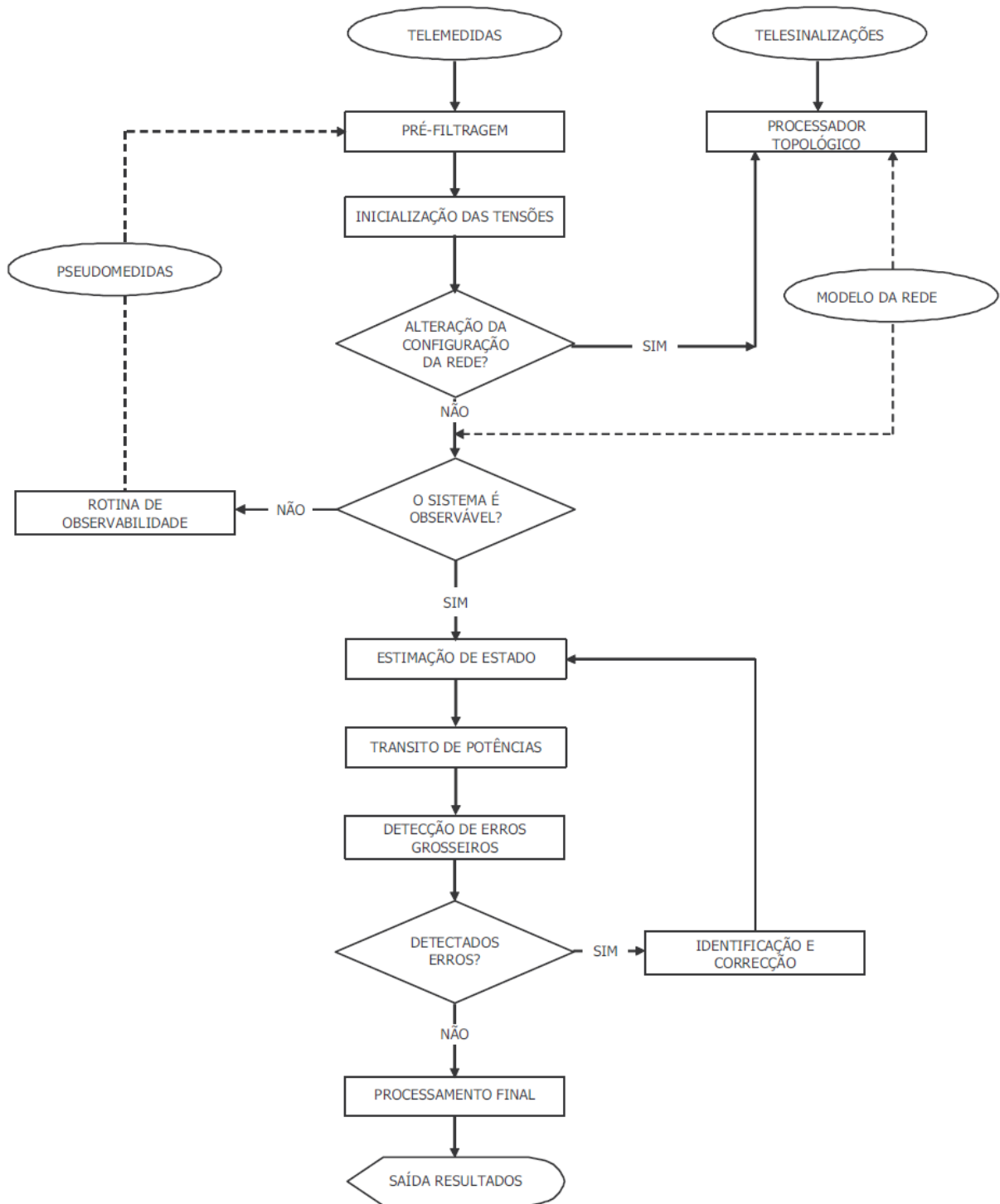


Figura 2.5 - Algoritmo desenvolvido de um estimador de estado em SEE [5].

2.5 - MODELO MATEMÁTICO DE UM ESTIMADOR DE ESTADO E MODELIZAÇÃO DA REDE

2.5.1- INTRODUÇÃO

O objetivo primordial de um algoritmo de estimação de estado, passa pela obtenção de uma estimativa fidedigna (\hat{x}) a partir do verdadeiro estado do sistema (x), para que seja possível atingir um alto nível de eficiência nas ações de controlo nos CC. Para que se atinja o objetivo pretendido, o EE utiliza numerosas informações disponíveis nos centos de comando e controlo.

Considerando que quer a topologia da rede quer os valores de todos os parâmetros do modelo são fiáveis, as entradas e saídas do estimador de estado estático podem ser representadas pela Figura 2.6:

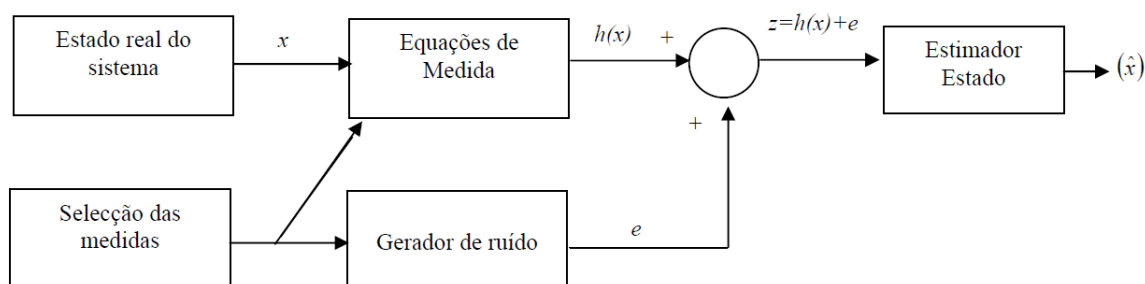


Figura 2.6 - Entradas e saídas de um estimador de estado estático.

onde:

x – representa o verdadeiro vetor de estado do sistema, com dimensão n ;

$h(x)$ – representa o vetor de funções não lineares que relacionam o verdadeiro estado do sistema com os “verdadeiros” valores das medidas;

e – representa ao vetor dos erros aleatórios das medidas;

z – representa a vetor das medidas e pseudomedidas disponíveis no CC e, como tal, afetadas com erro e ;

\hat{x} – representa ao vetor de estado estimado do sistema;

O vetor estado do sistema (\hat{x}) obtido após o processamento da informação disponível no estimador de estado, fornece os valores dos módulos das tensões e os respectivos ângulos de fase nos barramentos.

Considerando a pressuposição de que a variação de produção e carga nos barramentos sofre alterações muito lentamente, pode-se modelizar a rede como em regime quase estático, sendo assim possível, conhecendo as tensões nodais em todos os barramentos, determinar de forma completa o ponto de funcionamento do sistema. Adotando a formulação (habitual) em coordenadas polares, o vetor estado (x), para um sistema de N barramentos é:

$$x = [\theta_2, \theta_3, \dots, \theta_N, V_1, V_2, \dots, V_N]^T \quad (2.1)$$

com:

$$\bar{V}_i = V_i \angle \theta_i, \quad \dim(x) = 2N - 1 = n$$

considerando o barramento 1 como de referência dos ângulos de fase, isto é, sendo o angulo de fase igual a zero, $\theta_1 = 0$. Como o vector de estado do sistema não é obtido directamente, uma estimativa x será obtida com base no vetor de medidas z de dimensão m , sendo definido por:

$$z = [P_i, \dots, Q_i, \dots, P_{ij}, \dots, Q_{ij}, \dots, V_i, \dots]^T \quad (2.2)$$

em que:

P_i - representa a potência ativa injetada nos barramentos;

Q_i - representa a potência reativa injetada nos barramentos;

P_{ij} - representa os fluxos de potências ativa nas linhas;

Q_{ij} - representa os fluxos de potências reativa nas linhas;

V_i - representa os módulos de tensão nos barramentos.

Desta forma, as medidas podem ser expressas em função do vetor estado do sistema através da seguinte equação linear:

$$z = h(x) + e \quad (2.3)$$

onde:

$h(x)$ – representa o vetor de funções não lineares que relacionam o verdadeiro estado do sistema com os “verdadeiros” valores das medidas, a partir da matriz das admitâncias da rede.

x – representa o verdadeiro vetor de estado do sistema, com dimensão n .

e – representa o vetor de variáveis aleatórias que expressam o erro das medidas.

Importa salientar que o vetor $[e]$, não está relacionado com erros nos parâmetros ou erros topológicos do modelo do SEE. Além disso, considera-se que os erros associados a cada medida possuem distribuição gaussiana e são não correlacionados, sendo portanto a matriz covariância do erro presente nas medidas uma matriz diagonal $R^{-1}=W$.

Os sistemas de medida em SEE normalmente possuem uma redundância de medidas razoavelmente grande, não existindo grandes dificuldades em conseguir valores de medidas suficientes que permitam construir o vetor estado do sistema. Uma vez que o aumento da redundância das medidas contribui para uma melhoria da precisão que caracteriza o objetivo do estimador de estado, a redundância do SEE e a localização dos diversos equipamentos de medida, devem ser determinadas através de diversas combinações de considerações do sistema de aquisição de dados e do estimador utilizado.

De forma a caracterizar uma dada configuração de medida, em relação a um maior ou menor número de medidas consideradas, é habitual definir o valor da redundância de medida (η) como:

$$\eta = \frac{m}{n} \quad (2.4)$$

isto é, o quociente entre o número de medidas utilizadas pelo estimador (m) e o número de variáveis de estado (n). É normal η assumir valores no intervalo entre $1,5 < \eta < 2,5$. A possibilidade de se usar redundâncias superiores a 1 permite que se faça uma filtragem do ruído de medida [43].

2.5.2 - MODELO DE REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DE UM SEE

Uma vez que nos SEE a interligação entre barramentos é efetuada por linhas ou transformadores, existe a necessidade de se modelizar estes elementos matematicamente. O modelo de rede mais utilizado para estimadores de SEE possui dois pressupostos de simplificação fundamentais [46]: o sistema é equilibrado, podendo ser representado como um sistema de uma única fase. Cada ramo entre dois quaisquer barramentos i e j pode ser representado pelo equivalente em π . O primeiro pressuposto pode causar erros significativos em alguns sistemas não equilibrados, mas é tido como razoável na grande maioria dos casos, sendo que o grande benefício do esquema equivalente em π depende da natureza do ramo, se se trata de um transformador ou de uma linha.

Assim, se seguida apresentam-se as modelizações matemáticas que traduzem os referidos elementos:

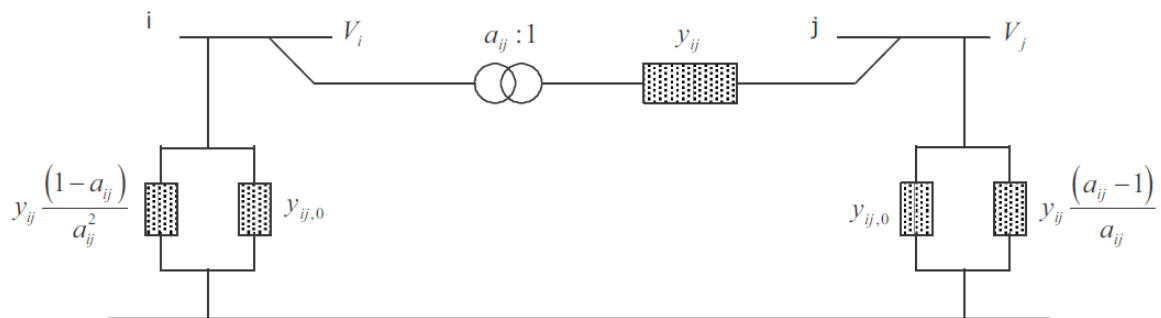


Figura 2.7 – Esquema equivalente em π de uma linha ou de um transformador.

A modelização apresentada na Figura 2.7, é utilizada para linhas e transformadores tendo sempre que se notar que se a ligação entre os dois barramentos for uma linha, y_{ij} representa a sua admitância, a_{ij} assume valor unitário e $y_{ij,0}$ (com $y_{ij,0} = jB$) representa metade

da susceptância shunt da linha ij , o que resulta num modelo como o representado na Figura 2.8:

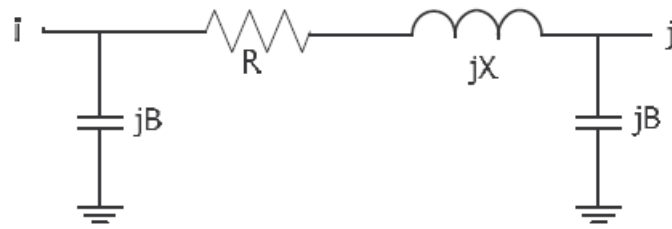


Figura 2.8 – Esquema equivalente em π de uma linha.

Por outro lado, se a ligação entre dois barramentos for um transformador, y_{ij} representa a admitância nominal do transformador dividida por a_{ij} (razão de transformação) e $y_{ij,0}$ assume valor nulo conforme ilustra a Figura 2.9:

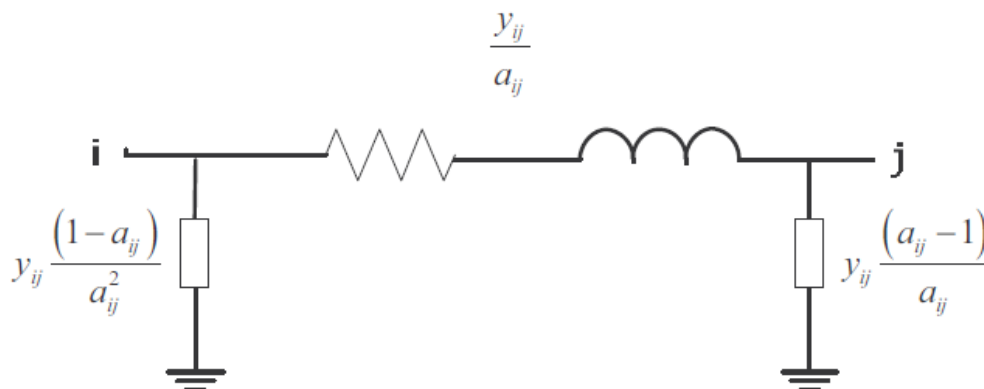


Figura 2.9 – Esquema equivalente de um transformador com tomadas.

Geradores, Cargas e Compensadores Shunt

O modelo de estimação de estado assume que o SEE funciona em estado estático, sendo que desta forma as cargas e as gerações nos barramentos são modelizadas como injeções de potencias ativas e reativas não afetando deste modo o modelo da rede estabelecido, sendo exceções, as impedâncias constantes que são modelizadas como admitâncias shunts no barramento correspondente. Os compensadores shunt, usados no controlo da tensão e/ou de potencia reativa, são representados pela susceptância por fase no barramento correspondente, sendo o sinal do valor da susceptância determinará o tipo de

elemento em causa. Se o valor for positivo corresponde a um condensador, se for negativo corresponde a um indutor.

2.5.3 - MEDIDAS E EQUAÇÕES DE MEDIDA

2.5.3.1 – Introdução

Conforme abordado anteriormente, para que seja possível ao estimador de estado efetuar corretamente a sua função (obter uma estimativa fidedigna do estado do sistema), o mesmo necessita possuir informações provenientes da rede em análise. As informações necessárias passam fundamentalmente, pela obtenção de um conjunto de medidas (redundante) da rede, pelo conhecimento o mais rigoroso possível dos parâmetros da rede, bem como da sua topologia [47].

Com o aumento de complexidade dos Sistemas Elétricos de Energia, existe a obrigação da obtenção o mais fiável possível das medidas a utilizar no EE, por forma a ser possível ao mesmo obter um conhecimento adequado do estado do sistema. Assim o cálculo do vetor de estado exige o conhecimento prévio de certas medidas, por exemplo:

- Potências ativas e reativas injetadas nos barramentos;
- Fluxos de potências ativas e reativas nas linhas;
- Módulos das tensões nos barramentos;
- Módulos das intensidades nas linhas.

As medidas são recolhidas por unidades terminais remotas e transmitidas para o sistema computacional instalado nos CC. Os dados medidos podem ser contaminados por erros associados à operação dos aparelhos de medida e por ruídos na sua transmissão. Em certas situações, como a não realização ou transmissão de medidas, podem tornar o estado do sistema não observável o que significa que não será possível calcular o vetor estado utilizando as medidas disponíveis. Assim, o sistema de medida e transmissão de informação e a própria localização dos pontos de medida deverão ser estudados de forma adequada, de modo a garantir que o sistema permaneça observável mesmo que ocorram alguns tipos de falhas.

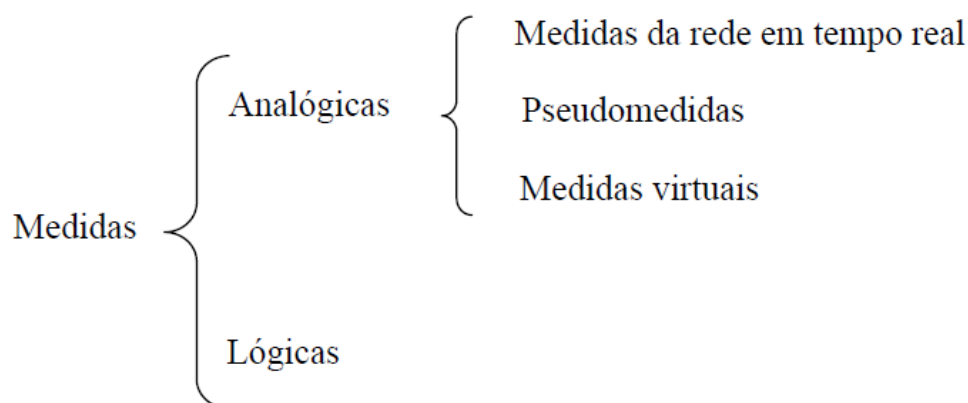
Desta forma, os locais a selecionar para efetuar as medidas têm de ser tais que sejam verificadas as condições seguintes:

- Assegurem resultados suficientemente exatos na estimação de estado;
- Aumente a fiabilidade da estimação de estado no caso de falhas no sistema de recolhas de medidas, no sistema de transmissão, etc.;
- Reduza os custos de investimento.

Como as equações de medidas são funções não lineares do vetor de estado, é necessário linearizá-las em torno de um ponto inicial, sendo a solução final obtida através de um processamento iterativo. Um outro aspeto importante é definir a configuração de medidas e avaliar se as medidas disponíveis são suficientes para garantir a observabilidade da rede. Uma escolha adequada do conjunto de medidas introduz melhorias ao nível da deteção e identificação de erros grosseiros. Existem publicadas algumas soluções desenvolvidas para resolução deste problema [44, 48-52].

2.5.3.2 – Tipos de Medidas

Como abordado no ponto anterior, os CC deverão ter nas suas bases de dados, informação recolhida da rede que permita ao EE inicializar o vetor das medidas. Desta forma as medidas presentes nos centros de controlo podem ser classificadas em diversas categorias conforme o seguinte esquema:



As medidas analógicas englobam os valores registados para os módulos de tensão, trânsitos de potência ativa e reativa e potências ativas e reativas injetadas. Este tipo de medidas pode ainda ser dividido em três subtipos [8]:

- Medidas em tempo real: são medidas efetuadas ciclicamente em vários pontos da rede e transmitidas ao centro de controlo;
- Pseudomedidas: são valores que a priori, e com alguma precisão, podemos atribuir a certas variáveis do sistema. Estes valores poderão ser obtidos recorrendo aos registos históricos dessas variáveis, a previsões de carga a curto prazo ou até mesmo à experiência do operador;
- Medidas virtuais: correspondem às potências injetadas (de valor nulo) em barramentos sem geração e sem carga. Estas medidas estão disponíveis sem qualquer custo em equipamentos de medida ou transmissão, não estando assim sujeitas aos erros introduzidos por esses equipamentos.

As medidas lógicas englobam a informação relativa ao estado de interruptores e disjuntores (aberto/fechado). Estas medidas são utilizadas pelo processador de topologia para determinar a configuração da rede.

2.5.3.2 – Equações de medida

Para ser possível implementar o algoritmo de estimação de estado, a definição das funções $h_i(x)$, para $i=1, \dots, m$, que relacionam as grandezas elétricas medidas com as variáveis de estado do sistema têm que ser definidas. Assim, de acordo com o modelo adotado, as equações de medida são as seguintes:

a) Fluxos de potência nas linhas,

$$P_{ij} = -V_i^2 G_{ij} a_{ij} + V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

$$Q_{ij} = V_i^2 (B_{ij} a_{ij} - y_{ij,0}) + V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.6)$$

b) Potências injetadas nos barramentos,

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.7)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.8)$$

c) Medidas de tensão.

Estas medidas exprimem-se diretamente em função do elemento correspondente do vetor de estado, isto é, $h_k(x)=x_j$, em que:

$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = -y_{ij}$: elemento ij da matriz das admitâncias da rede;

$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$: representa a diferença entre as fases das tensões dos barramentos i e j .

2.5.4 – A PRECISÃO DAS MEDIDAS E O DESVIO PADRÃO σ_i

Por forma a se ter uma completa “visão” da rede e do correto estado do sistema, existe a necessidade da utilização dos algoritmos de estimação de estado. Esta necessidade surge, pois colocar aparelhos de medição em todos os pontos da rede é uma abordagem claramente dispendiosa (apesar das melhorias substanciais em termos de precisão e medida), aliada ao aumento da probabilidade de aparecimento de um maior número de erros de medição e falhas nos equipamentos e telemetria. Conforme abordado anteriormente, a precisão (σ_i) das diversas medidas provenientes dos SEE, são afetadas pelos diversos componentes do sistema de aquisição e de transmissão de informação.

Como os estimadores de estado são diretamente afetados pela precisão (σ_i) dos aparelhos de medida, apresenta-se de seguida a descrição dos elementos que fazem parte de

uma cadeia de medida clássica, suscetíveis de influenciar os dados que são recebidos no centro de controlo.

Assim temos:

- os transformadores de medida de intensidade (TI) e de tensão (TP);
- os dispositivos eletrónicos conversores de potência, que recebem a corrente e a tensão alternada proveniente dos TI e TP e fornecem uma corrente contínua de reduzida amplitude, proporcional à potência ativa (reativa) correspondente;
- os conversores analógico / digital;
- os meios de transmissão da informação digital.

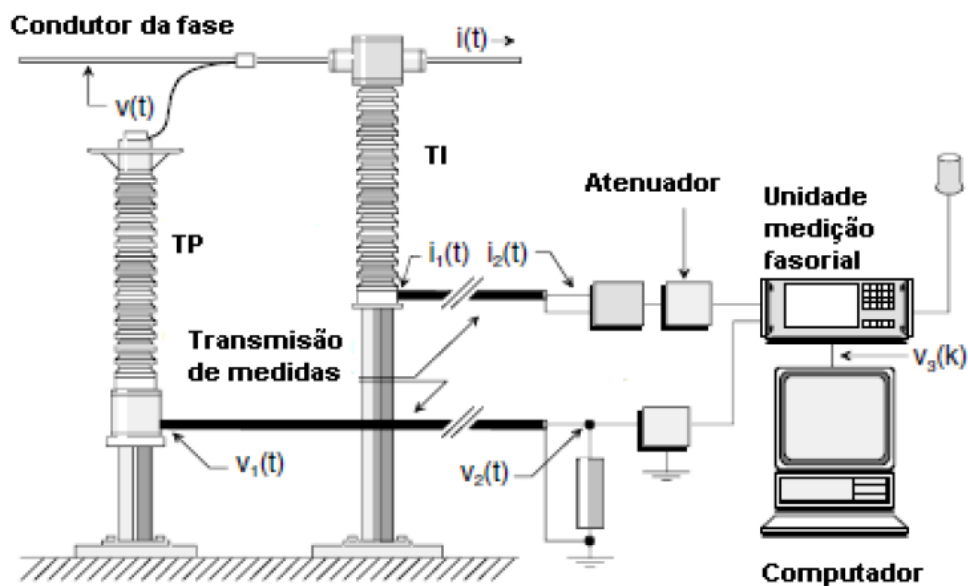


Figura 2.10 – Cadeia de transmissão de medidas [53].

Desta forma, no final de cada registo e transmissão de medidas obtidas, as mesmas chegam aos respetivos CC afetadas por um erro que depende diretamente do erro individual de cada elemento da cadeia de medida. Para que os resultados dos estimadores de estado sejam considerados fiáveis, os mesmos tem que contemplar a existência destes erros no processo de cálculo e estimação. Portanto, é imputado um peso ($w_i = 1/ \sigma_i$) às medidas

recebidas nos centros de controlo, que dependem do erro individual dos aparelhos de medição e transmissão, sendo tido em conta que as diferenças de precisão dos diversos equipamentos, têm pesos distintos no processo de estimação. Quanto maior a classe de precisão dos equipamentos menor será o valor de σ_i correspondente.

Assim, pode considerar-se que deveriam ser modelizadas e obtidas as composições das correspondentes distribuições de probabilidades dos erros em análise. Dada a dificuldade desta modelização [54], é normal introduzir algumas hipóteses simplificativas, considerando que as componentes do erro total em análise, podem ser modelizadas como variáveis aleatórias gaussianas independentes. O erro total será também uma variável aleatória gaussiana cuja média (variância) é a soma das médias (variâncias) das componentes. Convém referir também que caso um ruído de medida apresentar uma média não nula, esse valor médio deve ser calculado e subtraído sistematicamente ao valor obtido para a medida correspondente.

Na realidade, a qualidade da estimativa obtida não é afetada por pequenas variações nos valores assumidos para σ_i [55], no entanto, deve-se referir:

- se o desvio padrão (σ_i) atribuído a um erro de medida for nitidamente superior ao respetivo verdadeiro valor, a medida correspondente é rejeitada “numericamente”, podendo no entanto diminuir a precisão da estimação em zonas de reduzida redundância local;
- se o desvio padrão atribuído for nitidamente inferior ao verdadeiro valor, então irá ser atribuído um peso excessivamente elevado à medida correspondente, o que resulta também numa diminuição da precisão. Além disso, na fase de deteção de erros grosseiros essa medida poderá ser indevidamente selecionada.

As expressões habitualmente referidas na Literatura [17, 26, 55, 56], abordando o cálculo do desvio de padrão para diferentes tipos de medidas são:

i. Medidas de Potencia

$$\sigma = k_1 \cdot |S| + k_2 \cdot F_S \quad (2.9)$$

em que $|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$ representa o verdadeiro valor da potência aparente.

Na prática este valor não é conhecido e é substituído pelo valor medido de P e Q para as medidas de potência injetada nos barramentos e trânsitos de potência nas linhas. A constante F_S representa o valor de fim de escala do aparelho correspondente. Os valores atribuídos a k_1 e k_2 dependem das características da cadeia de medida. Os valores habitualmente considerados, e referidos na literatura costuma ser $k_1 = 0.02$ e $k_2 = 0.0035$.

Outra expressão comumente utilizada é:

$$\sigma = k_3 \cdot F_S \quad (2.9)$$

em que F_S tem o mesmo significado que na equação anterior. Esta fórmula pode assumir outro aspeto, obtendo-se σ como função da potência nominal da aparelhagem correspondente (S_N) e da respetiva classe de precisão (c). Considere-se fixo o máximo valor possível para a amplitude do erro de medida:

$$e_{max} = c \cdot F_S \quad (2.10)$$

em que o valor de F_S é ligeiramente superior a S_N , por exemplo:

$$F_S = k \cdot S_N \quad \text{com} \quad 1 < k < 1,2 \quad (2.10)$$

atendendo que se admite o erro de medida gaussiano, pode-se considerar que o seu valor absoluto máximo e_{max} é três vezes superior ao respetivo desvio padrão, e assim:

$$\sigma = \frac{c \cdot k \cdot S_N}{3} \quad (2.11)$$

ii. Medidas de Tensão

$$\sigma = k_1 \cdot |V| + k_2 \cdot F_S \quad (2.12)$$

em que V é a medida da amplitude da tensão no barramento considerado. Neste caso, os valores de k habitualmente considerados são, $k_1 = 0.003$ e $k_2 = 0.003$ [43].

Relativamente às pseudomedidas, os correspondentes valores do desvio padrão (σ) dependem da precisão dos reguladores de tensão, dos modelos adotados para as cargas, das previsões utilizadas, etc., podendo por isso tomar valores bastante superiores.

A estrutura geral das funções de um Estimador de Estado representa-se na figura 2.11.

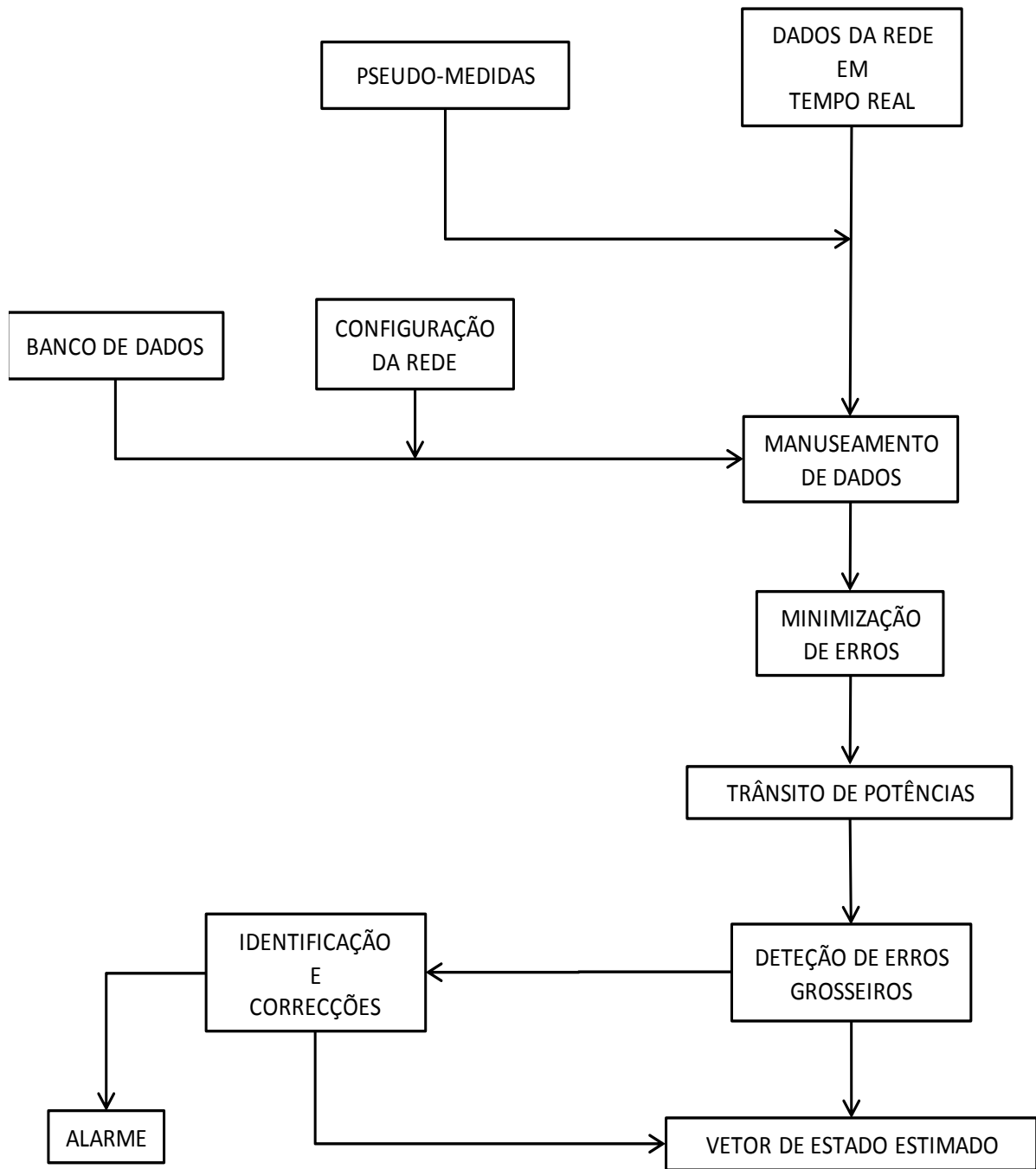


Figura 2.11 - Estrutura geral das funções de um Estimador de Estado em SEE [7].

2.6 - CONCLUSÃO

No presente capítulo foi efetuada uma introdução ao problema da estimação de estado em SEE, sendo elaborado um enquadramento do problema desde o seu surgimento até aos dias de hoje. Foi também descrito em pormenor, o funcionamento de Sistema Elétrico de Energia, identificando e caracterizando os estados onde poderão residir as ações de controlo a ter em conta nas transições de estado do sistema.

Para garantir o sucesso das ações de controlo nos Centros de condução de SEE, é essencial ter disponível a cada instante conhecimento do verdadeiro estado do sistema. As ações de controlo efetuadas nos SEE têm por objetivo garantir a segurança na condução e exploração do sistema bem como, assegurar as exigências de uma elevada continuidade de serviço.

O objetivo de um estimador de estado é então, o cálculo do valor mais aproximado possível das variáveis de estado do sistema a partir de um conjunto redundante de medidas, de forma a obter uma base de dados completa, coerente e fiável, e que permita aos Centros de Controlo utilizar essa base de dados no processo de condução e segurança do SEE.

O capítulo termina com uma caracterização da estimação de estado nomeadamente à definição da estrutura do algoritmo de estimação e respetivas aplicações, bem como ao modelo matemático subjacente a todo o processo.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE ESTADO

Capítulo 3

MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

3.1- INTRODUÇÃO

No presente capítulo, é efetuada uma apresentação mais detalhada do estado da arte dos métodos de estimação de estado mais divulgados na literatura. Conforme abordado no capítulo anterior, existem diversos métodos e variantes de utilização dos algoritmos em contexto científico, mas também em contexto real de funcionamento.

Assim, é de todo pertinente, analisar os trabalhos e estudos que foram até agora realizados na área de estimação de estado de Sistemas Elétricos de Energia.

3.2 – MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS (WLS) – ALGORITMO BASE

Conforme já explicitado no capítulo anterior, o objetivo da estimação de estado é determinar o estado do sistema com base nas grandezas medidas na rede. Um método em que é possível obter o objetivo anterior, é recorrendo à aproximação clássica que tem por base o método dos mínimos quadrados ponderados – WLS (mais usada na estimação de estado em SEE). O método WLS distingue os diferentes tipos de medidas disponíveis, atribuindo pesos aos mesmos tendo em conta o grau de confiança correspondente a cada um.

Consideremos então um SEE com N barramentos. A relação entre o vetor das medidas (z) rececionadas pelo operador do sistema no centro de controlo e o vetor de estado (x) é, tal como já constatado, não linear e obedece ao seguinte modelo:

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ h_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \dots \\ h_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_m \end{bmatrix} = h(x) + e \quad (3.1)$$

em que:

x – vetor estado do sistema, com $\dim(x) = 2N-1 = n$

z – vetor das medidas, com $\dim(z) = m$

e – vetor do ruído (erros) de medida

$h(x)$ – vetor de funções não lineares relacionado com z e x e definido pelas equações (2.5) a (2.8)

Relativamente ao vetor do ruído de medida e considerando a ausência de erros grosseiros, adota-se a seguinte modelização estatística:

$$e \sim N(0, R) \quad \text{com} \quad R = \text{diag}(\sigma_i^2) \quad (3.2)$$

em que σ_i representa o desvio padrão do ruído da i -ésima medida. A matriz covariância R é diagonal porque se admite que as componentes de e são não correlacionadas. A matriz R representa o peso associado às medidas z_i . Os pesos são seleccionados como fatores de proporcionalidade da precisão das medidas, isto é, a medida de menor precisão terá o fator de ponderação mais elevado ($1/\sigma_i^2$).

A obtenção de uma estimativa para o vetor de estado do sistema, pelo método dos mínimos quadrados ponderados (WLS), consiste na determinação de um vetor $x = \hat{x}$ que minimize a seguinte função objetivo:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(x))^2}{R_{ii}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] \quad (3.3)$$

Essa estimativa deverá no mínimo satisfazer as condições de otimalidade de primeira ordem, como exemplificado de seguida:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^T(x) R^{-1} [z - h(x)] = 0 \quad (3.4)$$

em que $H(x)$ é a matriz jacobiana de $h(x)$ avaliada para x , ou seja:

$$H(x) = \left[\frac{\partial h(x)}{\partial x} \right] \quad (3.5)$$

Dada a não linearidade de $h(x)$, expandindo a função não linear $g(x)$ na sua série de Taylor em torno do vetor estado x^k , obtém-se:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (3.6)$$

Desprezando os termos de ordem superior, chega-se a uma equação que traduz um processo iterativo conhecido por método de Gauss-Newton [7]. Desta forma temos:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (3.7)$$

em que x^0 é a estimativa inicial para arranque do processo iterativo, k é o contador de iterações, x^k corresponde ao vetor solução na iteração k e $G(x^k)$ é a matriz ganho. Seja:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot H(x^k) \quad (3.8)$$

$$g(x^k) = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x^k)] \quad (3.9)$$

onde

$$[x^{k+1} - x^k] = \Delta x^{k+1} \quad (3.10)$$

então, se o processo iterativo definido em (3.8) convergir pode-se concluir que:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} g[x(k)] = 0 \quad (3.11)$$

e portanto que a solução procurada foi efetivamente encontrada.

É importante referir três aspetos que devem ser tidos em conta aquando da seleção da matriz ganho $G(x^k)$:

- $G(x^k)$ deve não ser singular para todo o k , permitindo a determinação de uma solução para o sistema de equações lineares, em cada iteração.
- A escolha da matriz G influencia o número de iterações necessárias à convergência mas não à solução obtida. A situação altera-se, contudo, se forem introduzidas modificações na expressão de $g(x)$, e neste caso a solução obtida poderá ser efetivamente diferente.
- Na prática, uma solução adequada poderá basear-se na seleção de uma matriz de ganho definida positiva.

De uma forma a selecionar as matrizes de ganho, apresentam-se de seguida os métodos mais usuais aplicados na literatura [30], sendo eles:

Método do Gradiente

$$G(k) = \alpha(k)I, \quad \alpha(k) > 0 \quad (3.12)$$

Método de Newton

$$G(k) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} \Big|_{x=x(k)} \quad (3.13)$$

sendo a matriz hessiana de $J(x)$, $\frac{\partial^2 J(x)}{\partial^2 x}$, dada por:

$$\frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2} = 2 \left[H^T(x)R^{-1}H(x) - \sum_{i=1}^m \left[\frac{[\partial^2 h_i(x)]}{\partial x^2} \right] R_{ii}^{-1} [z_i - h_i(x)] \right] \quad (3.14)$$

Método de Gauss

$$G(k) = H^T(x)R^{-1}H(x)|_{x=x^k} \quad (3.15)$$

onde resulta da simplificação do método de Newton, considerando para o efeito de avaliação de $\frac{\partial^2 J(x)}{\partial^2 x}$ que a matriz H é independente de x . Desta forma obtemos então o seguinte processo iterativo:

$$H^T(x^k)R^{-1}H(x^k) \cdot [x^{k+1} - x^k] = H^T(x^k) \cdot R^{-1} \cdot [z - h(x^k)] \text{ com } k = 0,1,2, \dots \quad (3.16)$$

De acordo com os diversos trabalhos publicados na literatura, e tendo em conta a sua contribuição para a experiência que se veio a adquirir com os estudos efetuados, é possível afirmar que o algoritmo de Gauss aplicado à estimação de estado em SEE, proposto inicialmente por Schweppe [15], se adapta bem ao problema a resolver.

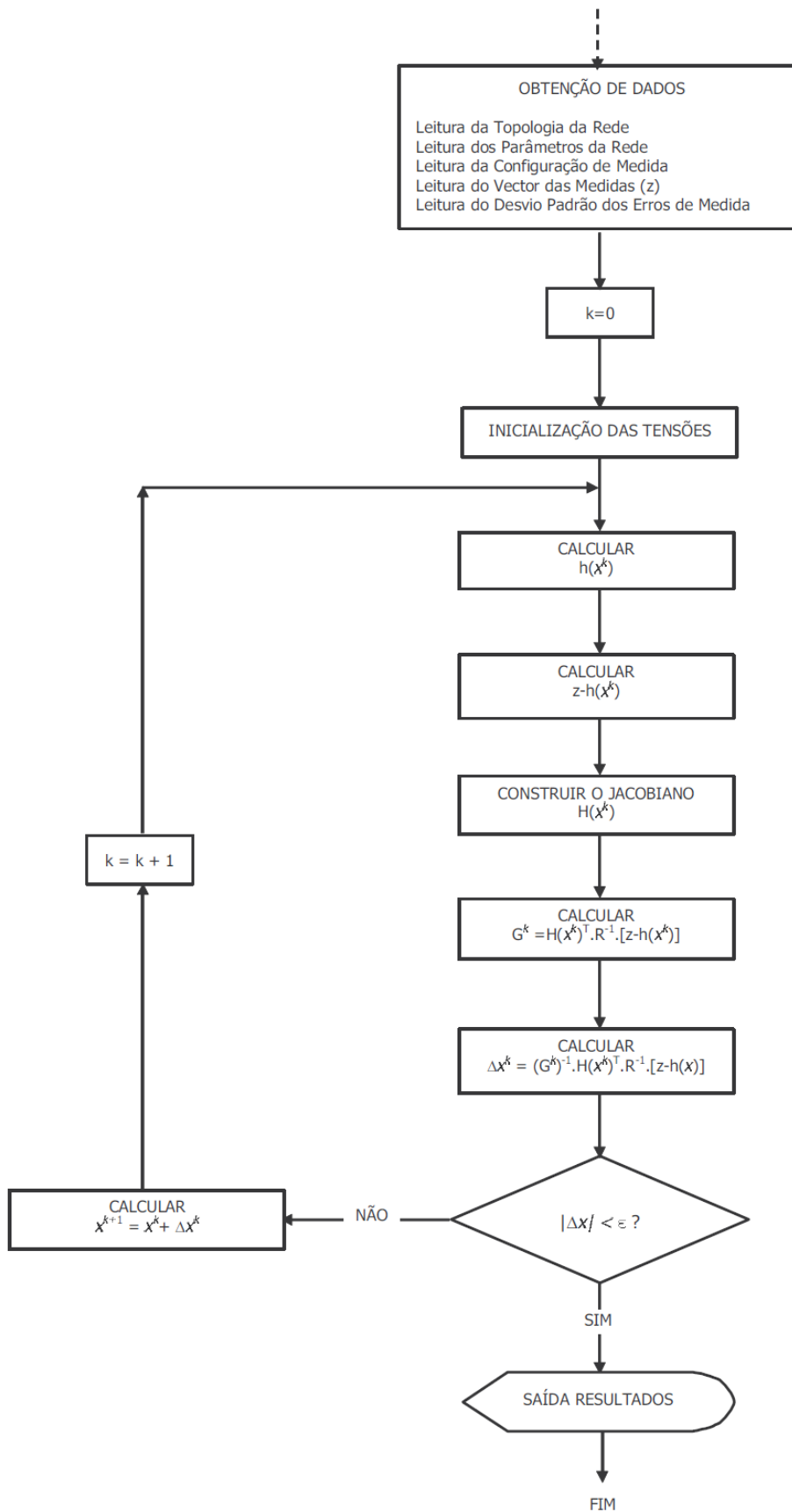


Figura 3.1 – Algoritmo de Gauss-Newton aplicado na estimação de estado pelo método WLS.

Definido o processo iterativo anterior, é possível afirmar que o mesmo apresenta características importantes, entre as quais se salientam a seguintes:

- i. É robusto, onde proporciona boa convergência em diferentes situações de carga, diferentes configurações da rede e diferentes configurações de medida [5];
- ii. A matriz ganho está intimamente relacionada com a matriz covariância da estimação Σ_x (3.17) :

$$G(\hat{x}) = H^T(\hat{x})R^{-1}H(\hat{x}) = \sum_x^{-1}(\hat{x}) \quad (3.17)$$

o que permite tirar partido do esforço de calculo relativo à resolução das equações de estimação, e permite uma posterior análise da qualidade da estimativa obtida bem como do tratamento de erros grosseiros;

- iii. Redução significativa do tempo de cálculo relativamente ao algoritmo de Newton, uma vez que não é necessário ao cálculo das diferentes matrizes hessianas, $\frac{\partial^2 J(x)}{\partial x^2}$;
- iv. Sendo H uma matriz de característica igual a n , a matriz de ganho dada por (3.15) é definida positiva, o que não é necessariamente verdade no caso da matriz (3.14).

Conforme se poderá verificar nos pontos seguintes, serão apresentados diferentes algoritmos e diversas simplificações desenvolvidas ao algoritmo de Gauss, onde se vislumbram melhorias no que diz respeito ao tempo de processamento, bem como à ocupação de memória que este algoritmo comporta.

3.2.1 – CRITÉRIOS DE ARRANQUE E PARAGEM

O arranque do processo iterativo apresentado no algoritmo representado na Figura 3.1, é determinado pelos valores de inicialização das tensões, e exige a caracterização da estimativa inicial $x(0)$ do vetor estado do sistema. Desta forma, é possível afirmar que o vetor $x(0)$ poderá ser escolhido essencialmente de duas formas: $x(0)$ poderá corresponder à ultima solução para o vetor estado obtida pelo estimador se for garantido não terem ocorrido

alterações significativas no estado da rede a ultima vez que o estimador foi executado (comummente designados de “estimadores seguidores”), ou poderá ser utilizada uma estimativa inicial correspondendo a valores de amplitude de tensão e ângulos de fase das tensões com $|V| = 1$ p.u. e $\theta = 0$ rad. para todos os barramentos respetivamente.

Importa referir que o critério de arranque utilizado na presente dissertação foi o segundo, isto é, procede-se à inicialização das tensões no arranque do processo iterativo.

No que diz respeito ao critério de paragem do processo iterativo, é usual encontrar na literatura três tipos de soluções diferentes, sendo elas:

- a. Critério baseado nas variações sucessivas de x

$$\max_i |\theta_i(k) - \theta_i(k - 1)| < \varepsilon_\theta \quad i = 1, \dots, N - 1 \quad (3.18)$$

$$\max_i |V_i(k) - V_i(k - 1)| < \varepsilon_V \quad i = 1, \dots, N \quad (3.19)$$

- b. Critério baseado nas variações sucessivas de J

$$|J(x(k)) - J(x(k - 1))| < \varepsilon_J \quad (3.20)$$

- c. Critério baseado na anulação do gradiente de J

$$\max_i |g_i(x(k))| < \varepsilon_g \quad i = 1, \dots, n \quad (3.21)$$

O critério de paragem utilizado em maior frequência na literatura no que diz respeito à estimação de estado em SEE, é o baseado nas variações sucessivas de x , sendo desta forma o processo utilizado no algoritmo desenvolvido.

3.2.2 – DETERMINAÇÃO DE δ_x , δ_h e r : LINEARIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE MEDIDA

A estimativa \hat{x} do vetor de estado obtida pelo método WLS, deverá satisfazer a condição necessária à existência de um mínimo da função objetivo $J(x)$, ou seja:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}} = -2H^T(\hat{x})R^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (3.22)$$

De modo a criar uma simplificação interpretativa, passa-se a representar $H(\hat{x})$ por H . Uma vez que $z=h(x)+e$, a equação (3.22) pode escrever-se como:

$$H^T R^{-1}[h(x) + e - h(\hat{x})] = 0 \quad (3.23)$$

Considere-se o desenvolvimento em serie de $h(x)$ em torno do valor estimado de x , para o vetor estado:

$$h(x) = h(\hat{x}) + H\delta_x + O(\|\delta_x\|^2) \quad (3.24)$$

em que o erro de estimação do vetor estado δ_x , será:

$$\delta_x = x - \hat{x} \quad (3.25)$$

Desprezando os termos de ordem superior a dois em (3.24) temos:

$$h(x) = h(\hat{x}) + H\delta_x \quad (3.26)$$

e à linearização de $h(x)$ em torno de \hat{x} assumindo valores pequenos para δ_x , resulta da equação (3.23) que:

$$H^T R^{-1}H\delta_x + H^T R^{-1}e = 0 \quad (3.27)$$

assumindo que a matriz $H^T R^{-1}H$ é invertível vem:

$$\delta_x = - \sum_x H^T R^{-1}e \quad (3.28)$$

em que:

$$\sum_x = [H^T R^{-1}H]^{-1} \quad (3.29)$$

A linearização demonstrada aquando ausência de erros grosseiros, é justificada pela reduzida amplitude do erro de medida, sendo o erro de estimação suficientemente pequeno, é possível limitar ao termo de primeira ordem, o desenvolvimento em série da equação de medida. De acordo com a experiência proveniente da literatura, existe a demonstração de que na presença de erros grosseiros consideráveis, a utilização da relação (3.26), para a análise destes, continua a proporcionar bons resultados.

Após a análise do erro de estimação δ_x , toma também especial importância a análise dos erros de estimação das grandezas medidas δ_h , definidos por:

$$\delta_h = h(x) - h(\hat{x}) \quad (3.30)$$

sendo a diferença entre os verdadeiros valores das medidas ($h(x)$) e os valores estimados ($h(\hat{x})$). Considerando a linearização já referida anteriormente em 3.26 obtém-se:

$$\begin{aligned} \delta_h = H\delta_x &= -H[H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} e \\ &= -S e \end{aligned} \quad (3.31)$$

em que:

$$S = H[H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} \quad (3.32)$$

é a matriz sensibilidade dos erros de estimação das grandezas, aos erros de medida.

Outra grandeza que importa salientar na análise de erros grosseiros, é a que caracteriza os resíduos de medida, e que são obtidos pela diferença entre os valores estimados $h(\hat{x})$, isto é:

$$r = z - h(\hat{x}) \quad (3.33)$$

e, atendendo às equações (3.1), (3.30) e (3.31), obtém-se:

$$\begin{aligned} r &= h(x) + e - h(\hat{x}) \\ &= H\delta_x + e = -H[H^T R^{-1} H]^{-1} H^T R^{-1} e + e \\ &= [I - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1}] \cdot e \\ &= W e \end{aligned} \quad (3.34)$$

em que:

$$W = I - H(H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} \quad (3.35)$$

é a matriz sensibilidade dos resíduos aos erros de medida.

Importa salientar também que, são os resíduos de medida, as únicas grandezas que podem ser calculadas após a estimativa do vetor estado do sistema em âmbito real de utilização do estimador, uma vez que o valor real das medidas é sempre desconhecido.

3.2.3 – CONSTRUÇÃO DA MATRIZ JACOBIANA DE MEDIDA – $H(x)$

Conforme é notório nos pontos anteriormente abordados, a construção da matriz jacobiana $H(x)$, tem grande importância aquando da construção, organização e programação do algoritmo de estimação de estado.

Desta forma, e para o estudo implementado, a matriz jacobina $H(x)$, pode ser dividida em quatro submatrizes do seguinte modo:

$$H(x) = \begin{matrix} m_1 \\ \begin{bmatrix} H_{P\theta} & | & H_{PV} \\ \text{---} & | & \text{---} \\ H_{Q\theta} & | & H_{QV} \end{bmatrix} \\ m_2 \end{matrix} = \begin{matrix} N-1 & N \\ \begin{bmatrix} \partial P_{ij}/\partial\theta & | & \partial P_{ij}/\partial V \\ \dots & | & \dots \\ \partial P_i/\partial\theta & | & \partial P_i/\partial V \\ \text{---} & | & \text{---} \\ \partial Q_{ij}/\partial\theta & | & \partial Q_{ij}/\partial V \\ \dots & | & \dots \\ \partial Q_i/\partial\theta & | & \partial Q_i/\partial V \\ \dots & | & \dots \\ \partial V_i/\partial\theta & | & \partial V_i/\partial V \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.36)$$

em que:

N – número total de barramentos

m_1 – número total de medidas do tipo P_{ij} e P_i

m_2 – número total de medidas do tipo Q_{ij} e Q_i e V_i

$m = m_1 + m_2$ – número total de medidas disponíveis

$$H_{P\theta} = \frac{\partial h_P}{\partial \theta} \quad , \text{ com dimensão } (m_1 \times (N-1))$$

$$H_{PV} = \frac{\partial h_P}{\partial V} \quad , \text{ com dimensão } (m_1 \times N)$$

$$H_{Q\theta} = \frac{\partial h_Q}{\partial \theta} \quad , \text{ com dimensão } (m_2 \times (N-1))$$

$$H_{QV} = \frac{\partial h_Q}{\partial V} \quad , \text{ com dimensão } (m_2 \times N)$$

As expressões correspondentes aos diferentes elementos da matriz jacobiana são as seguintes:

- Elementos correspondentes a medidas de magnitude de Tensão

$$\frac{\partial V_i}{\partial \theta} \rightarrow \frac{\partial V_i}{\partial \theta_j} = 0 \quad , \quad \forall j \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} 1 & , \quad i = j \\ 0 & , \quad i \neq j \end{cases} \quad (3.38)$$

- Elementos correspondentes a medidas de potência ativa injetada nos barramentos

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (-G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} + B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) \quad (3.40)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial V_i} = 2G_{ii}V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (3.41) \\ \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (3.42) \end{cases}$$

- Elementos correspondentes a medidas de potência reativa injetada nos barramentos

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = V_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (3.43) \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (3.44) \end{cases}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -2B_{ii}V_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (3.45) \\ \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (3.46) \end{cases}$$

- Elementos correspondentes a medidas de potência ativa nas linhas

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i} = V_i V_j (-G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} + B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) & (3.47) \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j} = V_i V_j (G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) & (3.48) \end{cases}$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i} = -2\alpha_{ij} G_{ij} V_i + V_j (G_{ij} \text{cos } \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen } \theta_{ij}) & (3.49) \\ \frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \text{cos } \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen } \theta_{ij}) & (3.50) \end{cases}$$

- Elementos correspondentes a medidas de potência reativa nas linhas

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_i} = V_i V_j (G_{ij} \text{cos } \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen } \theta_{ij}) & (3.51) \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta_j} = V_i V_j (-G_{ij} \text{cos } \theta_{ij} - B_{ij} \text{sen } \theta_{ij}) & (3.52) \end{cases}$$

$$\frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_i} = 2V_i(\alpha_{ij} B_{ij} - y_{ij,0}) + V_j (G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) & (3.53) \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V_j} = V_i (G_{ij} \text{sen } \theta_{ij} - B_{ij} \text{cos } \theta_{ij}) & (3.54) \end{cases}$$

3.2.4 – ESTRUTURA DAS MATRIZES H e G

Uma vez construída a matriz jacobiana H , é de especial relevo referir aspetos e características importantes acerca da mesma. Uma outra matriz que importa também referir é a matriz ganho G , pelo que seguidamente se fará uma descrição e relação entre ambas.

Como o objetivo primordial de um algoritmo de estimação de estado para utilização em tempo real reside na sua essência na otimização do tempo de execução e na redução dos requisitos computacionais (capacidade de processamento e memória), a utilização e aproveitamento das características das matrizes envolvidas (simetria e esparsidade) é de grande importância.

Reportando-nos ao algoritmo de Gauss (fluxograma da Figura 3.1), poderemos referir algumas das características da matriz jacobiana e da matriz de ganho envolvidas no processo iterativo (3.16). Assim:

- i. A matriz jacobiana é uma matriz esparsa

Efetivamente o número de elementos não nulos da matriz jacobiana H é bastante reduzido. Este facto resulta de cada medida envolver um número relativamente restrito de variáveis de estado (topologicamente próximas da medida) dando assim origem a um pequeno número de derivadas parciais não nulas. Assim:

- a medida do módulo da tensão no barramento i envolve apenas a variável de estado V_i e dá origem a um único elemento não nulo na linha correspondente da matriz H ;
- a medida do trânsito de potência (ativa ou reativa) na linha ligando os barramentos i e j envolve apenas as variáveis de estado relativas a esses barramentos e a linha correspondente de H não terá mais de quatro elementos não nulos;
- a medida da potência injetada (ativa ou reativa) no barramento i envolve as variáveis de estado deste barramento e de todos os barramentos extremidade de linhas incidentes o barramento i . Assim, a linha correspondente de H não terá mais de $2l+2$ elementos não nulos, em que l representa o número de linhas incidentes no barramento i .

- A matriz de ganho G é simétrica;
- A matriz de ganho G é esparsa.

Ainda que menos esparsa do que a matriz jacobiana (H), a matriz de ganho (G) comporta um elevado número de elementos não nulos. Conforme se pode verificar, é possível obter através da equação (3.15) o seguinte:

$$G_{ij} = \sum_{k=1}^m (H^T)_{ik} R_{kk}^{-1} (H^T)_{jk} \quad (3.55)$$

Desta forma podemos concluir que $G_{ij} \neq 0$ se, e só se, existir pelo menos uma medida k envolva simultaneamente as variáveis aleatórias i e j . Assim como cada medida envolve apenas as variáveis de estado dos barramentos adjacentes, é fácil portanto concluir que um elevado número de elementos de G serão nulos. Em contrapartida os elementos da diagonal principal da matriz G assumem valores estritamente positivos.

3.3 – MÉTODO DE FACTORIZAÇÃO ORTOGONAL

De acordo com Holten et al. [57], aquando da comparação do comportamento de diferentes métodos aplicados em estimação de estado, foi abordado o método dos mínimos quadrados ponderados linear, em que em cada iteração, o mesmo tem como objetivo minimizar a seguinte equação:

$$\begin{aligned} J(\Delta x) &= [\Delta z - H\Delta x]^T W [\Delta z - H\Delta x] \\ &= [\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x]^T W [\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x] \\ &= \|\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x\|^2 \end{aligned} \quad (3.56)$$

considerando $\tilde{H} = \sqrt{W}H$ e $\Delta \tilde{z} = \sqrt{W}\Delta z$.

Seja Q uma matriz ortogonal, ou seja $Q^T Q = I$, então $Q\tilde{H} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix}$, em que R é uma matriz triangular superior. Desta forma temos a função objetivo caracterizada por:

$$\begin{aligned} J(\Delta x) &= [\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x]^T Q^T Q [\Delta \tilde{z} - \tilde{H}\Delta x] \\ &= \|Q\Delta \tilde{z} - Q\tilde{H}\Delta x\|^2 \\ &= \|\Delta_{y1} - R\Delta x\|^2 + \|\Delta_{y2}\|^2 \end{aligned} \quad (3.57)$$

em que $Q\Delta \tilde{z} = \begin{bmatrix} \Delta_{y1} \\ \Delta_{y2} \end{bmatrix}$.

Assim atinge-se o valor mínimo da função objetivo aquando da ocorrência de $R\Delta x = \Delta_{y1}$.

3.4 – MÉTODO DAS EQUAÇÕES NORMAIS COM RESTRIÇÕES

Segundo Holten et al. em [57], e no seguimento do estudo realizado já abordado anteriormente, existe também a possibilidade da utilização de medidas virtuais (potências injetadas de valor nulo em barramentos sem geração e carga) em EE nos Sistemas Elétricos de Energia. Uma vez que estas medidas virtuais são à partida bastante precisas é-lhes atribuído um peso elevado, o que implica efetivamente problemas de convergência no processo iterativo.

Se dividirmos o vetor das medidas em duas partes, telemedidas ($z = h(x) + e$) e medidas virtuais ($c(x) = 0$), a matriz jacobiana resultante terá também que ser separada em duas submatrizes, H e C .

Então, a equação $G(x)\Delta x = H^T(x)W\Delta z$, é transformada em:

$$[H^T H + rC^T C]\Delta x = H^T \Delta z + rC^T \Delta c \quad (3.58)$$

sendo que r representa a relação entre o peso atribuído às medidas virtuais e às telemedidas obtidas pela via “normal”. Assim, quando os valores de r são muito elevados o termo $rC^T C$

da matriz dos coeficientes domina, causando problemas de convergência do processo iterativo dada a singularidade da matriz obtida. Assim, uma forma encontrada para a resolução deste problema é separar as medidas virtuais das restantes medidas, bem como trata-las como restrições de igualdade.

Desta forma, temos a seguinte função objetivo:

$$\min J(x) = [z - h(x)]^T W [z - h(x)] \quad (3.59)$$

sujeita à restrição de igualdade, $c(x) = 0$.

Tendo em vista a resolução do problema da minimização da função objetivo com restrições de igualdade, é possível resolver o mesmo recorrendo ao método dos multiplicadores de Lagrange, onde o vetor de estado estimado (\hat{x}) é obtido por um processo iterativo que resolve a cada iteração a seguinte equação linear:

$$\begin{bmatrix} H^T(x)WH(x) & C^T(x) \\ C(x) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H^T(x)W\Delta z \\ \Delta c \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

em que $\Delta z = z - h(x)$, $\Delta c = -c(x)$ e $x=x^i$ para a i -ésima iteração.

3.5 – MÉTODO DE HACHTEL'S DE MATRIZ AMPLIADA

No seguimento do ponto 3.4 onde foi abordada a problemática da minimização da função objetivo com restrições de igualdade, pode também ser resolvido pelo método de Hachtel de matriz ampliada (aumentada) [57], em que em cada iteração se resolve a seguinte equação:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & C \\ 0 & \alpha W^{-1} & H \\ C^T & H^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\alpha^{-1}\lambda \\ \alpha^{-1}W\Delta r \\ \Delta x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta c \\ \Delta z \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

onde H e C são as matrizes jacobianas obtidas de:

$$H = \frac{\partial h}{\partial x}(x) \quad e \quad C = \frac{\partial c}{\partial x}(x) \quad (3.62)$$

$\Delta z = z - h(x)$, $\Delta c = -c(x)$, $\Delta r = \Delta z - H\Delta x$, α é um parâmetro utilizado para controlar a estabilidade numérica do problema [18] e λ é o multiplicador de Lagrange.

De notar que a matriz $\begin{bmatrix} 0 & 0 & C \\ 0 & \alpha W^{-1} & H \\ C^T & H^T & 0 \end{bmatrix}$, representa a matriz dos coeficientes aumentada.

Assim a cada iteração processada as variáveis que são calculadas são $\lambda' = -\alpha^{-1}\lambda$, $\Delta r' = \alpha^{-1}W\Delta r$ e Δx .

3.6 – MÉTODO DE PETER E WILKINSON

O método de Peter e Wilkinson aplicado à estimação de estado, procede a uma minimização por mínimos quadrados (do tipo anterior já referido em 3.2) num problema que resulta de uma transformação do problema inicial [25]. Desta forma, a referida transformação compreende a factorização da matriz $A = W^{-1/2}H(x)$ em duas matrizes L e U , onde L ($m \times n$) é uma matriz trapezoidal inferior e U ($m \times n$) é uma matriz triangular superior, não singular.

Ou seja:

$$A = W^{-\frac{1}{2}} H(x) = LU \quad (3.63)$$

Assim tendo $y = Ux$, o problema da estimação de estado pode ser determinado solucionando o problema dos mínimos quadrados com a seguinte função objetivo:

$$\begin{aligned} \min \quad & r^T r \\ \text{sujeito a:} \quad & r = Ly - W^{-1/2}z \end{aligned}$$

em que para determinar y , deve-se resolver a seguinte equação:

$$(L^T L)y = L^T W^{-1/2}z \quad (3.64)$$

Desta forma, a solução do problema é obtida resolvendo o sistema de equações $y = Ux$, onde U é triangular superior.

Segundo Clements et al. em [24] a factorização da matriz A , essencial aquando da aplicação do presente método na estimação de estado em SEE, é obtida pela seguinte expressão:

$$A = \begin{bmatrix} C(x) \\ W^{-1/2}H(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & 0 \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} U \quad (3.65)$$

A resolução do problema original baseia-se então no seguinte processo sequencial:

$$L_{11}w = 0 \quad (3.66)$$

$$L_{22}^T L_{22}y = L_{22}^T W^{-1/2}z \quad (3.67)$$

$$Ux = \begin{bmatrix} w \\ y \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

3.7 – MÉTODO WLAV (WEIGHTED LEAST ABSOLUTE VALUE)

De acordo com a literatura, o método WLAV é habitualmente formulado da seguinte forma [58]:

$$\min \quad J(x) = \sum_{i=1}^m w_i |r_i| \quad (3.69)$$

sujeito a

$$z = h(x) + r \quad (3.70)$$

onde

z – é o vetor das medidas com dimensão $m \times 1$

x – é o vetor das variáveis de estado com dimensão $n \times 1$ ($n < m$)

r – é o vetor dos erros de medida com dimensão $m \times 1$

w – é o vetor dos pesos com dimensão $m \times 1$

h – é o vetor das equações não lineares que relacionam as medidas com as variáveis de estado, com dimensão $m \times 1$

O peso de cada medida está intimamente relacionado com a precisão da mesma, sendo que conforme noutras metodologias aplicadas, o peso atribuído a cada medida é tanto maior, quanto maior for a precisão da mesma. O significado de m e de n é o mesmo que tem sido referido ao longo do presente capítulo.

Executando uma aproximação de primeira ordem à equação (3.70) em torno do ponto de funcionamento x^0 , temos:

$$\Delta z = H(x^0)\Delta x + r \quad (3.71)$$

em que

$$\Delta z = z - h(x^0) \quad (3.72)$$

$$\Delta x = x - x^0 \quad (3.73)$$

$$H(x^0) = \frac{\partial h(x^0)}{\partial x} \quad (3.74)$$

e portanto

$$r = \Delta z - H(x^0)\Delta x \quad (3.75)$$

A minimização de $J(x)$ é obtida resolvendo um sequência de problemas de programação linear, através de sucessivas linearizações de $h(x)$, sendo introduzidas variáveis de folga conforme referido por Ramirez et al. em [59].

Por fim, temos a seguinte formulação:

$$\min J^k = \sum_{i=1}^m w_i (s_{2i-1} - s_{2i}) \quad (3.76)$$

sujeito a

$$[H(x^k) : U] \begin{bmatrix} (\Delta x^k) \\ s \end{bmatrix} = [\Delta z^k], \quad \text{com } (\Delta x)^k, s \geq 0 \quad (3.77)$$

em que k é o índice da sequência, s é o vetor das variáveis de folga com dimensão $2m \times 1$, $r_i = s_{2i-1} - s_{2i}$ ($i = 1, \dots, m$) e

$$U = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

3.8 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO BASEADA NA LOGICA FUZZY

Dada a robustez e fiabilidade do método WLS anteriormente referido, seguidamente far-se-á uma descrição da aplicação dos conceitos de lógica fuzzy combinada com o estimador WLS. A aproximação relativa a este algoritmo híbrido poderá ser consultada com mais detalhe em [60, 61].

O algoritmo referido no parágrafo anterior, tem como característica ser uma variante do estimador de Kalman e é baseado na relação seguinte:

$$\hat{x}(x)_{\text{ótimo}} = \alpha \hat{x}(k) + (1 - \alpha) z(k), \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3.79)$$

Relativamente ao funcionamento do processo de estimação é possível afirmar que o valor ótimo de estimação é controlado pelo parâmetro α , e que representa o peso dado à

estimação de estado obtida através dos método WLS. O valor de α tem duas maneiras de ser determinado:

- Determinação de α através das variâncias dos resíduos;
- Determinação por conhecimento do funcionamento do sistema (experiência).

Se no sistema em estudo a relação sinal/ruído for elevada, o valor a atribuir a α terá de ser elevado por forma a que as alterações transitórias do vetor das medidas ($z(k)$) sejam ignoradas. Se isso acontecer, o estimador fuzzy será preciso e os resíduos originados serão pequenos. No caso apresentado o α adapta-se tendo em conta as variações do sistema ao longo do espectro residual. Esta adaptação proporciona a obtenção de estado o ótimas.

Convém referir que as formas e variações normalmente utilizadas aquando da utilização de logica fuzzy, devem ser respeitadas, ou seja, deverão ser utilizadas formas triangulares e variações entre 0 e 1.

A figura seguinte represente o algoritmo descrito, sendo que podem ser também consultadas outras contribuições importantes em [62, 63].

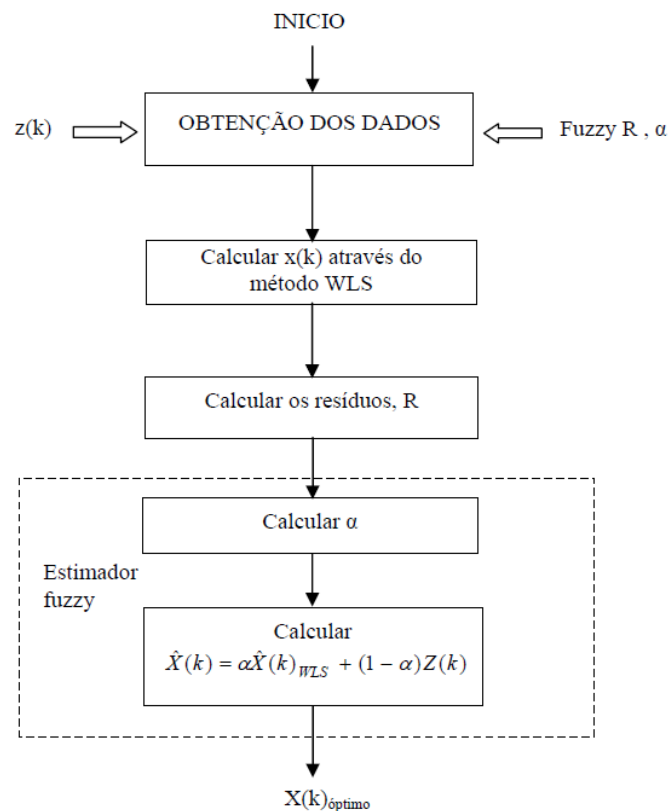


Figura 3.2 – Algoritmo de estimação de estado integrando conceitos de lógica fuzzy.

3.9 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO RECORRENDO A PMU’S

O presente ponto pretende elucidar a aplicabilidade das unidades de medição fasorial PMU (Phasor Measurement Unit) em estimação de estado dos sistemas elétricos de energia. O grande avanço tecnológico verificado relativamente aos equipamentos de recolha e transmissão de dados aplicados em EE, bem como o longo estudo desenvolvido nesta temática, permitiu conceber um sistema que permite medir grandezas fasoriais de tensão e corrente bem como potências e frequência, sincronizadas no tempo.

Como já foi abordado ao longo da presente dissertação, para o processo de estimação de estado ser bem-sucedido, é imperativo que as informações fornecidas ao estimador sejam coerentes e fiáveis. Ao contrário dos sistemas de aquisição de dados convencionais SCADA, as PMU’s tornam disponíveis as informações de ângulo e fase sincronizados no tempo e garantem a disponibilidade de grandes taxas de amostragem, permitindo a utilização de tais dados no processo de estimação de estado. A maior vantagem proveniente da utilização de medidas sincronizadas está no facto de permitirem a aquisição de medidas localizadas em pontos geograficamente distantes, uma vez que usam o sistema GPS como sincronizador. Estas vantagens fazem com que seja desejável que o estimador de estado disponha cada vez mais de medidas deste tipo. Desta forma o processo de incluir e, inclusivamente, substituir as medidas convencionais por medidas provenientes das PMU’s tornou-se objeto de estudo de muitos técnicos e investigadores, onde são apresentados resultados melhores na precisão das medidas e no comportamento em comparação com os estimadores de estados originais [64-72].

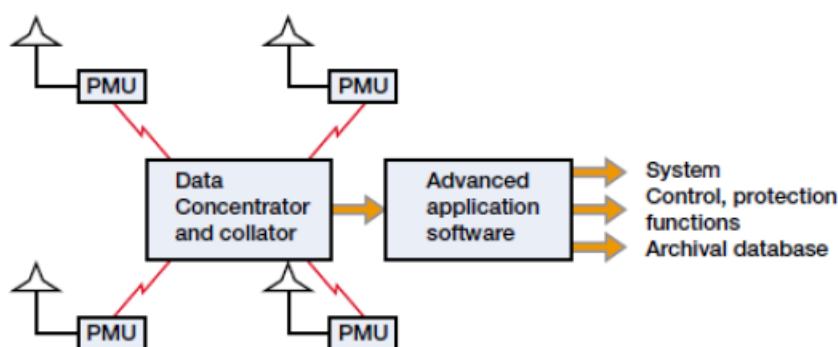


Figura 3.3 – Blocos de um sistema PMU associado a Sistema de Energia [72].

De acordo com os diversos estudos divulgados na literatura por diversos investigadores, a integração de dados provenientes de PMU's em algoritmos existentes podem ser divididos fundamentalmente de duas maneiras [73]:

- Inclusão das medidas fasoriais num processo de estimação único (Integração na EE convencional);
- Utilização de medidas fasoriais após o processo de estimação de estado (Pós-Processamento do EE convencional).

O uso de correntes nas linhas provenientes de PMU's, representadas na forma polar conduz a problemas de convergência, o que leva à utilização das formulações referidas acima. Assim, de uma forma sucinta, serão apresentados os modelos matemáticos que caracterizam as diferentes abordagens já referidas, sendo que importa referir que nos modelos matemáticos seguintes, os mesmos têm como base o método WLS já analisado de forma detalhada no ponto 3.2.

3.9.1 – INCLUSÃO DAS MEDIDAS FASORIAIS NUM PROCESSO DE ESTIMAÇÃO ÚNICO

A abordagem relativa à combinação dos dois conjuntos de medidas (medidas provenientes do sistema SCADA convencionais e medidas fasoriais PMU's) pode ser representada conforme a figura 15:

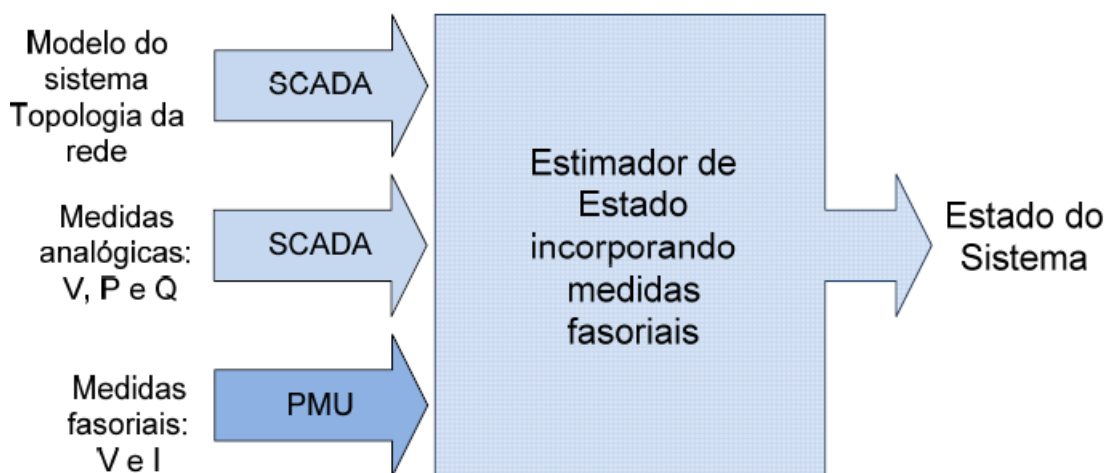


Figura 3.4 – Representação de EE com integração de PMU's e medidas convencionais [64].

Se a inclusão de medidas fasoriais relativas à amplitude de tensão e ângulo de fase, ou seja o fasor da tensão representado na forma polar, forem as únicas utilizadas, não há ocorrência de quaisquer problemas numéricos ou de convergência do algoritmo WLS. Contudo a integração de medidas fasoriais sincronizadas de correntes nas linhas continua a evidenciar dificuldades de convergência, sendo um dos grandes desafios dos estimadores que utilizam medidas provenientes das PMU's [74].

Uma outra abordagem que utilizou medidas de corrente injetadas na sua forma retangular nos barramentos que dispõem de PMU's, obtendo bons resultados pode ser consultada em [64] em maior pormenor, sendo que a adição de medidas fasoriais a um sistema existente que já contem m medidas, faz com que a matriz jacobiana de medida aumente por adição de linhas correspondentes às derivadas parciais da parte real e parte imaginaria das correntes injetadas em função da amplitude da tensão e do ângulo de fase.

Assim os novos elementos pertencentes à matriz jacobiana $H(x)$ são:

$$\frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial \theta_i} = -V_i(G_{ii}\text{sen } \theta_i + B_{ii}\text{cos } \theta_i) & (3.80) \\ \frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial \theta_j} = V_i(G_{ij}\text{sen } \theta_j + B_{ij}\text{cos } \theta_j) & (3.81) \end{cases}$$

$$\frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial V} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial V_i} = (G_{ii}\text{cos } \theta_i - B_{ii}\text{sin } \theta_i) & (3.82) \\ \frac{\partial I_{i_{REAL}}}{\partial V_j} = -(G_{ij}\text{cos } \theta_j - B_{ij}\text{sin } \theta_j) & (3.83) \end{cases}$$

$$\frac{\partial I_{i_{IMAG}}}{\partial \theta} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial I_{i_{IMAG}}}{\partial \theta_i} = V_i(G_{ii}\text{cos } \theta_i - B_{ii}\text{sin } \theta_i) & (3.84) \\ \frac{\partial I_{i_{IMAG}}}{\partial \theta_j} = -V_i(G_{ij}\text{cos } \theta_j - B_{ij}\text{sin } \theta_j) & (3.85) \end{cases}$$

$$\frac{\partial I_{iMAG}}{\partial V} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial I_{iMAG}}{\partial V_i} = (G_{ii} \text{sen } \theta_i + B_{ii} \text{cos } \theta_i) \end{array} \right. \quad (3.86)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial I_{iMAG}}{\partial V_j} = -(G_{ij} \text{sen } \theta_j + B_{ij} \text{cos } \theta_j) \end{array} \right. \quad (3.87)$$

sendo a matriz jacobiana modificada representada pela seguinte matriz:

$$H(x) = \left[\begin{array}{c|c} \frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta} & \frac{\partial P_i}{\partial V} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_{ij}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{ij}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_i}{\partial V} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial V_i}{\partial \theta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \hline \frac{\partial \theta_i}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_i}{\partial V} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial V_i}{\partial \theta} & \frac{\partial V_i}{\partial V} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial I_{iREAL}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{iREAL}}{\partial V} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial I_{iMAG}}{\partial \theta} & \frac{\partial I_{iMAG}}{\partial V} \end{array} \right] \quad (3.88)$$

3.9.2 – UTILIZAÇÃO DE MEDIDAS FASORIAIS APÓS O PROCESSO DE ESTIMAÇÃO DE ESTADO

O método que se apresenta neste ponto, pretende elucidar a incorporação das medidas obtidas através de PMU's após o processo de estimação de estado convencional, sendo que no mesmo se efetua um pós-processamento da solução recorrendo a um processo de EE linear onde se recorre às medidas provenientes das PMU's disponíveis no sistema. Desta forma o vetor estado do sistema obtido pelo processo de estimação convencional é atualizado pelo processo de estimação de estado linear conforme representado pela Figura 3.5:

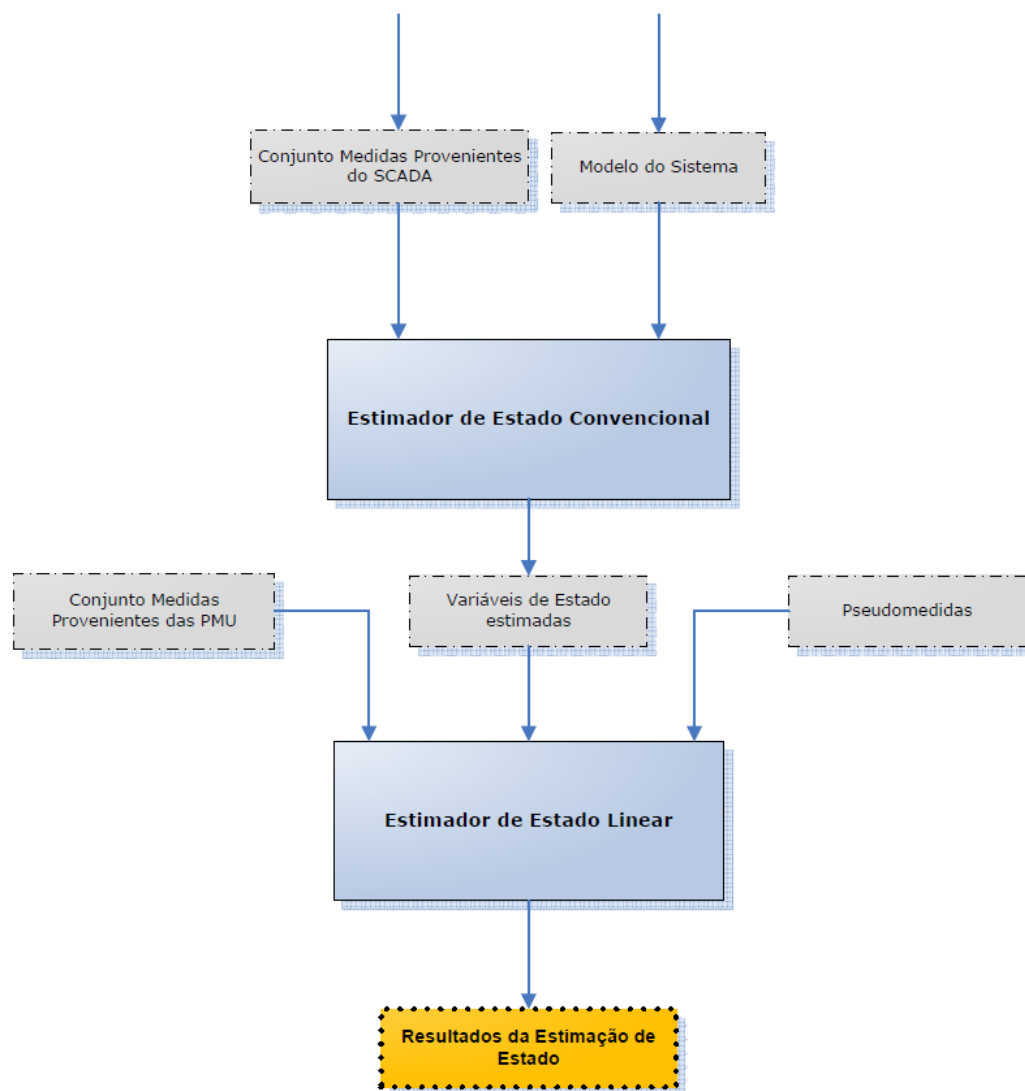


Figura 3.5 – Representação de EE em que se incorpora PMU's após realização do processo de EE convencional [64].

O modelo de pós-processamento de estimação de estado linear onde já são conhecidos os valores do vetor estado pelo processo convencional, pode ser formulado pela seguinte expressão [93,119,120]:

$$z_{comb} = H_{comb} \cdot \hat{x} + e_{medidas} \quad (3.89)$$

O vetor das medidas z_{comb} combina medidas de diferentes proveniências onde se enumeram as seguintes:

- Medidas de amplitude de tensão e ângulo de fase no barramento i que são resultantes da estimação de estado não linear (vetor de índice *estim*);
- Vetor de medidas em que correspondem às medidas fasoriais de tensão e corrente injetada no barramento i fornecidas pelas PMU's (vetor com índice *PMU*);
- Vetor de pseudomedidas correspondente às coordenadas retangulares da corrente injetada no barramento i calculadas com base nos valores estimados das variáveis de estado (vetor de índice *pseudomed*).

Os elementos constituintes da matriz H_{comb} correspondentes às medidas de fase e amplitude da tensão nos diferentes barramentos provenientes de PMU's ou resultantes da estimação de estado não linear, exibem uma matriz de zeros com uns nas colunas associadas à variável de estado. Os restantes elementos da matriz H_{comb} integram as medidas fasoriais de corrente provenientes das PMU's, quer as pseudomedidas calculadas com base no resultado obtido pela estimação de estado não linear.

Desta forma pode-se definir a matriz H_{comb} por:

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} |V_i| \\ \theta_i \end{bmatrix}_{estim} \\ \begin{bmatrix} |V_i| \\ \theta_i \\ I_{ireal} \\ I_{iimag} \end{bmatrix}_{PMU} \\ \begin{bmatrix} I_{ireal} \\ I_{iimag} \end{bmatrix}_{pseudomed} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{ireal}}{\partial |V_i|} & \frac{\partial I_{ireal}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial I_{iimag}}{\partial |V_i|} & \frac{\partial I_{iimag}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \frac{\partial I_{ireal}}{\partial |V_i|} & \frac{\partial I_{ireal}}{\partial \theta_i} \\ \frac{\partial I_{iimag}}{\partial |V_i|} & \frac{\partial I_{iimag}}{\partial \theta_i} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |V_i| \\ \theta_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{|V_i|estim} \\ e_{\theta_i estim} \\ e_{|V_i|PMU} \\ e_{\theta_i PMU} \\ e_{I_{ireal} PMU} \\ e_{I_{iimag} PMU} \\ e_{I_{ireal} pseudomed} \\ e_{I_{iimag} pseudomed} \end{bmatrix} \quad (3.90)$$

E de acordo com a equação (3.3), o problema baseado no método WLS temos o seguinte:

$$J = [z_{comb} - H_{comb}\hat{x}_{final}]^{-1}R^{-1}[z_{comb} - H_{comb}\hat{x}_{final}] \quad (3.91)$$

onde a formulação que satisfaz as condições de ótimas de primeira ordem, resulta:

$$\left. \frac{\partial J(x)}{\partial(x)} \right|_{x=\hat{x}_{final}} = -H_{comb}^T R^{-1} [z_{comb} - H_{comb}\hat{x}_{final}] = 0 \quad (3.92)$$

sendo que o vetor \hat{x}_{final} é obtido através do calculo não iterativo pela resolução da equação,

$$H_{comb}^T R^{-1} H_{comb} \hat{x}_{final} = H_{comb}^T R^{-1} z_{comb} \quad (3.93)$$

Na figura 3.6 apresenta-se um fluxograma de um procedimento de estimação que reflete o estudo anteriormente descrito, e que poderá ser alvo de análise em maior pormenor em [64]:

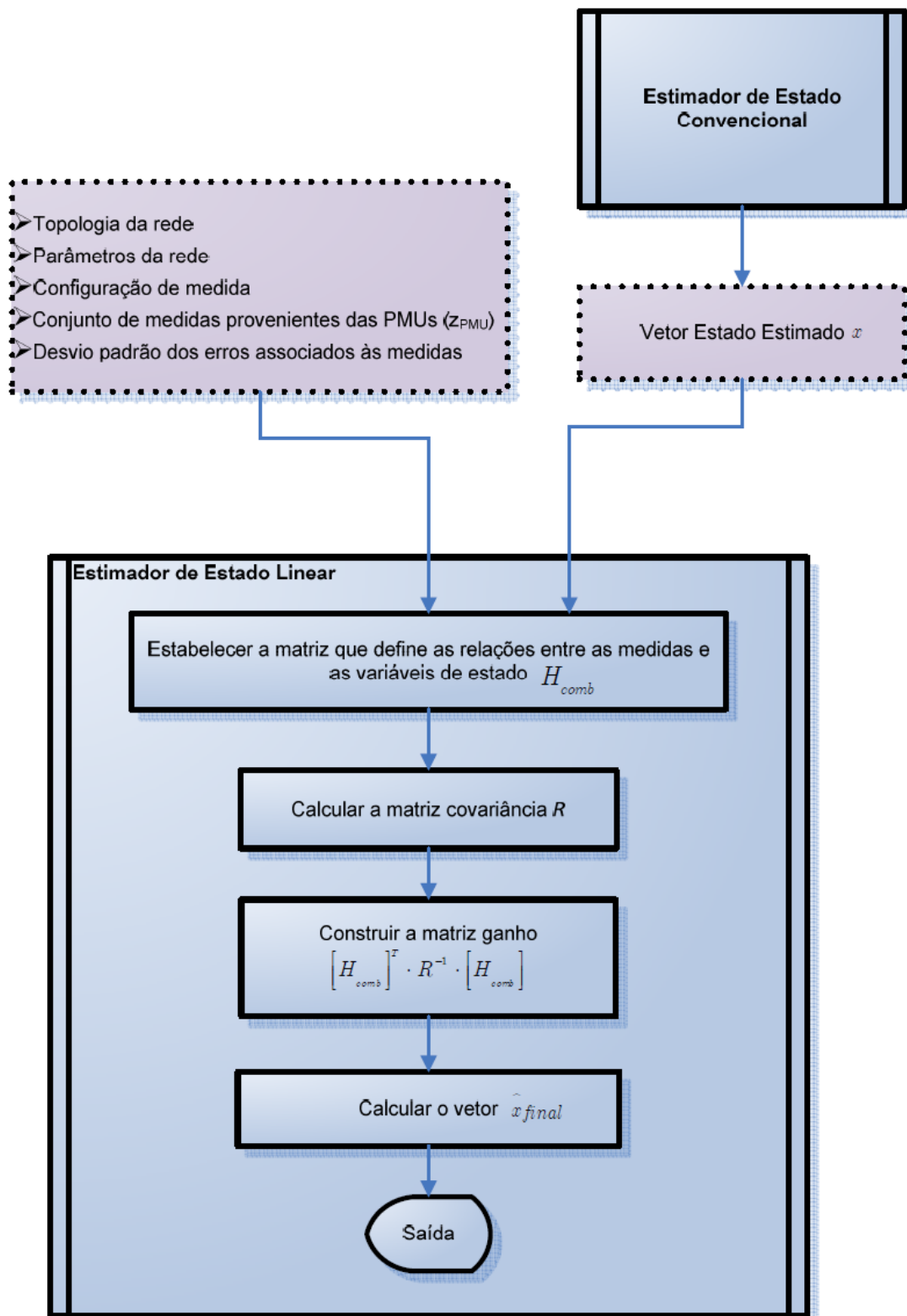


Figura 3.6 – Fluxograma exemplificativo de implementação de um algoritmo de EE que representa a abordagem em que se incorpora medidas provenientes de PMU’s após realização do processo de EE convencional [64].

3.10 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO PELO MÉTODO RÁPIDO BASEADO NO PRINCÍPIO DE DESACOPLAMENTO

3.10.1 – ESTIMADOR DESACOPLADO

Como já referido nos capítulos anteriores, a EE é uma ferramenta informática fundamental em todos os Centros de Controlo e Condução modernos existentes, onde a sua função é providenciar aos Gestores de Condução, uma base de dados completa, consistente e fiável, que lhes permita uma análise dos dados obtidos tendo em vista a sua análise e poder efetuar os trabalhos de condução ótima e monitorização de segurança.

Sendo a aplicabilidade da EE em SEE fundamental em modo real (“on-line”), e considerando a elevada dimensão e complexidade das redes elétricas existentes, o esforço computacional inerente ao processo de estimação aliado à elevada capacidade de memória necessária para o efeito, provoca problemas na sua aplicabilidade, o que obriga ao desenvolvimento de algoritmos que possuam as mesmas características de resultados obtidos pelo método WLS, mas garantindo também baixos recursos de memória e reduzidos tempos computacionais. Desta forma a aplicação do método WLS para a estimação de estado de um sistema com N barramentos implica a resolução de $2N-1$ equações não lineares, onde na utilização do método de Gauss (3.16) para a resolução do referido problema exige a cada iteração a construção e resolução de um sistema linear de dimensão $2N-1$. Assim, com o objetivo de contornar estas dificuldades assistimos ao desenvolvimento de Estimadores de Estado de Desacoplamento Rápido (FDSE – Fast Decoupled State Estimator) [20, 37-39, 75-77].

Conforme descrito no parágrafo anterior, o maior problema associado à utilização do algoritmo WLS na EE, reside no cálculo e respetiva decomposição triangular da matriz de Ganho a cada iteração, sendo que uma forma de se reduzir este esforço computacional e de memória, é a cada iteração manter uma matriz de Ganho constante mas aproximada, uma vez que após várias simulações e testes constatou-se que a mesma não sofre alterações significativas entre a situação correspondente à inicialização e à situação correspondente à solução de convergência. Outra constatação importante é que, é vulgar considerar como método de simplificação de equações matemáticas, a fraca relação entre as potências ativas e o módulo da tensão, por um lado, e a fraca relação entre as potências reativas e a fase da

tensão, por outro. Desta forma, fez-se uso deste desacoplamento e procedeu-se à formulação de algoritmos de Estimação de Estado FDSE.

Assim na formulação proposta, as equações de medida são divididas em duas partes, sendo elas as seguintes:

1. Medidas de potência ativa, onde se incluem as potências ativas injetadas nos barramentos e trânsitos de potência nas linhas;
2. Medidas de potência reativa, onde se incluem as potências reativas injetadas nos barramentos e os trânsitos de potência reativas nas linhas.

Considere-se então, o modelo das medidas de acordo com a equação (2.3) dividido nas partes ativa e reativa, ou seja:

$$z = \begin{bmatrix} z_P \\ - \\ z_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_P(x) \\ - \\ h_Q(x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_P \\ - \\ e_Q \end{bmatrix} \quad (3.94)$$

em que:

z_P – corresponde ao vetor das medidas de potencia ativa injetada nos barramentos e de transito de potencia ativa nas linhas.

z_Q – corresponde ao vetor das medidas de potencia reativa injetada nos barramentos e de transito de potencia reativa nas linhas.

Desta forma a matriz Jacobiana de medida $H(x)$, pode ser dividida em quatro submatrizes do seguinte modo:

$$H(x) = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & | & H_{PV} \\ - & - & - \\ H_{Q\theta} & | & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.95)$$

e a matriz covariância R definida por:

$$R = \begin{bmatrix} R_P & | & 0 \\ - & - & - \\ 0 & | & R_Q \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

Admitindo como válidos os pressupostos em que se baseia o princípio do desacoplamento (método FDSE), consideram-se as seguintes aproximações:

- São assumidas as condições de inicialização para todas tensões nos barramentos iguais a 1 p.u. e argumento igual a 0 rad., ou seja:

$$|V_i| = 1 \text{ p.u.} \quad \cos\theta_{ik} \approx 1 \quad (3.97)$$

$$|G_{ik}\text{sen}\theta_{ik}| \ll |B_{ik}\text{cos}\theta_{ik}| \quad (3.98)$$

tendo como resultado:

$$|H_{Q\theta}| \ll |H_{P\theta}| \quad e \quad |H_{PV}| \ll |H_{QV}| \quad (3.99)$$

em que $|H|$ representa o módulo dos elementos de H . A matriz jacobiana $H(x)$ é então aproximada pelas duas submatrizes $H_{P\theta}$ e H_{QV} :

$$H(x) = \left[\begin{array}{c|c} H_{P\theta} & 0 \\ \hline 0 & H_{QV} \end{array} \right] \quad (3.100)$$

Onde a matriz Ganho $G(x)$ é:

$$G(x) = \left[\begin{array}{c|c} G_{a\theta} & G_{aV} \\ \hline G_{r\theta} & G_{rV} \end{array} \right] \quad (3.101)$$

em que:

$$G_{a\theta} = H_{P\theta}^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_{P\theta} + H_{Q\theta}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_{Q\theta} \quad (3.102)$$

$$G_{aV} = H_{P\theta}^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_{PV} + H_{Q\theta}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_{QV} \quad (3.103)$$

$$G_{r\theta} = H_{PV}^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_{P\theta} + H_{QV}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_{Q\theta} \quad (3.104)$$

$$G_{rV} = H_{PV}^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_{PV} + H_{QV}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_{QV} \quad (3.105)$$

Considerando a matriz de Ganho completamente desacoplada, temos a seguinte aproximação onde se eliminam as submatrizes fora da diagonal principal da matriz (3.101), estabelecendo-se a seguinte matriz [78, 79]:

$$G(x) = \left[\begin{array}{c|c} G_{a\theta} & 0 \\ \hline 0 & G_{rV} \end{array} \right] \quad (3.106)$$

com

$$G_{a\theta} = H_{P\theta}^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_{P\theta} \quad (3.107)$$

$$G_{rV} = H_{QV}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_{QV} \quad (3.108)$$

Relativamente ao vetor $g(x)$ dado por (3.9) e correspondente ao segundo membro do processo iterativo descrito pela equação (3.15), pode-se ser representado da seguinte forma simplificada:

$$g(x) = H^T \cdot R^{-1} \cdot (z - h(x)) = [g_\theta^T \quad g_V^T]^T \quad (3.109)$$

sendo

$$g_\theta = H_{P\theta}^T \cdot R_P^{-1} \cdot [z_p - h_p] + H_{Q\theta}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot [z_Q - h_Q] \quad (3.110)$$

$$g_V = H_{PV}^T \cdot R_P^{-1} \cdot [z_p - h_p] + H_{QV}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot [z_Q - h_Q] \quad (3.111)$$

E para os estimadores completamente desacoplados:

$$g_\theta = H_{P\theta}^T \cdot R_P^{-1} \cdot [z_p - h_p] \quad (3.112)$$

$$g_V = H_{QV}^T \cdot R_Q^{-1} \cdot [z_Q - h_Q] \quad (3.113)$$

Desta forma, o desacoplamento é a substituição do sistema de equações lineares (3.16) de dimensão $n = 2N-1$, por dois sistemas de dimensão $N-1$ e N respetivamente, que pelos estudos efetuados, verificam melhorias significativas no que diz respeito ao tempo de utilização computacional e ao espaço de memória ocupada. Os sistemas apresentados são definidos como:

$$G_{a\theta}[\theta(k), V(k)] \cdot [\Delta\theta] = g_{\theta}[\theta(k), V(k)] \quad (N - 1) \quad (3.114)$$

$$G_{rV}[\theta(k), V(k)] \cdot [\Delta V] = g_V[\theta(k), V(k)] \quad (N) \quad (3.115)$$

onde

$$\Delta\theta = \theta(k + 1) - \theta(k) \quad (3.116)$$

$$\Delta V = V(k + 1) - V(k) \quad (3.117)$$

Como é possível verificar, desta forma obtém-se melhorias significativas no desempenho do estimador, mas como é sabido, os estimadores desacoplados apresentam problemas na convergência do algoritmo, sendo que de forma a não colocar em causa a sua convergência, é usual na mesma iteração, atualizar o vetor relativo à resolução do primeiro sistema no correspondente vetor do segundo sistema, e só depois avançar para a sua resolução, ou seja:

$$G_{rV}[\theta(k + 1), V(k)] \cdot [\Delta V] = g_V[\theta(k + 1), V(k)] \quad (3.118)$$

Na presente caracterização é admitido que a matriz $H_{P\theta}$ é caracterizada desprezando as resistências em serie (Estimador Linearizado por aplicação do modelo DC), pelo que os elementos das submatrizes constituintes da matriz jacobiana de medida (H_P e H_Q), ou coincidem com os parâmetros da linha ou, então, são uma combinação linear desses parâmetros, evitando assim o calculo explicito e o conseqüente armazenamento dos elementos dessas matrizes [37, 39].

Desta forma, e respeitando as condições descritas, o processo recursivo traduzido pelas equações (3.114) e (3.115) poderá ser escrito da seguinte forma:

$$\theta(k + 1) = \theta(k) + [H_P^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_P]^{-1} \cdot H_P^T \cdot R_P^{-1} \cdot [z_p - h_p(\theta(k), V(k))] \quad (3.119)$$

$$V(k + 1) = V(k) + [H_Q^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_Q]^{-1} \cdot H_Q^T \cdot R_Q^{-1} \cdot [z_Q - h_Q(\theta(k + 1), V(k))] \quad (3.120)$$

em que as submatrizes de ganho G_θ e G_V dadas por:

$$G_\theta = H_P^T \cdot R_P^{-1} \cdot H_P \quad (3.121)$$

$$G_V = H_Q^T \cdot R_Q^{-1} \cdot H_Q \quad (3.122)$$

são calculadas, fatorizadas e armazenadas apenas uma vez no início do processo iterativo, o que resulta numa considerável redução do tempo de execução relativamente ao algoritmo WLS básico [39, 80].

Convém também referir que todos os estimadores de estado desacoplados existentes na literatura admitem $G_{\theta V} = 0$, sendo que com os diversos estudos e simulações efetuados surgiam na literatura diversas variantes que se distinguem pelo grau de simplificação implementado para as expressões relativas a $G_{a\theta}$ (3.102), G_{rV} (3.105), g_θ (3.110) e g_V (3.111) [38, 39]. As mais abordadas na literatura são:

- Estimadores de matriz de ganho desacoplados;
- Estimadores completamente desacoplados.

3.10.2 – ESTIMADOR DE ESTADO LINEARIZADO. MODELO DC

Como existe a necessidade de em alguns casos recorrer a simplificações no que diz respeito ao cálculo do vetor estado do sistema (análises das limitações de vários métodos relacionados com as configurações de medida iniciais), é utilizado o modelo simplificado DC nas equações de medida.

Com o objetivo de obter um maior grau de simplificação e criação de melhorias das características de convergência dos algoritmos, a abordagem utilizada com sucesso nos algoritmos de transito de potencias, em que se considera que $V_i \approx 1 \text{ p.u.}$, (\forall_i) e desprezar as resistências serie dos diferentes ramos, provoca uma grande simplificação nas equações de medida (apenas ativas) e na matriz jacobiana de medida, que se torna independente do vetor estado do sistema.

Ao desprezar as susceptâncias e as resistências nas linhas (considerando $R \ll X$), o trânsito de potência ativa medida no barramento i para o barramento j pode ser aproximado pela expansão em série de Taylor de 1ª ordem em torno de $\theta = 0$, de acordo com:

$$P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} + e \quad (3.123)$$

onde

x_{ij} – corresponde à reactância da linha i - j ;

θ_i – corresponde ao ângulo de fase no barramento i ;

e – corresponde ao erro de medida.

A medida de potência injetada num barramento i pode ser expressa como soma dos trânsitos nas linhas incidentes ao nó i , de acordo com:

$$P_i = \sum_{k \in \aleph_i} P_{ik} + e \quad (3.124)$$

onde \aleph_i caracteriza o conjunto de barramentos ligados ao nó i .

Assim, o modelo DC para medidas de potência ativa pode ser expresso na sua forma matricial:

$$z_p = H_{p\theta} \cdot \theta + e_p \quad (3.125)$$

onde

z_p – corresponde ao vetor de medidas que inclui as medidas de potencias ativa injetada nos barramentos e às medidas de transito de potencias nas linhas;

$H_{p\theta}$ – corresponde apenas às reatâncias de linha;

e_p – corresponde ao vetor dos erros aleatórios.

Importa referir que o ângulo de fase que corresponde ao barramento de compensação e referência, é excluído do vetor θ que corresponde aos ângulos de fase das tensões nos barramentos e a correspondente coluna na matriz $H_{p\theta}$ é removida.

Nos algoritmos desacoplados, nomeadamente os completamente desacoplados e os que utilizam o modelo DC, qualquer que seja a modificação introduzida no termo independente (segundo membro) do processo iterativo descrito na equação (3.16), modifica a solução para o qual o algoritmo converge. A solução obtida não é mais ótima, no sentido de minimizar a função $J(x)$. Por outro lado os estimadores de matriz de ganho desacoplada, que mantém intacto o termo independente de (3.16), convergem para a mesma solução do algoritmo base (Gauss).

Na Figura 3.7 apresenta-se um fluxograma que corresponde a um estimador completamente desacoplado, com matriz jacobiana H independente do vetor de estado do sistema, onde para a caracterização pormenorizada do mesmo temos as contribuições presentes na literatura [37, 39, 80].

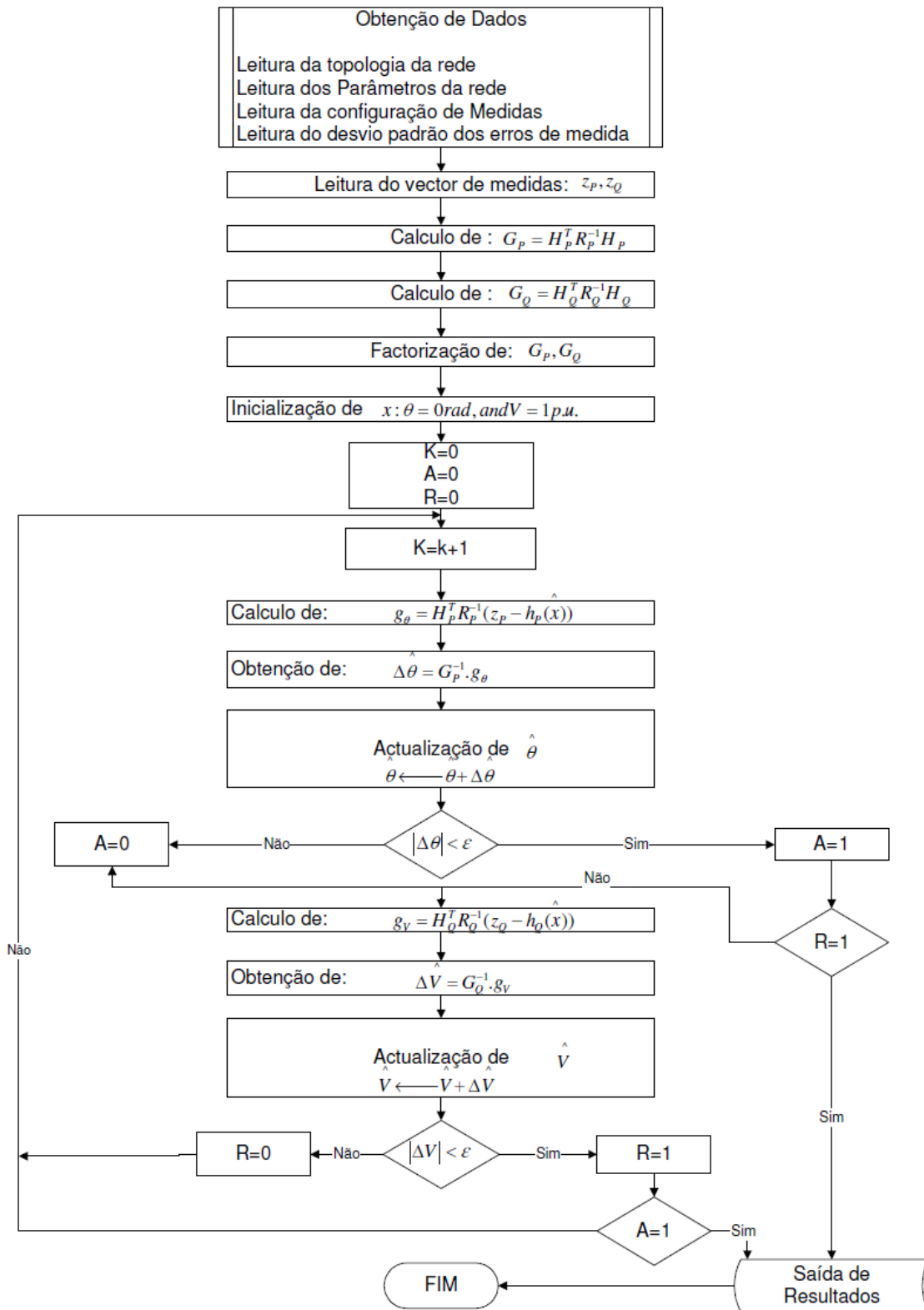


Figura 3.7 – Exemplo de fluxograma de um estimador desacoplado (FDSE) [81].

3.11 – ESTIMAÇÃO DE ESTADO DINÂMICA

Os sistemas elétricos de energia, mais propriamente no que diz respeito á produção, transporte e distribuição, são variantes no tempo, pelo que a utilização de algoritmos de estimação de estado estáticos, poderão não ser suficientes atendendo às necessidades dos centros de condução [82].

Posto isto, existiu um esforço pela comunidade científica, no sentido de investigar e criar as características da evolução do vetor estado (x) no tempo, dando desta forma origem aos chamados algoritmos de “estimação de estado dinâmica”. Estes algoritmos, baseiam-se na determinação de um modelo que descreva aproximadamente a evolução no tempo do vetor de estado do sistema (x), recorrendo a dados do momento presente, e pela previsão do estado do sistema em momentos futuros.

Desta forma o algoritmo para responder às necessidades descritas anteriormente recorre a dois tipos de informação fundamental:

- dados “brutos” que chegam a intervalos de tempo regulares ao centro de condução;
- conhecimento do passado do sistema e com isso a possibilidade de prever a sua evolução futura.

De acordo com a literatura, os algoritmos que recorrem a este tipo de solução, baseiam-se em algoritmos que utilizam os filtros de Kalman, existindo a possibilidade de construir uma base de dados preditiva que vai à posteriori permitir uma deteção antecipada de anomalias tendo por base o vetor das inovações, $\tilde{z}(k)$ [40-42]. Conforme já observado anteriormente, os algoritmos obedecem a processos, sendo que nos algoritmos de estimação de estado dinâmica baseados nos filtros de Kalman, existem duas etapas fundamentais caracterizadas por:

1. Etapa de previsão;
2. Etapa de Filtragem.

A primeira etapa correspondente à previsão, procede-se ao calculo do vetor das inovações normalizado, \tilde{z}_N . Seguidamente, é necessário aferir quais as componentes de \tilde{z}_N com valor absoluto superior a um determinado limiar de deteção, λ^* . Caso todos os dados

do vetor anteriormente exposto se verificarem inferiores a λ^* , então, pode-se concluir que não foram encontradas anomalias no funcionamento do SEE em análise.

Na segunda etapa, conforme referido, realiza-se a filtragem das medidas obtidas no instante k após a determinação da matriz de Ganho $K(k)$.

Desta forma, apresentam-se as equações que após a determinação de $K(k)$, permitem obter o estado filtrado $\hat{x}(k|k)$ e a matriz covariância do erro de estimação $\Sigma(k|k)$. Assim:

$$K(k) = \sum (k|k-1) H^T(k) \left[H(k) \sum (k|k-1) H^T(k) + R(k) \right]^{-1} \quad (3.126)$$

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}(k|k-1) + K(k) [z(k) - h(\hat{x}(k|k-1), k)] \quad (3.127)$$

e

$$\Sigma(k|k) = [I - K(k)H(k)] \Sigma(k|k-1) \quad (3.128)$$

com

$$H(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}(k|k-1)} \quad (3.129)$$

No Anexo A, podem ser consultadas as equações relativas ao filtro de Kalman, bem como as equações das respectivas etapas de previsão e filtragem aqui expostas. O vetor das inovações é calculado recorrendo à seguinte equação:

$$\begin{aligned} \hat{z}(k|k-1) &= z(k) - \hat{z}(k|k-1) \\ &= z(k) - h(\hat{x}(k|k-1)) \end{aligned} \quad (3.130)$$

Pode ser visualizado na Figura 3.8, a sequência e encadeamento entre as fases de previsão e filtragem no algoritmo exposto.

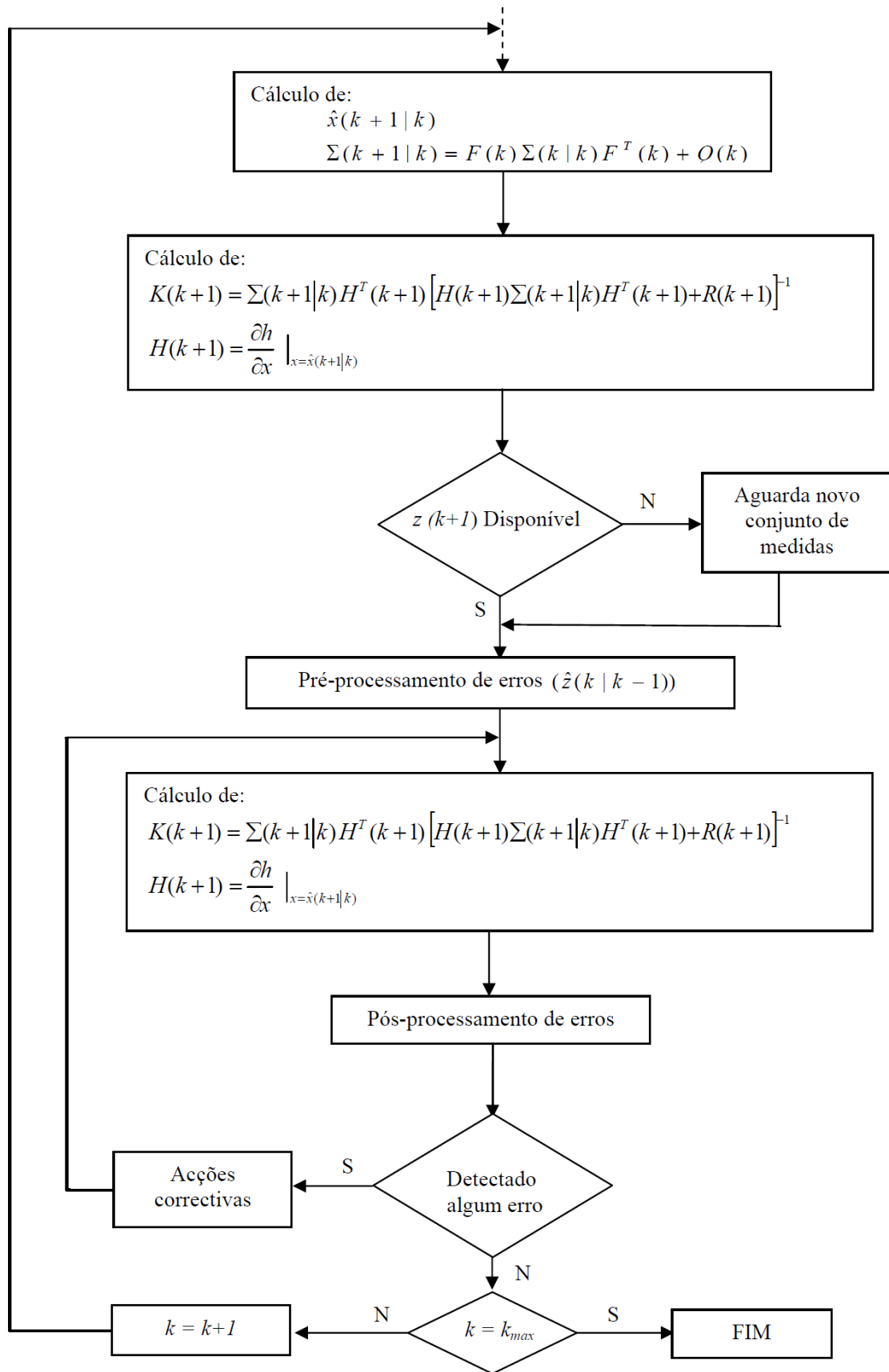


Figura 3.8 – Etapas de um algoritmo de previsão e filtragem de um estimador dinâmico baseado no filtro de Kalman [8].

Conforme verificado, a estimação de estado dinâmica pode produzir dados e informações muito importantes sobre o estado do sistema, dada a possibilidade da estimação em dois momentos distintos (atual e futuro). Esta vantagem permite, ao gestor do sistema, uma melhoria na sua supervisão, desempenho e aumento de segurança. Pese embora a vantagem relativa aos estimadores estáticos (capacidade de previsão), atendendo à dimensão atual dos SEE e à dificuldade de modelizar a dinâmica dos sistemas, estes estimadores são muito pesados computacionalmente, tornando difícil a sua implementação nos centros de controlo. Através de uma abordagem simplificativa do problema, bem como o encontro de outros processos de aquisição de dados, que permitam aliviar o esforço computacional e o esforço de cálculo, são hoje alvo de intensa investigação, investigação essa, que tem por objetivo a sua aplicabilidade em contexto real de funcionamento.

3.12 – CONCLUSÃO

No presente capítulo analisou-se com detalhe a modelização da rede dos SEE, bem como se expos a importância da criação de uma base de dados coerente e fiável, por forma a ser possível nos centros de condução e exploração garantir a segurança e continuidade de serviço exigidos. Conforme referido, a criação de uma base de dados coerente e fiável, representa a finalidade primordial da criação dos algoritmos de estimação de estado. Fez-se também uma caracterização aprofundada do método WLS, dado ser o método escolhido para a elaboração do algoritmo implementado.

Abordaram-se também várias simplificações utilizadas na literatura relacionadas ao método WLS, bem como foram expostas outras vertentes de cálculo que pretendem garantir maior estabilidade, rapidez e simplificação face ao método WLS.

Como exemplos, temos os estimadores baseados na lógica fuzzy, a estimação de estado que integra as medidas provenientes de PMU's, estimadores desacoplados e estimadores dinâmicos.

Relativamente a cada método, explicitou-se as vantagens e desvantagens de cada um em relação ao método WLS clássico.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIAS DE DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

Capítulo 4

METODOLOGIAS DE DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

4.1- INTRODUÇÃO

A estimação de estado em SEE, pode-se definir como um procedimento estatístico destinado a obter a melhor estimativa do verdadeiro estado do sistema a partir de um conjunto de medidas nele efetuado, sendo que o objetivo consiste em determinar uma base de dados coerente e fiável a partir da qual, as decisões para o controlo do sistema serão tomadas. Neste sentido, a EE quando aplicada aos SEE, utiliza informações provenientes na sua grade maioria nos equipamentos de medida instalados no sistema [9, 83].

Estas medidas são enviadas por sistemas de telemedida até ao centro de controlo, onde são processadas por outros equipamentos (por exemplo, conversores analógico/digitais, recetores,...) até que se possam considerar disponíveis para alimentar o estimador de estado. Todos estes equipamentos têm associada uma determinada precisão, quando em funcionamento normal. Os algoritmos de estimação de estado consideram este fato, atribuindo a cada medida um fator de ponderação (σ) fundamental para a utilização de procedimentos estatísticos cujo objetivo é a obtenção de uma estimativa do estado do sistema. Os equipamentos envolvidos nas medidas estão contudo, sujeitos a avarias ou mau funcionamento que poderão resultar em medidas sem validade ou afetadas de erros grosseiros. Estas medidas, se não forem corrigidas ou eliminadas dos dados de entrada do estimador, irão corromper severamente o seu desempenho. Situação análoga ocorre com a informação transmitida aos centros de controlo sobre a configuração da rede (estado atual dos seccionadores e disjuntores). Há assim necessidade de incluir nos programas de estimação de estado meios de identificar as medidas que apresentam erros grosseiros [9, 84].

Desta forma podemos afirmar que num Sistema Elétrico de Energia as medidas obtidas podem ser afetadas por quatro categorias principais, sendo elas:

- Ruídos de Medida;
- Erros Grosseiros de Medida;
- Erros de topologia de Sistema;
- Erros nos parâmetros do modelo.

em que,

O **Ruído de Medida** consiste num pequeno erro estatisticamente "bem comportado", o qual deriva de medidas recolhidas na rede e que resultam de diferentes fatores: precisão, interferências e deficiente calibração dos aparelhos de medida mas que pode ser bem controlado.

Os **Erros Grosseiros de Medida** resultam principalmente do mau funcionamento dos aparelhos de medida, dos transdutores, dos meios de transmissão, ou ainda de medidas efetuadas durante fenómenos transitórios (um curto circuito p. ex.). É normal este tipo de erros manifestar-se após a realização de trabalhos de manutenção ou após a instalação de novo equipamento. O aparecimento de vários erros grosseiros simultâneos, pode ser perfeitamente casual ou consequência do mau funcionamento de um dispositivo comum a várias medidas.

Os **Erros de topologia de Sistema** (ou estruturais) advêm de informação errónea acerca do verdadeiro estado de seccionadores e disjuntores (telessinalizações de aberto/fechado), que determinam a estrutura da rede e a configuração de medida.

Os **Erros nos parâmetros do modelo** são respeitantes, em modo exemplificativo, a valores de impedâncias do esquema equivalente em π das linhas, posição das tomadas de regulação dos transformadores, de incorreções na informação disponibilizada pelos fabricantes (sobre impedâncias das linhas e /ou transformadores), de erros de cálculo ou erros devidos a alterações físicas ocorridas durante o funcionamento da rede.

Uma vez que estes erros poderão provocar desvios significativos nos verdadeiros valores a obter pelo Estimador de Estado (modulo e fase da Tensão), a informação obtida do sistema é sujeita a uma verificação preliminar por forma a se tentar validar os dados

disponíveis antes da sua utilização pelo EE. Esta fase é designada como pré-filtragem, e consiste na realização de um conjunto de testes de credibilidade com vista à eventual deteção de incoerências na informação disponível [85, 86]. Contudo, os testes preliminares referidos anteriormente (pré-filtragem), não são suficientes, podendo continuar a existir medidas contaminadas por erros grosseiros que entram no processo de estimação de estado, sendo de notar que os testes de pré-filtragem não deixam de ter muita importância, pois muitas vezes, são eliminadas medidas afetadas de erros com uma enorme amplitude, e reduz a contaminação dos resultados a fornecer ao estimador de estado. Resumindo, é de todo fundamental dotar o estimador de estado de uma rotina eficiente de processamento de erros grosseiros.

Portanto, e conforme abordado anteriormente, é essencial dotar o algoritmo de Estimação de Estado de rotinas de deteção de Erros Grosseiros, uma vez que os métodos de EE implementados estão fortemente dependentes da qualidade do vetor das medidas. Assim, se o vetor das medidas estiver afetado por erros grosseiros, os dados resultantes do EE não serão fiáveis, contribuindo muitas vezes para problemas na convergência do algoritmo e na precisão das medidas calculadas.

O objetivo principal da implementação de rotinas de deteção e identificação de erros grosseiros é eliminar o efeito dos mesmos no vetor de estado estimado, sendo que existem outras utilidades como por exemplo o fornecimento de listas de medidas que contenham erros grosseiros ao operador do sistema, que auxiliarão o mesmo na identificação de equipamentos que possivelmente se encontrem com avarias.

Desta forma, a rotina de deteção e identificação de erros grosseiros, deve realizar as tarefas seguintes:

- Apresentar uma estimativa do vetor de estado o mais fiável possível;
- Minimizar o tempo de cálculo de modo a ser compatível com o funcionamento em tempo real do estimador de estado;
- Fornecer ao operador uma lista com todas as medidas afetadas por erros grosseiros.

Convém referir que por vezes é difícil conciliar simultaneamente a execução das tarefas referenciadas, sendo motivo para isso a insuficiente redundância no conjunto das medidas e/ou utilização de metodologias menos eficientes na deteção e identificação das medidas contaminadas pelos erros.

Assim, o processamento de erros grosseiros assenta basicamente em três fases distintas [8, 9, 26, 77, 87, 88], sendo elas:

- *Deteção*
- *Identificação*
- *Correção*

consistindo,

A *Deteção*, na verificação da existência ou ausência de erros grosseiros no conjunto de medidas considerado;

A *Identificação*, na localização e identificação das medidas que estão afetadas por erros grosseiros;

A *Correção*, na correção das medidas identificadas anteriormente afetadas por erros grosseiros, onde se procede à sua eliminação (ou substituição por valores calculados ou previamente conhecidos), voltando-se a estimar novamente o estado do sistema.

4.2- DEFINIÇÃO DE ERRO GROSSEIRO

Conforme abordado anteriormente, o vetor das medidas considerando a sua modelização em regime quase estático, e quando contendo erros grosseiros é normalmente modelizado da seguinte forma:

$$z = h(x) + v + b \quad (4.1)$$

em que:

v – representa o ruído de medida normal ($v \sim N(0,R)$)

b – representa os erros grosseiros (vetor cujas únicas componentes não nulas são as que simulam os erros grosseiros).

Importa salientar que ao contrário de v , o vetor b não pode ser modelizado como uma variável aleatória, uma vez que não se dispõe de informação que permita estabelecer a sua caracterização estatística. Efetivamente, em funcionamento normal, a ocorrência de um erro grosseiro numa dada medida não está associado à precisão do respetivo aparelho de medida. Assim, o vetor b é considerado como uma grandeza determinística de valor desconhecido e pode ser interpretado como um enviesamento do ruído de medida.

Deste modo, os erros grosseiros afetam apenas o valor médio do ruído de medida (e) de um valor igual a g , não modificando nem a respetiva densidade de probabilidade que se mantém gaussiana, nem alteram a correspondente matriz covariância R [9, 43], ou seja:

- Na ausência de erros grosseiros

$$e = v \sim N(0,R) \quad (4.2)$$

- Na presença de erros grosseiros

$$e = v + b \quad (4.3)$$

$$e = \sim N(b, R) \quad (4.4)$$

A modelização de erro elucidada simplifica o estudo das alterações na caracterização estatística de $J(\hat{x})$ e de r , quando se passa de uma situação de ausência de erros grosseiros para outra em que se admite a presença dos mesmos.

Desta forma é habitual considerar o erro de medida como sendo um valor único obtido pela junção de v e b , obtendo-se o modelo normal para o vetor das medidas:

$$z = h(x) + e \quad (4.5)$$

com $e = [e_i]$, sendo:

$e_i = v_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, se a medida i não estiver afetada por um erro grosseiro;

e_i – indeterminado, caso contrario.

Considerando a ausência de erros grosseiros no vetor de ruído (e), temos a seguinte modelização:

$$e \sim N(0, R) \quad \text{com} \quad R = \text{diag}(\sigma_i^2) \quad i=1, \dots, m \quad (4.6)$$

Por análise desta expressão, é possível determinar, para uma dada probabilidade P , um intervalo $[-k\sigma_i, k\sigma_i]$ que tem uma probabilidade P de incluir o erro de medida e_i .

Por verificação e análise das tabelas da distribuição normal reduzida, pode concluir-se que se o valor escolhido para P for muito próximo da unidade (por exemplo $P = 0.998$), o intervalo correspondente a $[-k\sigma_i, k\sigma_i]$ incluirá “sempre” o ruído de medida e_i , com uma probabilidade de erro de $1-P$, sendo deste modo usual atribuir o valor de $k = 3$, designando assim como erro grosseiro, um erro e_i que afeta uma determinada medida e não se encontra incluído no intervalo $[-3\sigma_i, 3\sigma_i]$.

Importa salientar que outro aspeto que resulta da própria definição de erro grosseiro, é o relacionamento entre a amplitude do erro e_i que afeta uma determinada medida, e o valor assumido para o correspondente desvio padrão σ_i . Desta forma, um erro e_i de amplitude inaceitável devida à precisão exigida, pode não ser expressivo se se situar no intervalo $[-k\sigma_i, k\sigma_i]$ correspondente, uma vez que a referida medida ao ser afetada por um fator de ponderação ($1/\sigma_i^2$) no estimador de estado, contribuirá para a redução da sua influência na determinação do vetor de estado.

4.3 – DETEÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

4.3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Existem varias metodologias de deteção de erros grosseiros utilizadas na literatura, sendo as mais empregues baseadas fundamentalmente dos testes de hipóteses desenvolvidas por Neyman e Pearson [89-91].

Como abordado anteriormente as medidas que são processadas pelo EE podem ser potências ativas e reativas que transitam nas linhas, as potências injetadas nos barramentos, as tensões e os ângulos de fase das tensões presentes nos barramentos.

As diversas medidas quando contendo erros, podem ser subdivididas e classificadas de acordo com a amplitude do erro presente nas mesmas. Assim, podem-se dividir as mesmas em 3 tipos de erro:

- I. Erros de extrema amplitude: a diferença entre o valor medido e o valor real é maior que 20σ ;
- II. Erros Grosseiros: uma gama de valores que se situa ente $(5 - 20) \sigma$, que representa a diferença entre o valor medido e o valor real;
- III. Ruído Normal: a diferença entre o valor medido e o valor real é menor que 5σ . A detecção de erros “normais”, que são os mais suscetíveis de não ser eliminados na fase de pré-processamento, são os que constituem o objetivo das rotinas de detecção e identificação dos erros grosseiros de medida.

Quando se aborda a temática relativamente a métodos de estimação de erros, é de todo importante ressaltar que existe a necessidade de ter a percepção de que existem conjugações típicas de erros d medida. Desta forma podemos salientar os seguintes casos:

- 1) Existência de um único erro no vetor de medidas z ;
- 2) Existência de erros grosseiros múltiplos não correlacionados;
- 3) Existência de erros grosseiros múltiplos correlacionados.

Importa referir que no caso da alínea 1), a existência de uma única medida errada, facilita a etapa seguinte que é a identificação da medida, sendo que nos casos das alíneas 2) e 3) tornam o processo de identificação mais complexo.

Como descrito no inicio do capítulo, as metodologias baseiam-se na teoria do teste de hipóteses onde são formuladas hipóteses relativas às propriedades estatísticas, das variáveis aleatórias envolvidas. Assim, a detecção de erros grosseiros poderá ser feita com bases num dos seguintes testes, ou na conjugação de alguns deles:

- Teste do $J(\hat{x})$;
- Teste dos resíduos normalizados (r_N) e dos resíduos ponderados (r_W);
- Teste da amplitude do erro grosseiro (\hat{b}_1);

Desta forma o teste de detecção de erro grosseiro é formulado com base em duas hipóteses:

H_0 : ausência de erros grosseiros

H_1 : presença de erros grosseiros

O objetivo é decidir qual destas hipóteses é verdadeira. A metodologia adotada, consiste em obter o vetor de estado estimado, supõe-se que H_0 é verdadeira, e posteriormente verificar a veracidade desta hipótese através da análise e verificação dos resultados da estimação de estado ($J(\hat{x})$ e r).

Para a realização dos testes de hipóteses fixa-se previamente um valor para o nível de significância do teste. Este nível, normalmente representado por α , traduz a probabilidade de falso alarme, ou seja, a probabilidade de se cometer o erro de rejeitar uma hipótese quando ela é verdadeira (erro do tipo I). A probabilidade de se incorrer no erro do tipo II, é habitualmente representada por β . A diferença $(1-\beta)$ designa-se por potência do teste e, traduz a probabilidade de rejeitar H_0 quando esta hipótese é de facto falsa.

Na tabela 4.1 representa-se os diferentes resultados possíveis associados a um teste de hipóteses, sendo que na Figura 4.1 representam-se as regiões de rejeição e aceitação associados a um teste de hipótese unilateral [8, 84, 92]:

Tabela 4.1 - Tabela de decisão para um teste de hipóteses

Decisão	Hipótese Verdadeira	
	H_0	H_1
Aceitar H_0	Decisão correta $p = 1-\alpha$	Erro tipo II $p = \beta$
Rejeitar H_0	Erro tipo I $p = \alpha$	Decisão correta $p = 1-\beta$

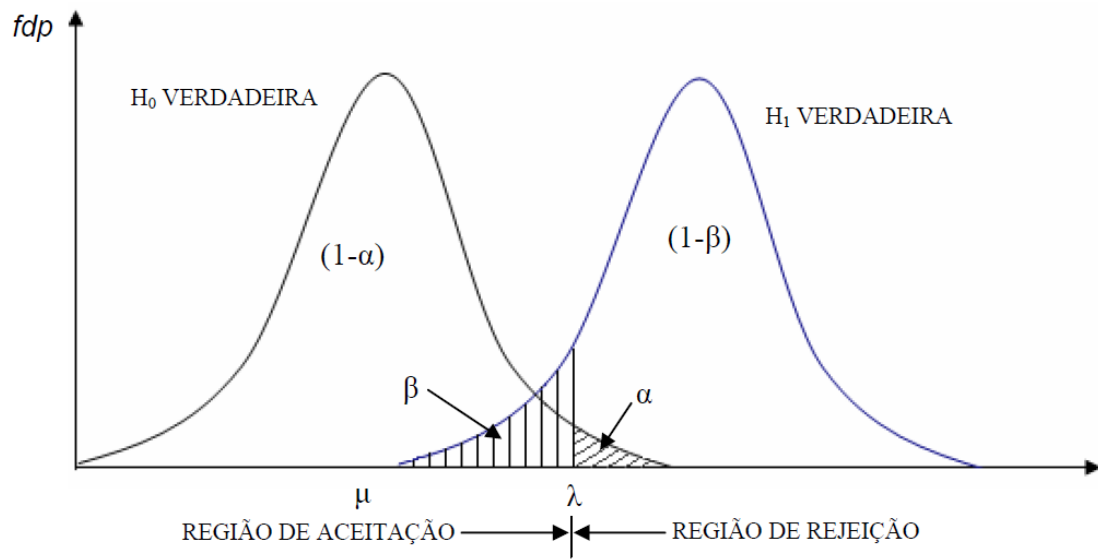


Figura 4.1 – Regiões de aceitação e rejeição associadas a um teste unilateral.

4.3.2 – TESTE DO $J(\hat{x})$

A utilização do presente teste ($J(\hat{x})$), depende da sua caracterização estatística. Admitindo que:

- i. O vetor de ruído de medida (e) tem distribuição normal com valor médio nulo e matriz covariância R , isto é, $e \sim N(0, R)$.
- ii. A estrutura e parâmetros do modelo são conhecidos com exatidão.
- iii. A linearização do modelo de medida é feita em torno de um ponto suficientemente próximo da solução.

Como a soma dos quadrados de variáveis aleatórias independentes com distribuição normal, segue uma distribuição χ^2 [87, 90] e considerando verdadeira a hipótese H_0 (ausência de erros grosseiros), a variável aleatória $J(\hat{x})$ é definida como:

$$J(\hat{x}) = \sum_{i=1}^m r_{w_i}^2 = r^T R^{-1} r = e^T R^{-1} W e \quad (4.7)$$

e apresenta também uma distribuição χ^2 , sendo os graus de liberdade obtidos pela diferença entre o número de medidas (m) e o número de variáveis de estado (n). De notar também que

$J(\hat{x})$ deixará de apresentar distribuição χ^2 se estiver presente uma medida suficientemente errada que faça com que o vetor de ruído de média (e), deixe de ter distribuição normal com valor médio nulo e matriz covariância R (violação da condição presente em i..

Sendo α_0 o valor atribuído à probabilidade de falso alarme (para α_0 o intervalo situa-se normalmente entre $[0.01, \dots, 0.1]$), é possível determinar o valor limiar de detecção λ , em que:

$$P(J(\hat{x}) > \lambda \mid J(\hat{x}) \text{ é } \chi^2) = \alpha_0 \quad (4.8)$$

Depois de se ter definido um limiar de detecção $\chi_{1-\alpha}^2$ para um teste unilateral, associado a uma probabilidade de falso alarme α , a decisão a tomar face ao valor assumido por $J(\hat{x})$ é a seguinte:

- Aceitar H_0 se $J(\hat{x}) \leq \chi_{1-\alpha}^2$
- Rejeitar H_0 se $J(\hat{x}) > \chi_{1-\alpha}^2$

Se o número de grau de liberdade for superior a 30, pode-se então considerar-se que a variável aleatória $J(\hat{x})$ apresenta uma distribuição normal $N(m-n, 2(m-n))$. Sendo o valor limiar de detecção $N_{1-\alpha}$, a decisão é tomada do seguinte modo:

- Aceitar H_0 se $\frac{J(\hat{x}) - (m-n)}{\sqrt{2(m-n)}} \leq N_{1-\alpha}$
- Rejeitar H_0 se $\frac{J(\hat{x}) - (m-n)}{\sqrt{2(m-n)}} > N_{1-\alpha}$

sendo o valor de λ obtido por:

$$\phi\left(\frac{\lambda - (m-n)}{\sqrt{2(m-n)}}\right) = 1 - \alpha_0 \quad (4.9)$$

em que $\phi(\cdot)$ representa a função de distribuição normal reduzida.

Os procedimentos abordados acima, estão representados nos gráficos da figura 4.2 [9]

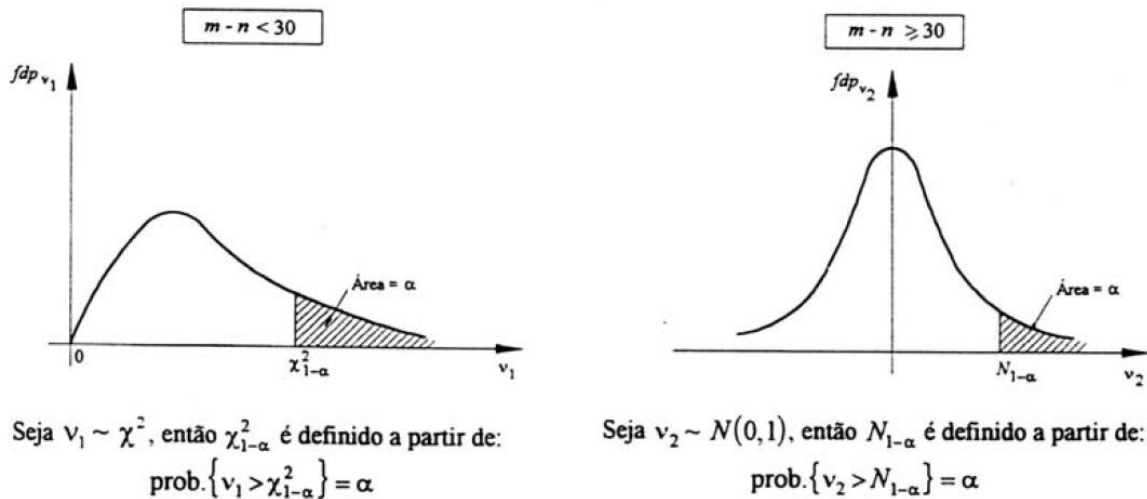


Figura 4.2 – Teste do $J(\hat{x})$ para um pequeno número de graus de liberdade (gráfico da esquerda), e para um elevado número de graus de liberdade (gráfico da direita).

4.3.3 – TESTE DOS RESÍDUOS NORMALIZADOS (R_N) E DOS RESÍDUOS PONDERADOS (R_W)

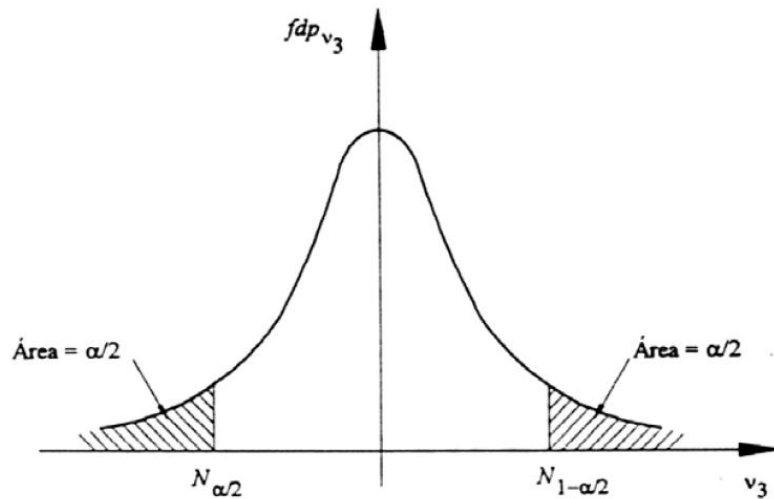
Admitindo que se mantem o cenário apresentado em 4.3.2 (i. ii. iii.), e considerando a hipótese H_0 verdadeira, o vetor dos resíduos \mathbf{r} obedece a uma distribuição gaussiana, ou seja, $N(0, WR)$.

Desta forma pela definição de resíduos normalizados obtém-se:

$$\mathbf{r}_{Ni} \sim N(0,1) \tag{4.10}$$

Assim, a decisão a tomar face ao valor assumido pelos diferentes $\mathbf{r}_{Ni} \ i=1, \dots, m$, após se definir um limiar de deteção $N_{1-\alpha/2}$ (considera-se $\alpha / 2$ um vez que se trata de um teste bilateral), associado a uma probabilidade de falso alarme α é a seguinte [92]:

- Aceitar H_0 se $|\mathbf{r}_{Ni}| \leq N_{1-\alpha/2}$, para todo $i=1, \dots, m$,
- Rejeitar H_0 se $|\mathbf{r}_{Ni}| > N_{1-\alpha/2}$, para algum $i=1, \dots, m$.



Seja $v_3 \sim N(0,1)$, então $N_{1-\alpha/2}$ é definido a partir de: $\text{prob.}\{v_3 > N_{1-\alpha/2}\} = \alpha / 2$

Figura 4.3 – Teste dos resíduos normalizados r_N

Como se pode verificar, o método apresentado, apresenta exigências no que diz respeito ao esforço do cálculo computacional proveniente do cálculo dos resíduos normalizados, sendo vulgar utilizar um método aproximado que reque menor esforço computacional e que se baseia no vetor dos resíduos ponderados r_w . Como já referido nos capítulos anteriores, o tempo de cálculo e processamento tem grande importância no processo de EE, uma vez que o tempo gasto no processo pode inviabilizar o seu uso em análise de sistemas em tempo real.

O método r_w , é também um teste bilateral, com uma estrutura análoga à do teste r_N . Depois de obtidos os diferentes valores de r_{wi} $i=1, \dots, m$, e fixado um limiar de detecção λ , temos o seguinte processo de decisão:

- Aceitar H_0 se $|r_{wi}| \leq \lambda$, para todo $i=1, \dots, m$,
- Rejeitar H_0 se $|r_{wi}| > \lambda$, para algum $i=1, \dots, m$.

Importa referir que uma particularidade deste método é a existência de diferentes valores de α para vários resíduos, pois depende do valor assumido pelo W_{ii} respetivo, sendo que comparar r_{W_i} a λ é equivalente a comparar r_{N_i} a $\lambda / \sqrt{W_{ii}}$.

De uma forma global e comparativa, é possível afirmar que o teste r_N é mais sensível que o teste r_W conforme demonstra a Figura 4.4, onde estão representadas as curvas de amplitude mínima exigível ao erro pesado (W_i/σ_i), que afeta a medida “ i ”, para que esta seja detetada com uma probabilidade P_D de sucesso, em função de S_{ii} (matriz sensibilidade dos resíduos) [93].

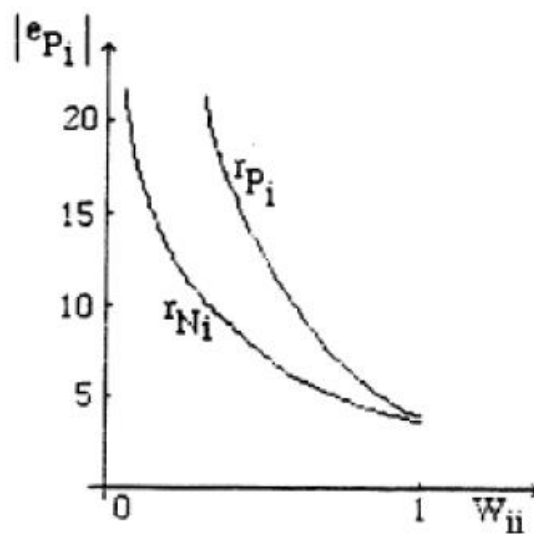


Figura 4.4 – Teste de r_N e r_W (r_P).

4.3.4– TESTE DA AMPLITUDE DO ERRO GROSSEIRO (\hat{b}_i)

O procedimento associado a este teste, que pressupõe do mesmo modo os anteriores em que verificam as condições em 4.3.2 (i., ii., iii.), é o seguinte:

Depois de obtida a estimativa inicial do vetor de estado do sistema, pode detetar-se a existência de erros grosseiros calculando-se os resíduos normalizados associados a cada medida e considerando-se como suscetível de estar contaminada com um erro grosseiro a medida a que corresponde um resíduo normalizado com uma amplitude consideravelmente superior aos restantes. Supondo a título exemplificativo que é do conhecimento que 99,7% das medidas efetuadas pelo aparelho de medida i são afetadas por ruído numa gama de \pm

$3\sigma_i$. Se se verificar que \hat{b}_i toma um valor exterior à gama pré-estabelecida então muito provavelmente isso poderá ser a indicação que a medida i está afetada por um erro grosseiro. Em diversos estudos presentes na literatura, o estudo efetuado com níveis de deteção com $c = 4\sigma_i$ tem sido utilizado com sucesso [78].

Em todo o caso, e de um modo geral, a amplitude de um determinado resíduo não pode ser considerada como um indicador seguro da presença ou ausência de um erro grosseiro na medida correspondente, sendo que a presente situação se agrava na presença de erros grosseiros múltiplos correlacionados.

4.4 – IDENTIFICAÇÃO, ELIMINAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

Cumprida a fase de deteção de erros grosseiros e no caso de o resultado indicar a existência de erros no vetor das medidas, segue-se um processo que identifica as medidas com presença de erro e elimina os efeitos desses erros nos resultados provenientes do estimador de estado. Assim, os principais objetivos deste processo de identificação e correção são os seguintes:

- Localizar – o método a utilizar deverá ter a capacidade de localizar eficazmente o erros grosseiros ou fornecer uma lista com as medidas afetadas pelos mesmos;
- Corrigir – o método a utilizar deverá eliminar o efeito dos erros identificados na base de dados final fornecida pelo EE;
- Informar – o método a utilizar deverá em situações em que não seja possível identificar os erros grosseiros, informar o operador desta situação. A presente situação poderá acontecer aquando da existência de erros grosseiros que afetam medidas críticas, sendo que neste caso, deverá ser fornecida uma lista ao operador do sistema, com as medidas suspeitas o mais sucinta possível.

Na literatura estão referenciadas em diversas publicações [13, 26, 78, 88, 94-96], as técnicas mais utilizadas para identificação de erros grosseiros, que são as seguintes:

- Identificação por eliminação (IBE);
- Critérios não Quadráticos (NQC);
- Identificação por testes de Hipóteses (HTI).

Existem várias formas de classificar as diferentes técnicas de identificação, sendo as mesmas identificadas tendo por base a natureza das grandezas em que assenta o processo de identificação e eliminação de erros grosseiros, bem como no método utilizado para eliminar e corrigir as bases de dados provenientes do processo de estimação de estado.

4.4.1– IDENTIFICAÇÃO POR ELIMINAÇÃO (IBE)

Neste método o princípio da metodologia aplicada é uma extensão natural dos testes de deteção de erros grosseiros baseados nos vetores dos resíduos r . Deste modo a ideia fundamental é a seguinte: na sequência de um resultado positivo do teste de deteção, é estabelecida com base no vetor dos resíduos normalizados r_N ou ponderados r_W , uma primeira lista de medidas suspeitas de estarem afetadas por erros grosseiros. De notar que a existência de maior resíduo implica maior probabilidade de a medida a ele correspondente, estar infetada por um erro grosseiro.

Seguidamente, são realizadas operações cíclicas sucessivas de eliminação-reestimação-redeteção até que o teste de deteção de erros grosseiros informe da não existência de erros grosseiros nas medidas estimadas.

Desta forma podemos não resumir a metodologia IBE em quatro passos fundamentais:

- i. Eliminação da medida ou medidas mais suscetíveis de estarem afetadas por erros grosseiros;
- ii. Realização de uma nova estimação de estado (reestimação);
- iii. Realização dos testes de deteção de estado (redeteção);

- iv. No caso de a redeteção ser negativa para a presença de erros grosseiros, termina o processo de identificação; caso contrário, volta ao passo inicial.

Terminado o processo de identificação de erros grosseiros, é obtida a estimativa do vetor do estado do sistema, sendo constituída uma lista de medidas que são classificadas como medidas afetadas por erros grosseiros, originada pelas medidas que foram sucessivamente eliminadas no processo anteriormente descrito.

Conforme já referido anteriormente a metodologia IBE baseia-se no vetor dos resíduos normalizados r_N ou em alternativa no vetor dos resíduos ponderados r_W . A escolha entre r_N e r_W , é determinada por um lado, pela facilidade de implementação, e por outro lado, pela fiabilidade dos resultados obtidos. Como exposto em 4.3.3, o teste dos resíduos ponderados é menos eficiente do que o teste dos resíduos normalizados, daí ser habitual a utilização do vetor r_N não obstante o esforço computacional significativo inerente a esta opção.

De acordo com os métodos propostos na literatura [13, 26, 87, 97], existem fundamentalmente duas variantes na aplicação da metodologia IBE:

- 1) Eliminação Simples;
- 2) Eliminação Grupada;

Na abordagem definida por 1), as medidas são eliminadas individualmente. Característica importante desta abordagem, é que se a medida a eliminar for sempre selecionada entre as medias suspeitas, e se após cada estimação for determinada a nova lista de medidas suspeitas, nunca é necessário verificar a observabilidade da rede após a eliminação de qualquer medida. No caso da existência de um único erro grosseiro, este procedimento garante a identificação imediata da medida em erro, e no caso de erros múltiplos não correlacionados, repete-se todo o procedimento tantas vezes quantas necessárias, até o teste de deteção seja negativo.

Na variante definida por 2), as medidas são eliminadas em grupos aquando da identificação de erros múltiplos. Seguidamente, essas medidas são reintroduzidas uma a uma, pois existe o risco de se estar a eliminar inutilmente medidas validas. Sempre que o teste de deteção seja positivo, a medida em questão é eliminada do vetor das medidas. Um inconveniente importante da presente variante é a necessidade de ser obrigatória a

verificação da observabilidade da rede previamente à eliminação de qualquer conjunto de medidas, sendo que o resultado dessa verificação pode originar a necessidade de se ter de reduzir o número de medidas a eliminar.

Considerando o inconveniente apresentado no parágrafo anterior, é comumente utilizada a metodologia IBE baseada a eliminação simples em detrimento da eliminação grupada.

É importante explicitar que os dois métodos referidos anteriormente, se referem à existência de um único erro grosseiro ou à existência de erros múltiplos não correlacionados. No caso de existirem presenças de erros grosseiros múltiplos correlacionados, ao inconveniente já descrito anteriormente do esforço computacional juntam-se as seguintes agravantes [5]:

- *O efeito da eliminação intempestiva.* Traduz-se na eliminação intempestiva de medidas não afetadas por erros grosseiros levando à diminuição da redundância de medida e conseqüentemente à diminuição da eficácia dos testes de detecção e ao aumento da correlação dos resíduos;
- *O efeito da camuflagem dos erros grosseiros.* Este efeito ocorre, quando a ação dos erros grosseiros e conjugada de tal forma que, a amplitude dos resíduos de medida correspondente é tão reduzida que os testes de detecção (teste $-r_N$ ou teste $-r_W$) não conseguem identificar essas medidas.

4.4.2– IDENTIFICAÇÃO POR CRITÉRIOS NÃO-QUADRATICOS (NQC)

Sobre a metodologia NQC (“Non Quadratic Criteria”) constata-se o seu surgimento na literatura quase em simultâneo com o desenvolvimento da metodologia IBE analisada previamente. Esta metodologia proposta inicialmente por Merrill e Schweppe [94] e mais tarde abordada e desenvolvida por outros autores como Muller, Lo e Zhuang [26, 88, 98], assenta na integração do processo de detecção na estimação de estado, isto é, em vez de uma função complementar à estimação de estado, a execução da identificação e eliminação dos erros grosseiros, faz parte do próprio algoritmo de estimação de estado, obtendo no final a solução do vetor estado já corrigida relativamente a erros grosseiros nas medidas.

Verdadeiramente a presente metodologia consiste em fazer diminuir, ao longo do procedo iterativo de calculo do vetor estado do sistema, a influencia das medidas cujo resíduo mantem ou adquire um valor elevado. Quanto maior for o afastamento do valor do resíduo relativamente a um limite inferior pré-fixado γ , menor deverá ser a influencia da medida responsável pelo resíduo no processo de estimação de estado. Desta forma, a deteção e identificação de erros grosseiros, tal como a correção da estimativa obtida \hat{x} para o vetor de estado do sistema, são realizadas simultaneamente numa única etapa. As medidas que forem classificadas como afetadas por erros grosseiros, são aquelas que no final da estimação de estado apresentam um resíduo de elevada amplitude, ou seja, são aquelas medidas que foram eliminadas pelo estimador de estado.

A metodologia NQC baseia-se na minimização da seguinte função de custo não quadrática:

$$J(x) = \sum_{i=1}^m g_i \left(\frac{r_i}{\sigma_i} \right) \quad (4.11)$$

em que:

$$r_i = z_i - h_i(x) \quad (4.12)$$

Distinguindo-se diferentes variantes na aplicação das metodologias NQC pelas funções g_i seleccionadas, como demonstrado na figura seguinte:

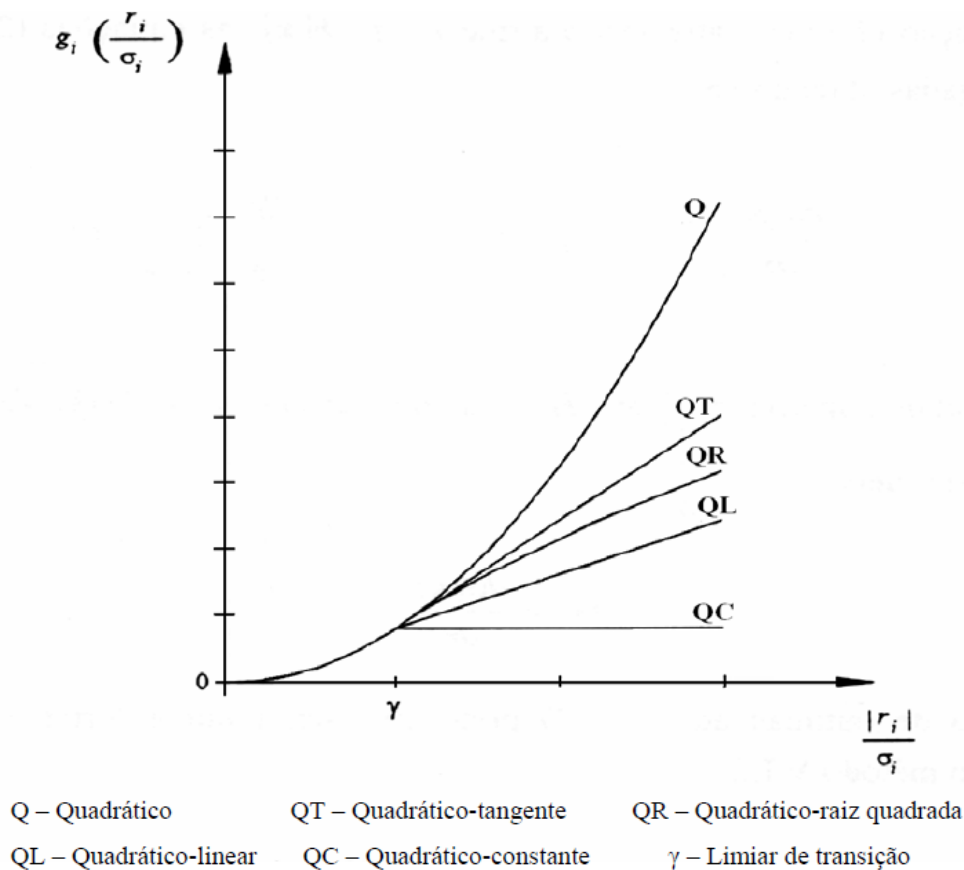


Figura 4.5 – Funções de custo não quadráticas utilizadas nos estimadores BDS (“Bad Data Supression”)

4.4.3– IDENTIFICAÇÃO POR TESTE DE HIPÓTESES (HTI)

A metodologia de identificação por testes de hipóteses HTI (“Hypothesis Testing Identification”), inicialmente proposta por [95] é essencialmente um método de estimação dos erros de medida e de interpretação estatística das estimativas obtidas com o objetivo de identificar com precisão as medidas afetadas por erros grosseiros. Nesta metodologia, as variáveis aleatórias em análise são as estimativas dos erros de medida das medidas suspeitas $\hat{\epsilon}_s$, que são calculadas a partir de uma adequada subdivisão da equação $r=We$, utilizando um modelo linear.

Utilizando as propriedades estatísticas de cada uma das componentes de $\hat{\epsilon}_s$, é então realizado um teste de identificação individual que permite decidir se a medida correspondente está ou não afetada por um erro grosseiro.

Desta forma, numa esquematização simplificada do método HTI, pode-se dizer que ele consiste fundamentalmente nos seguintes procedimentos:

- i. seleccionar um certo numero s de medidas suspeitas de estarem afetadas por erros grosseiros;
- ii. obter uma estimativa para os correspondentes erros de medida e_s ;
- iii. testar para cada medida seleccionada, a hipótese H_0 : “A medida i está afetada por um erro grosseiro” contra a hipótese H_1 : “A medida i é uma medida valida”, utilizando um teste estatístico que se baseia na amplitude de \hat{e}_{si} ;
- iv. eliminar as medidas para as quais a hipótese H_0 foi considerada verdadeira;
- v. reestimar o estado elétrico da rede.

Terminado o processo de identificação, as medidas consideradas em erro são as medidas eliminadas.

De seguida apresenta-se na figura 4.6 um fluxograma resumido do procedimento acima explicitado:

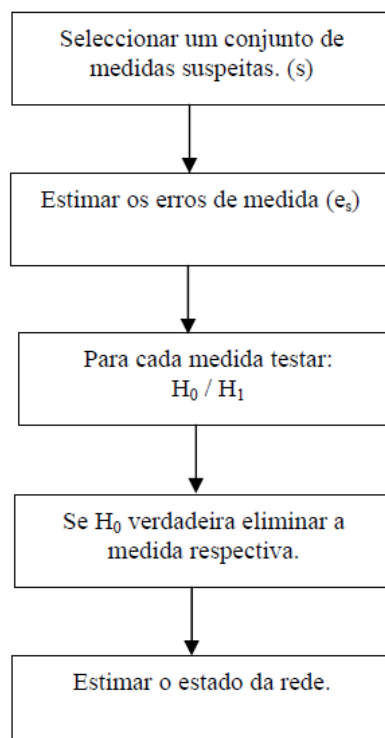


Figura 4.6 – Fluxograma sucinto do procedimento HTI.

4.5 – CONCLUSÃO

Conforme apresentado no capítulo 2, o objetivo fundamental da aplicabilidade de um algoritmo de estimação de estado é a obtenção de uma base de dados coerente e fiável que seja composta pelo valor estimado das variáveis de estado de um SEE, estando posteriormente disponíveis para o operador do sistema as poder analisar, tendo em vista o controlo e análise de segurança do SEE.

Conforme já foi referido, toda a informação processada pelo estimador de estado, está sujeita a contaminação por erros grosseiros que afetam as medidas causadas por avaria ou funcionamento defeituoso dos equipamentos de medida e transmissão.

Este tipo de situações podem provocar graves perturbações e problemas na qualidade da estimativa obtida, e é de todo indispensável dotar o algoritmo de estimação de estado de rotinas que permitam a deteção, identificação e correção deste tipo de erros.

A correção dos erros, permite ao operador ter um elevado grau de confiança nos dados apresentados, bem como na utilização das bases de dados geradas, o que permitirá efetuar a correção de equipamentos que apresentem deficiências de funcionamento no terreno.

No presente capítulo, o objetivo principal foi fazer uma análise das principais metodologias de deteção e identificação de erros grosseiros no âmbito da estimação de estado em Sistemas Elétricos de Energia, bem como aos diferentes tipos de erros que podem afetar o estimador de estado.

Relativamente à deteção de erros grosseiros foram abordados 3 tipos de testes de hipóteses muito utilizados, nomeadamente os teste do $J(\hat{x})$, do r_N e do r_W . Os mesmos são baseados na formulação de testes de Hipóteses, definidos a partir da caracterização estatística das variáveis envolvidas.

O teste do $J(\hat{x})$, é o mais utilizado na literatura, sendo que não é o mais eficiente na presença de redes de elevada dimensão e complexidade. A escolha entre o teste do r_N e o teste do r_W resulta de um compromisso ente a simplicidade de implementação e a fiabilidade dos resultados obtidos.

As funções essenciais que as rotinas de identificação de erros grosseiros terão que comportar são 3: Localizar, Corrigir e Informar. No que diz respeito à sua construção as diferentes metodologias estudadas são as baseadas na Identificação por Eliminação (IBE), na Identificação por Critérios não-quadráticos (NQC) e identificação por testes de Hipóteses (HTI).

CAPÍTULO 5

TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Capítulo 5

TESTES COMPUTACIONAIS E ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 - INTRODUÇÃO

No presente capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos provenientes do algoritmo desenvolvido para a estimação do vetor de estado em Sistemas Elétricos de Energia. O algoritmo desenvolvido baseia-se no método WLS, (método clássico de Gauss-Newton) considerando o sistema em regime estático.

O método utilizado foi descrito em maior detalhe no capítulo 3.

Os resultados dos estudos efetuados tiveram como bases as simulações provenientes em redes de teste IEEE. Uma de pequena dimensão, nomeadamente a rede IEEE de 14 barramentos e uma outra de dimensão elevada, a rede IEEE de 118 barramentos. Toma especial importância a característica fundamental das simulações efetuadas, uma vez que as condições de simulação têm por base a utilização de dados recolhidos na rede num único instante, ou seja, foram simuladas estimações de estado isoladas em tempo e interligação das redes.

A realização de estimações de estado isoladas visa contornar o problema da modelização da evolução do vetor de estado ao longo do tempo e da simplificação da interligação das redes estudadas, simplificando consideravelmente a obtenção do vetor de estado estimado do sistema.

Os estados reais dos sistemas de teste analisados foram obtidos recorrendo ao software PowerWorld Simulator[®], para daí ser possível retirar os valores considerados “reais” em todos os barramentos do sistema. Por outro lado, o algoritmo de estimação de estado desenvolvido foi programado em linguagem de software MATLAB[®].

O objetivo primordial deste capítulo é apresentar resultados e consolidar o estudo relativo à estimação de estado em SEE, nomeadamente quanto à aplicação de estimadores baseados no método WLS, onde se utilizam redes de teste com diferentes redundâncias e configurações de medidas disponíveis.

Seguidamente será apresentado o método usado para efetuar a estimação de estado, far-se-á uma descrição das redes de testes usadas, bem como serão descritos os pressupostos de simulação e os parâmetros tidos em análise da qualidade das estimações obtidas.

Ao longo do capítulo serão efetuadas as devidas análises dos resultados obtidos, e no final serão elaboradas as respetivas conclusões.

5.2 – CARACTERÍSTICAS DE SIMULAÇÃO

5.2.1 – METODOLOGIAS ADOTADAS NAS SIMULAÇÕES

Conforme abordado anteriormente, para a realização de simulações de estimação de estado recorrendo ao método WLS clássico, e de forma a evitar o problema da evolução temporal do vetor de estado do sistema, recorreu-se à utilização de dados obtidos da rede num único instante.

As diversas simulações realizadas, ocorrem em condições de funcionamento normal do SEE, considerando a produção e carga aproximadamente constantes.

O conjunto de medidas utilizado nas simulações é proveniente da resolução de um trânsito de potências recorrendo ao Software PowerWorld Simulator[®], onde no mesmo existem as redes construídas com as características constantes nos Anexos B e C para 14 e 118 barramentos respetivamente (Diagrama unifilar, Linhas, Barramentos, Transformadores e dados do Trânsito de Potências).

Após a resolução do trânsito de potências, retiram-se os valores considerados “reais” para a amplitude de tensão em todos os barramentos do sistema, bem como o valor das potências injetadas nos barramentos e o trânsito de potências nas diversas linhas. Assim, os

dados recolhidos no Software PowerWorld Simulator[®], constituem o conjunto de medidas utilizado pelo estimador de estado.

De forma a simular o ruído que contamina o conjunto de medidas que chega ao Centro de Controlo, aproximando assim as simulações da realidade, foi adicionado um erro aleatório que varia entre -0,001 e 0,001 p.u. para as medidas de tensão, e entre -0,01 e 0,01 p.u. para as medidas de potência.

Após a contaminação das medidas “verdadeiras” com o ruído de natureza aleatório, os resultados finais a utilizar são mantidos para as diferentes configurações de medida utilizadas, de modo a que os resultados obtidos, sejam os mais fidedignos possíveis aquando objeto comparação e avaliação aprofundada.

Nas simulações efetuadas não são considerados erros grosseiros.

Importa também referir que os diferentes conjuntos de medidas requereram um cuidado relevante aquando da sua seleção por forma a garantir a convergência do algoritmo. Toma especial relevância a garantia da inversão da matriz de Ganho, uma vez que o seu mau acondicionamento, fará ocorrer a obtenção de uma estimativa errada ou até a paragem do programa.

Assim, para as diferentes redundâncias de medida utilizadas, foram usados conjuntos de medidas que garantam a observabilidade da rede.

A análise do desempenho do algoritmo implementado nas diversas simulações efetuadas, é realizada por comparação do erro da estimativa, caracterizado para cada componente do vetor estado e para cada componente do vetor das medidas, com o valor previsto para o desvio de padrão de cada grandeza envolvida. Outros dados são também alvo de avaliação como o número de iterações, o tempo de processamento do algoritmo e o valor da função objetivo $J(\hat{x})$.

Seguidamente expõem-se os dados e formulas utilizadas na avaliação do desempenho do estimador:

- Número de Iterações – Nit ;
- Tempo de Processamento – $t(ms)$;
- Valor da Função Objetivo – $J(\hat{x})$;

- Erro da Estimativa;

$$\delta_x = x_{real} - x_{estimado} \quad (5.1)$$

- Erro Máximo e Médio do valor estimado para a Fase das Tensões:

$$\delta_{med}^{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} |\theta_i - \hat{\theta}_i|}{N-1}, \quad \delta_{max}^{\theta} = \max |\theta_i - \hat{\theta}_i| \quad (5.2)$$

- Erro Máximo e Médio do valor estimado para os Módulos das Tensões:

$$\delta_{med}^V = \frac{\sum_{i=1}^N |V_i - \hat{V}_i|}{N}, \quad \delta_{max}^V = \max |V_i - \hat{V}_i| \quad (5.3)$$

sendo N o numero de barramentos.

- Desvio de Padrão do erro da estimativa:

$$\sqrt{\sum_{x \ ii}} = \text{diag} \sqrt{(H \cdot R^{-1} \cdot H^T)^{-1}} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{xi} = \sqrt{\sum_{x \ ii}} \quad (5.5)$$

Se $|\delta_x|$ (equação 5.1) for consideravelmente superior a σ_{xi} (equação 5.5), então a validade da estimativa é questionável. Normalmente é utilizada na literatura a seguinte relação [43]:

Validade da estimativa questionável quando, $\frac{|\delta_x|}{\sqrt{\Sigma_x}} > 3$ (5.6)

Para a rede de teste de 14 barramentos foram caracterizadas três configurações de medida distintas para dois níveis de redundância diferentes, e para a rede de 118 barramentos, uma configuração de medida para dois níveis de redundância diferentes.

O objetivo da realização destas diferentes configurações de medida e redundância, visa avaliar o impacto na estimativa das diferentes medidas disponíveis, bem como do efeito da redundância na obtenção da estimativa para o vetor de estado do sistema.

Uma vez que ao aplicar o algoritmo WLS para a determinação do vetor de estado, e obedecendo o mesmo a um processo iterativo, o fator de convergência utilizado para todas as simulações efetuadas é de 0,001 p.u. para os módulos e 0,001 rad. para as fases das tensões.

5.2.2 – ALGORITMO IMPLEMENTADO

Relativamente ao modelo de simulação implementado, o mesmo pode ser resumidamente descrito da seguinte forma:

- Recorrendo à resolução de um Trânsito de Potências no Software PowerWorld Simulator[®] para a rede de teste selecionada, são obtidos os “verdadeiros” valores para as Tensões em módulo e fase em todos os barramentos do sistema. Nos resultados obtidos, estão também disponíveis os valores correspondentes às Potências Injetadas nos barramentos bem como os Trânsitos de Potências nas Linhas.
- A introdução de dados da rede a ser testada é feita recorrendo a ficheiros de texto com extensão .m (compatíveis com o MATLAB[®]), onde a informação relativa aos barramentos se encontra efetuada numa matriz chamada **busdatas** e a informação relativa às linhas numa matriz chamada **linedatas** (os ficheiros **busdatas** e **linedatas** estão preparados para efetuar leituras diretamente de ficheiros **excel** de modo a que o tratamento de dados seja ótimo).

- Na matriz **busdatas** as linhas correspondem aos barramentos e as colunas correspondem ao número do barramento ao tipo de barramento (PV ou PQ), à amplitude e fase das Tensões, à potência e à carga gerada (ativa e reativa) nos barramentos, aos valores máximo e mínimo de geração de potência reativa e ao valor de reativa injetada devido aos “shunts” capacitivos nos barramentos.
- Na matriz **linedatas** as linhas correspondem ao par de nós relativo a cada ramo da rede em análise, onde cada coluna contém os respectivos barramentos de origem e chegada, a resistência, reactância e metade da susceptância de cada ramo. A última coluna corresponde à indicação da tomada do transformador, em que caso seja um ramo o valor considerado é 1.
- No ficheiro excel **novamedida** é onde se define a localização e precisão dos equipamentos de medida, e a esse conjunto de medidas é adicionado um erro aleatório. As medidas que são consideradas para este processo são retiradas do trânsito de potências da rede em análise.
- O conjunto de medidas que irá ser utilizado pelo estimador é preparado num ficheiros de texto com extensão .m (compatíveis com o MATLAB®) denominado **zdatas**.
- Na matriz **zadas** as linhas correspondem as medidas em análise, onde cada coluna contém o número sequencial da medida, o tipo de medida (se de tensão, potência ativa injetada, potência reativa injetada, trânsito de potência ativa ou reativa), o valor medido relativo a cada medida (já afetado com erro), o barramento de origem, o barramento de chegada, e na última coluna o peso de cada medida (o ficheiro **zadas** efetua diretamente construção da matriz através da leitura no ficheiro **novamedida** dos diversos dados referidos anteriormente).

- Com base nas medidas simuladas, é então calculada a melhor estimativa para o vetor de estado do sistema, que consiste na obtenção de toda as tensões em módulo e fase em todos os barramentos. Para isso recorreu-se ao seguinte algoritmo de estimação implementado:
 - Primeira Fase (calculo e carregamentos de dados necessários em MATLAB[®]):
 1. Cálculo da Matriz **Y** pela função **ybusppg**;
 2. Cálculo da Matriz **B** pela função **bbusppg**;
 3. Carregamento das medidas pela função **zdatas**;
 4. Verificação do número de barramentos;
 5. Criação da Matriz dos Erros **Ri**;
 - Segunda Fase (resolução pelo método WLS):
 1. Inicialização das iterações, onde se coloca o índice de iterações, $k=0$;
 2. Inicialização do vetor estado x^k , $V_i = 1 \text{ p.u. e } , \theta_i = 0 \text{ rad.}$;
 3. Construção do vetor das equações de medida $h(x)$;
 4. Construção da matriz jacobiana $H(x)$;
 5. Cálculo da matriz de ganho G e a sua inversa G^{-1} ;
 6. Cálculo dos incrementos do vetor de estado Δx ;
 7. Cálculo da função objetivo $J(\hat{x})$;
 8. Teste de convergência, $\max|\Delta x^k| \leq \varepsilon$?;
 9. Se não, atualizar $x^{k+1} = x^k + \Delta x^k$ com $k = k + 1$ e voltar ao passo 3, caso contrario parar.

O processo de paragem é assinalado quando $\max|\Delta x^k| \leq \varepsilon$, ou seja, quando todos os incrementos ao vetor de estado calculados na mesma iteração, forem inferiores ao valor pré estabelecido, ε , que no algoritmo programado assumiu um valor de 0.001 p.u. para as tensões e 0.001 rad. para os ângulos.

No processo iterativo utilizado a caracterização da função de medida $h(x^k)$, foi efetuada como descrito no ponto 2.5 do Capítulo 2, e a caracterização da matriz jacobiana de medida foi descrita em pormenor no ponto 3.2 do Capítulo 3.

O fluxograma representativo do processo implementado foi apresentado no Capítulo 3, na figura 3.1.

5.3 - REDES DE TESTE UTILIZADAS E CONFIGURAÇÕES DE MEDIDA

No que diz respeito à elaboração dos dados necessários para as diversas simulações implementadas, foram escolhidos dois sistemas de teste do IEEE. As redes escolhidas foram a rede IEEE de 14 barramentos e a rede IEEE de 118 barramentos.

Os dados pormenorizados (informações relativas a linhas, barramentos e trânsito de potências) e os esquemas unifilares de cada rede estão descritos nos Anexos B e C para as redes IEEE de 14 Barramentos e 118 barramentos respetivamente. Nas tabelas e figuras seguintes apresentam-se alguns dados que caracterizam as duas redes, o que permite uma melhor compreensão da estrutura das redes e medidas utilizadas.

- **Rede IEEE de 14 barramentos**

Tabela 5.1 – Características da Rede IEEE de 14 Barramentos

Barramentos	Linhas	Transformadores	Geradores	Cargas
14	17	3	5	11

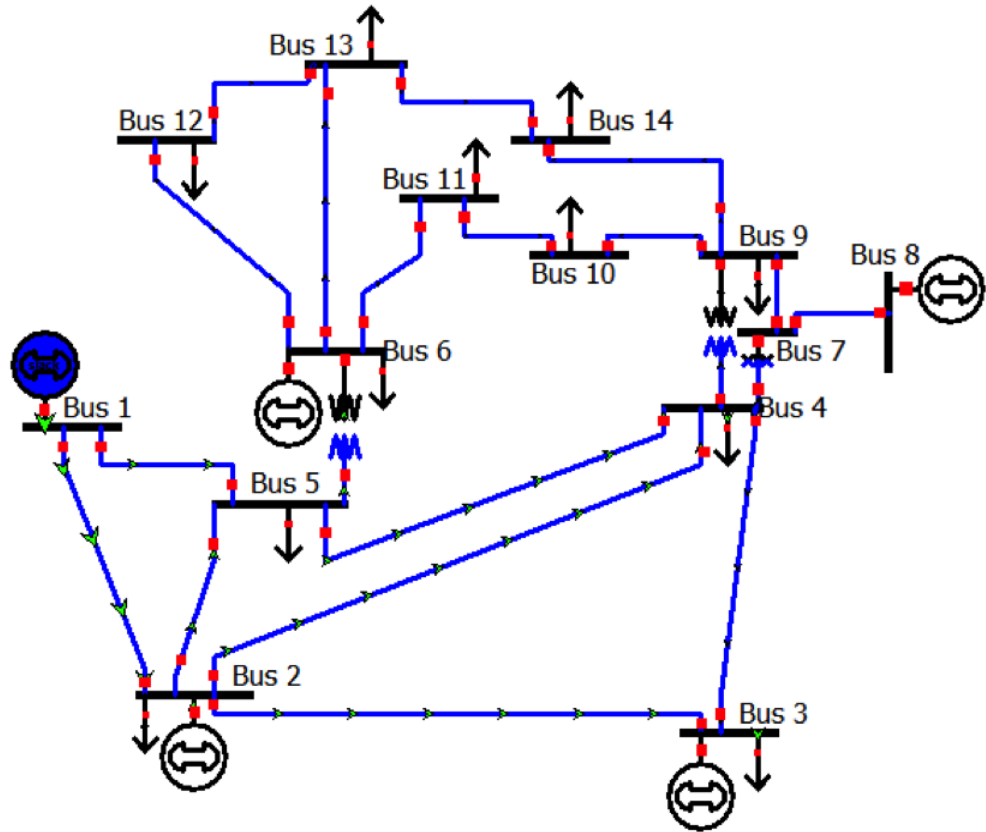


Figura 5.1 – Rede construída em PowerWorld Simulator® respeitante à rede IEEE de 14 barramentos.

- **Rede IEEE de 118 barramentos**

Tabela 5.2 – Características da Rede IEEE de 118 Barramentos

Barramentos	Linhas	Transformadores	Geradores	Cargas
118	170	9	54	91

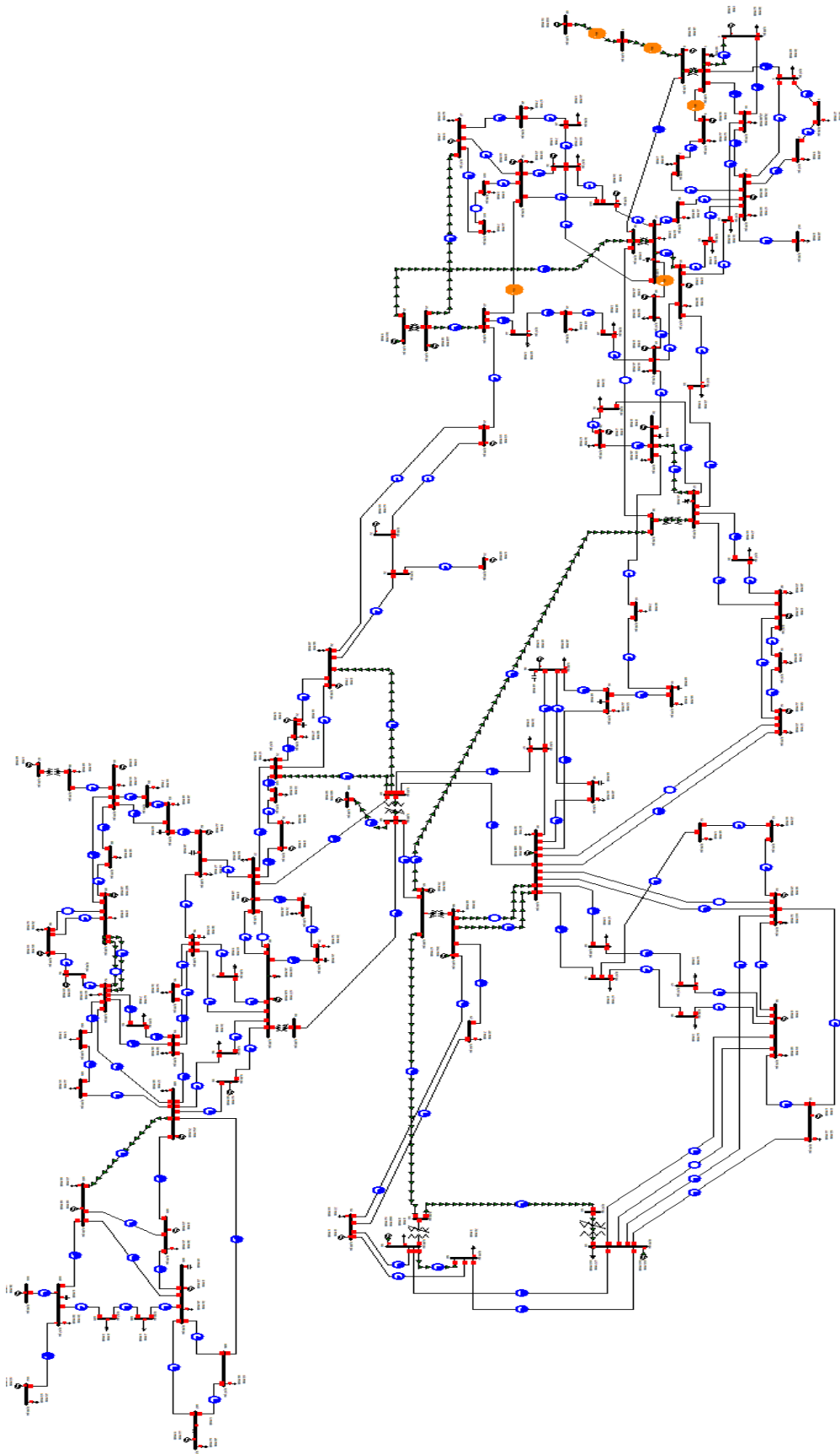


Figura 5.2 – Rede construída em PowerWorld Simulator® respeitante à rede IEEE de 118 barramentos.

5.3.1 – CONFIGURAÇÕES DE MEDIDA

Nos estudos seguintes, foram caracterizadas configurações de medida distintas para dois níveis de redundância diferentes em cada rede de teste (14 e 118 barramentos). De forma a simular o ruído que contamina o conjunto de medidas que chega ao Centro de Controle, foi adicionado um erro aleatório que varia entre -0,001 e 0,001 p.u. para as medidas de tensão, e entre -0,01 e 0,01 p.u. para as medidas de potência.

O verdadeiro valor das medidas foi obtido pelo programa que executa o trânsito de potências, e os valores foram guardados para que as simulações fossem comparadas recorrendo às mesmas medidas iniciais.

As configurações de medida foram escolhidas tendo como principal objetivo a análise e interpretação dos resultados aquando a variação dos tipos de medidas disponíveis, bem como e o seu impacto no vetor de estado estimado. Os dois níveis de redundância utilizados pretendem avaliar não só o comportamento do estimador aquando da variação das medidas disponíveis, mas também da variação da função objetivo e do tempo de processamento necessário à obtenção do vetor de estado.

Todas as configurações de medida foram selecionadas tendo em conta a observabilidade da rede em teste, sendo que nos dados utilizados não foram considerados erros grosseiros.

Seguidamente serão apresentadas de forma sucinta as configurações de medidas e as suas características:

- **Rede IEEE de 14 barramentos**

Tabela 5.3 – Configurações de medida para a rede de 14 barramentos e redundância de 1.78.

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C1A	14	6	6	11	11	48	1,78
14C1B	14	4	8	11	11	48	
14C1C	14	8	4	11	11	48	

Tabela 5.4 – Configurações de medidas para a rede de 14 barramentos e redundância de 2.22.

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C2A	14	9	9	14	14	60	2,22
14C2B	14	5	13	14	14	60	
14C2C	14	13	5	14	14	60	

- Rede IEEE de 118 barramentos

Tabela 5.5 – Configurações de medidas para a rede de 118 barramentos.

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
118C1	107	57	54	172	164	554	2.3
118C2	114	100	95	164	163	636	2.7

Os diversos conjuntos de medidas que compõem as configurações descritas nas tabelas supra, serão alvo de descrição pormenorizada aquando da sua avaliação no ponto 5.4 da presente dissertação.

5.4 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.4.1 – REDE DE TESTE IEEE DE 14 BARRAMENTOS

Para a avaliação do estudo relativo ao algoritmo baseado no método WLS na rede de 14 barramentos, o mesmo foi efetuado com recurso a três configurações de medida para dois níveis de redundância conforme a Tabela 5.3 e a Tabela 5.4.

Por forma a simplificar a apresentação de resultados, os mesmos serão apresentados pela seguinte ordem:

- 1.º Configuração de medida 14C1A (Redundância 1.78);
- 2.º Configuração de medida 14C1B (Redundância 1.78);
- 3.º Configuração de medida 14C1C (Redundância 1.78);
- 4.º Configuração de medida 14C2A (Redundância 2.22);
- 5.º Configuração de medida 14C2B (Redundância 2.22);
- 6.º Configuração de medida 14C2C (Redundância 2.22);

REDUNDÂNCIA DE VALOR 1,78

A primeira simulação efetuada corresponde à configuração de medida 14C1A.

Tabela 5.7 – Configurações de medida 14C1A (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C1A	14	6	6	11	11	48	1,78

O conjunto de medidas que caracteriza a primeira simulação é constituído pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potência ativa e reativa injetada nos barramentos 2, 3, 8, 11, 12, 14, e pelos trânsitos de potência ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, e 12-13. Desta forma foi garantida a observabilidade da rede com uma redundância aproximada de 1,78.

Os parâmetros de avaliação presentes nas tabelas foram descritos no ponto 5.2.1 do presente capítulo sendo os mesmos aplicados ao longo do trabalho. Importa referir que os valores da amplitude de tensão nos barramentos estão expressos em p.u. e os valores dos ângulos de fase em cada barramento estão expressos em radianos.

Os resultados obtidos recorrendo ao algoritmo implementado e respeitando as configurações anteriormente descritas são apresentados nas Tabelas 5.8 e 5.9 relativas aos resultados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase respetivamente.

Tabela 5.8 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1A.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\Sigma_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\Sigma_x}}$
1	1,06000	1,06023	2,29E-04	6,86E-04	0,33
2	1,04500	1,04521	2,08E-04	5,23E-04	0,40
3	1,01000	1,01093	9,28E-04	7,19E-04	1,29
4	1,02611	1,02611	3,06E-06	6,01E-04	0,01
5	1,03261	1,03296	3,50E-04	6,02E-04	0,58
6	1,07001	1,06926	7,48E-04	7,18E-04	1,04
7	1,04482	1,04444	3,83E-04	7,48E-04	0,51
8	1,09000	1,08973	2,68E-04	8,67E-04	0,31
9	1,02765	1,02717	4,77E-04	7,81E-04	0,61
10	1,02756	1,02795	3,89E-04	9,37E-04	0,42
11	1,04496	1,04436	6,01E-04	7,43E-04	0,81
12	1,05303	1,05225	7,78E-04	8,19E-04	0,95
13	1,04624	1,04526	9,84E-04	7,83E-04	1,26
14	1,01745	1,01691	5,43E-04	8,73E-04	0,62

Tabela 5.9 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1A.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08593	4,59E-04	5,12E-04	0,90
3	-0,22044	-0,21943	1,00E-03	1,11E-03	0,91
4	-0,18082	-0,17989	9,23E-04	1,17E-03	0,79
5	-0,15603	-0,15560	4,30E-04	1,18E-03	0,36
6	-0,25953	-0,25339	6,14E-03	2,44E-03	2,52
7	-0,23457	-0,22698	7,60E-03	5,35E-03	1,42
8	-0,23475	-0,22651	8,24E-03	5,57E-03	1,48
9	-0,26285	-0,25495	7,90E-03	5,25E-03	1,50
10	-0,26721	-0,26054	6,67E-03	5,00E-03	1,33
11	-0,26546	-0,25891	6,56E-03	3,13E-03	2,09
12	-0,27419	-0,26722	6,97E-03	2,81E-03	2,48
13	-0,27454	-0,26867	5,87E-03	2,75E-03	2,14
14	-0,28606	-0,28085	5,21E-03	3,65E-03	1,43

Após os resultados obtidos, apresenta-se na Tabela 5.10 os restantes dados relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 14C1A.

Tabela 5.10 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1A.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
1,78	14C1A	9,84E-04	4,92E-04	8,24E-03	4,57E-03

Como se pode verificar pelos resultados obtidos, o algoritmo perante a configuração de medida 14C1A, apresenta resultados bastante satisfatórios, obtendo erros médios bastante baixos tanto para o módulo da tensões como para os ângulos de fase, sendo que pela avaliação estatística é possível concluir que o algoritmo apresenta valores com um bom índice de aceitação das medidas estimadas, existindo uma precisão maior nos valores estimados para as tensões do que para os ângulos de fase.

Este facto pode ser explicado pelo peso que as medidas de tensão têm em relação às restantes medidas, uma vez que existe uma maior precisão nas leituras das Tensões em

comparação com as restantes medidas, sendo refletida essa característica no cálculo do algoritmo.

Nas Figuras 5.3 e 5.4, é possível visualizar as comparações entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuração de medida 14C1A e os seus “verdadeiros” valores.

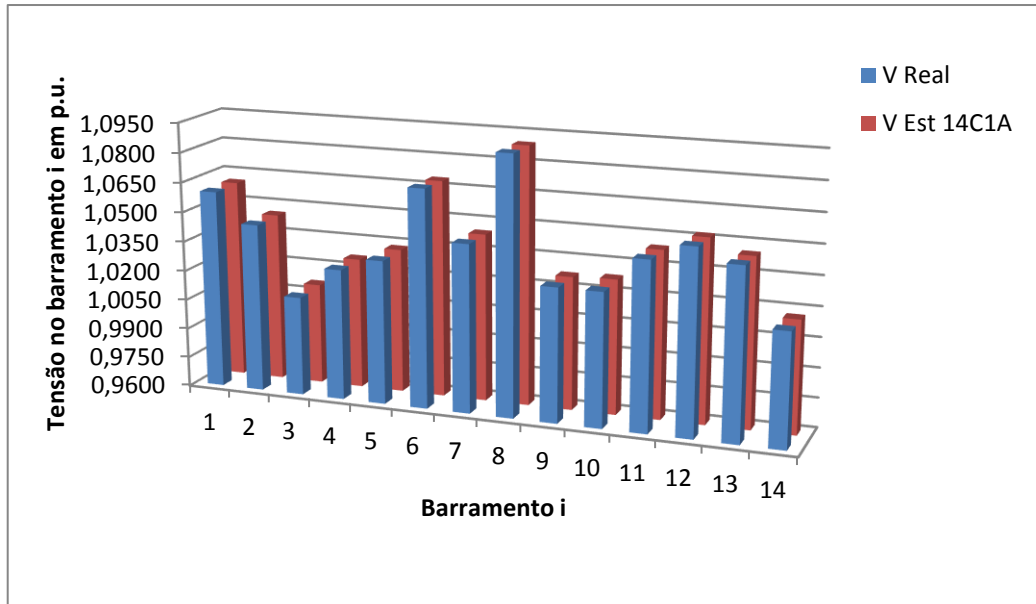


Figura 5.3 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1A.

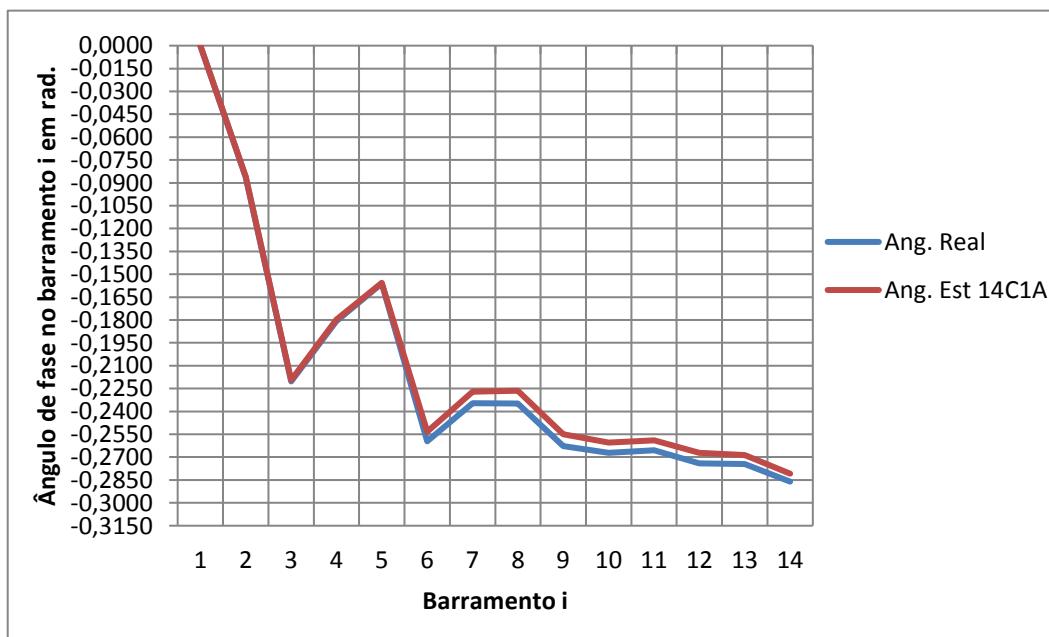


Figura 5.4 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1A.

A segunda simulação efetuada corresponde à configuração de medida 14C1B.

Tabela 5.11 – Configurações de medida 14C1B (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C1B	14	4	8	11	11	48	1,78

Como se pode verificar na Tabela 5.11, o conjunto de medidas que caracteriza a simulação recorrendo à configuração 14C1B, difere do anterior uma vez que se provoca um desequilíbrio relativamente ao número de potências injetadas ativas e reativas nos barramentos.

Assim, a configuração de medida é composta pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potência ativa injetada nos barramentos 2, 3, 8, 11, pelos valores correspondentes às medições da potência reativa injetada nos barramentos 2, 3, 8, 10, 11, 12, 13, 14, e pelos trânsitos de potencia ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, e 12-13.

Os resultados obtidos recorrendo ao algoritmo implementado e respeitando as configurações de medida 14C1B são apresentados nas Tabelas 5.12 e 5.13 relativas aos resultados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase respetivamente.

Tabela 5.12 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1B.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,06000	1,06023	2,31E-04	6,86E-04	0,34
2	1,04500	1,04521	2,11E-04	5,23E-04	0,40
3	1,01000	1,01093	9,31E-04	7,19E-04	1,30
4	1,02611	1,02611	4,53E-06	6,01E-04	0,01
5	1,03261	1,03297	3,60E-04	6,02E-04	0,60
6	1,07001	1,06939	6,24E-04	7,18E-04	0,87
7	1,04482	1,04451	3,11E-04	7,48E-04	0,42
8	1,09000	1,08975	2,48E-04	8,67E-04	0,29
9	1,02765	1,02735	3,03E-04	7,81E-04	0,39
10	1,02756	1,02784	2,83E-04	8,76E-04	0,32
11	1,04496	1,04440	5,65E-04	7,43E-04	0,76
12	1,05303	1,05222	8,10E-04	9,03E-04	0,90
13	1,04624	1,04520	1,04E-03	7,51E-04	1,39
14	1,01745	1,01666	7,94E-04	1,00E-03	0,79

Tabela 5.13 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1B.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08593	4,59E-04	5,12E-04	0,90
3	-0,22044	-0,21943	1,00E-03	1,11E-03	0,91
4	-0,18082	-0,17990	9,20E-04	1,17E-03	0,78
5	-0,15603	-0,15560	4,35E-04	1,18E-03	0,37
6	-0,25953	-0,25314	6,39E-03	2,38E-03	2,68
7	-0,23457	-0,22837	6,21E-03	4,48E-03	1,39
8	-0,23475	-0,22790	6,85E-03	4,74E-03	1,45
9	-0,26285	-0,25634	6,51E-03	4,36E-03	1,49
10	-0,26721	-0,25950	7,71E-03	3,82E-03	2,02
11	-0,26546	-0,25835	7,12E-03	2,72E-03	2,62
12	-0,27419	-0,26724	6,95E-03	3,21E-03	2,17
13	-0,27454	-0,26820	6,34E-03	2,64E-03	2,41
14	-0,28606	-0,28388	2,18E-03	5,01E-03	0,44

No seguimento do que foi analisado anteriormente, apresenta-se na Tabela 5.14 os restantes dados relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 14C1B.

Tabela 5.14 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1B.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
1,78	14C1B	1,04E-03	4,80E-04	7,71E-03	4,22E-03

Similarmente aos resultados apresentados anteriormente, os resultados obtidos na configuração de medida 14C1B, apresentam também bons resultados no que diz respeito aos erros médios e máximos, tanto para os módulos das tensões como para os ângulos de fase em todos os barramentos.

Comparando os resultados das duas configurações estudadas, é possível afirmar que os resultados da configuração 14C1B apresentam uma aproximação maior entre os valores estimados e os correspondentes “verdadeiros” valores, uma vez que apresentam erros médios mais baixos que os obtidos na configuração 14C1A.

Outro facto importante é a relação do acoplamento $Q - |V|$ posta à prova aquando da escolha do dobro de medidas de Potência reativa injetada nos barramentos em relação com o número de potências ativas injetadas, uma vez que se evidenciou uma redução do valor tanto de erro médio como máximo nas medidas de Tensão nos barramentos.

Verifica-se também que perante a presente configuração de medida, os valores médios e máximos para as fases das tensões também sofreram melhoria, sendo explicado o sucedido por uma maior diversificação e diferenciação de medidas nos barramentos, o que disponibiliza ao algoritmo dados importantes e que beneficiam os cálculos das fases nos mesmos.

Nas Figuras 5.5 e 5.6, é possível visualizar as comparações entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuração de medida 14C1B e os seus “verdadeiros” valores.

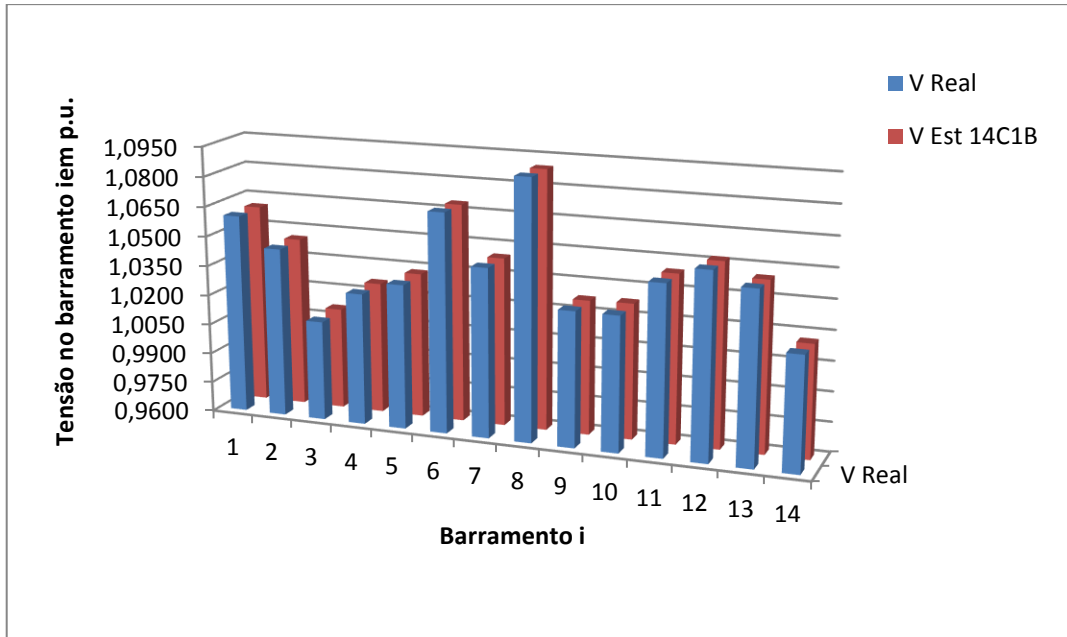


Figura 5.5 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1B.

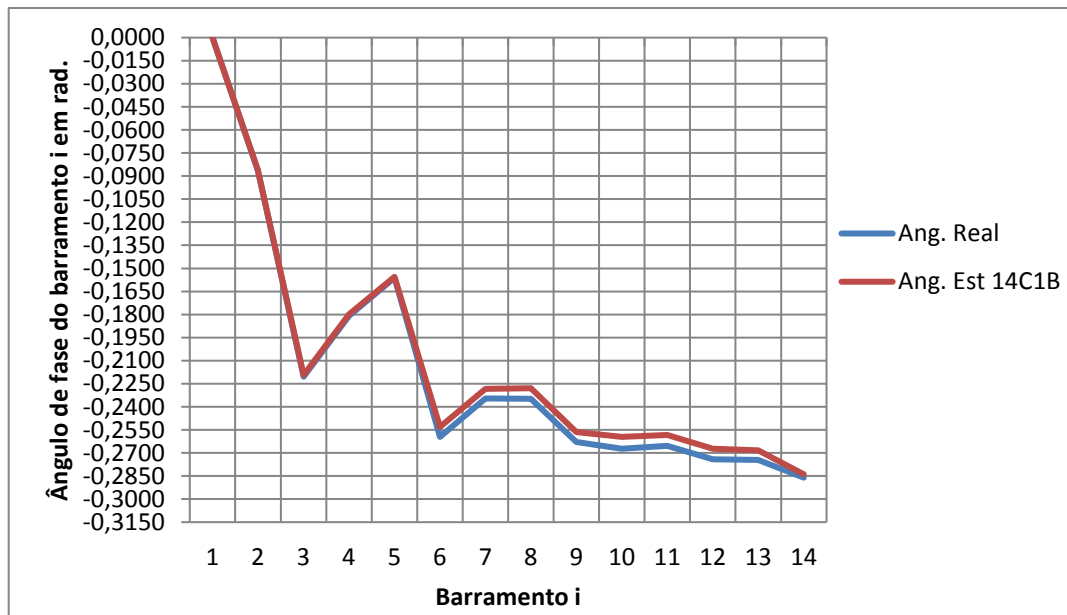


Figura 5.6 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1B.

A terceira simulação efetuada corresponde à configuração de medida 14C1C.

Tabela 5.15 – Configurações de medida 14C1C (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C1C	14	8	4	11	11	48	1,78

Na Tabela 5.15, o conjunto de medidas que caracteriza a simulação recorrendo à configuração 14C1C, difere do anterior uma vez que se provoca um desequilíbrio relativamente ao número de potências reativas injetadas em detrimento das ativas.

Neste caso a configuração de medida é composta pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potência ativa injetada nos barramentos 2, 3, 7, 8, 10, 11, 12, 14, pelos valores correspondentes às medições da potência reativa injetada nos barramentos 2, 3, 8, 12, 13, e pelos trânsitos de potência ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, e 12-13.

As configurações de medida anteriores, como é possível depreender, têm para as medidas selecionadas, uma similaridade na seleção das mesmas variando apenas a quantidade de medidas disponíveis em relação às potências injetadas nos barramentos. Mantendo a redundância e variando as medidas das potências injetadas é objetivo de avaliação a influencia das mesmas devido ao acoplamento entre $Q - |V|$ e $P - \theta$.

Assim, os resultados obtidos recorrendo ao algoritmo implementado e respeitando as configurações de medida 14C1C são apresentados nas Tabelas 5.16 e 5.17 relativas aos resultados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase respetivamente.

Tabela 5.16 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1C.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,06000	1,06023	2,29E-04	6,86E-04	0,33
2	1,04500	1,04521	2,07E-04	5,23E-04	0,40
3	1,01000	1,01093	9,28E-04	7,19E-04	1,29
4	1,02611	1,02611	4,59E-06	6,01E-04	0,01
5	1,03261	1,03296	3,48E-04	6,02E-04	0,58
6	1,07001	1,06929	7,17E-04	7,26E-04	0,99
7	1,04482	1,04449	3,28E-04	7,52E-04	0,44
8	1,09000	1,08975	2,53E-04	8,67E-04	0,29
9	1,02765	1,02728	3,69E-04	8,01E-04	0,46
10	1,02756	1,02796	4,03E-04	1,00E-03	0,40
11	1,04496	1,04431	6,55E-04	9,04E-04	0,72
12	1,05303	1,05227	7,56E-04	8,21E-04	0,92
13	1,04624	1,04533	9,08E-04	7,95E-04	1,14
14	1,01745	1,01665	8,00E-04	1,00E-03	0,80

Tabela 5.17 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C1C.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08593	4,59E-04	5,12E-04	0,90
3	-0,22044	-0,21943	1,01E-03	1,11E-03	0,91
4	-0,18082	-0,17989	9,27E-04	1,17E-03	0,79
5	-0,15603	-0,15561	4,25E-04	1,18E-03	0,36
6	-0,25953	-0,25363	5,90E-03	2,34E-03	2,52
7	-0,23457	-0,23003	4,54E-03	2,65E-03	1,72
8	-0,23475	-0,22958	5,16E-03	3,55E-03	1,45
9	-0,26285	-0,25755	5,30E-03	3,03E-03	1,75
10	-0,26721	-0,26211	5,10E-03	2,71E-03	1,88
11	-0,26546	-0,25962	5,85E-03	2,40E-03	2,43
12	-0,27419	-0,26746	6,74E-03	2,73E-03	2,47
13	-0,27454	-0,26891	5,63E-03	2,67E-03	2,11
14	-0,28606	-0,28190	4,16E-03	2,98E-03	1,40

Apresenta-se na Tabela 5.18 os dados relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 14C1C.

Tabela 5.18 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C1C.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
1,78	14C1C	9,28E-04	4,93E-04	6,74E-03	3,66E-03

Os resultados obtidos na configuração de medida 14C1C, apresentam em consonância com os resultados das configurações anteriores, bons resultados no que diz respeito aos erros médios e máximos, tanto para os módulos das tensões como para os ângulos de fase em todos os barramentos.

Conferindo os resultados das três configurações estudadas, é possível afirmar que os resultados da configuração 14C1C apresentam uma aproximação maior entre os valores obtidos para os ângulos de fase, mas apresenta resultados similares à configuração 14C1A e pior que a 14C1B em relação aos módulos das tensões.

Fato que contribui para este resultado, deve-se ao número de medidas de potência reativa injetada no total de medidas disponíveis, contribuindo para um decréscimo da eficiência da estimação destes valores.

Em contrapartida, o acoplamento $P - \theta$ foi evidenciado por na estimativa 14C1C se comprovar o melhor resultado de estimação relativamente aos angulo de fase das tensões, tanto em valor máximo, como em valor médio das três configurações estudadas até ao momento.

Nas Figuras 5.7 e 5.8, é possível visualizar as comparações entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuração de medida 14C1C e os seus “verdadeiros” valores.

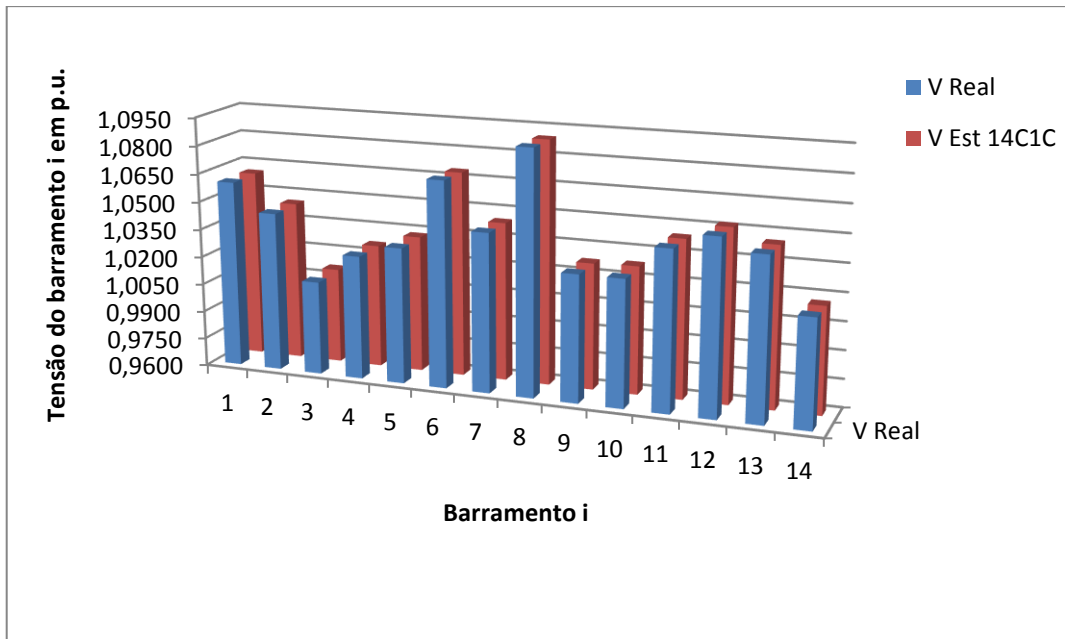


Figura 5.7 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1C.

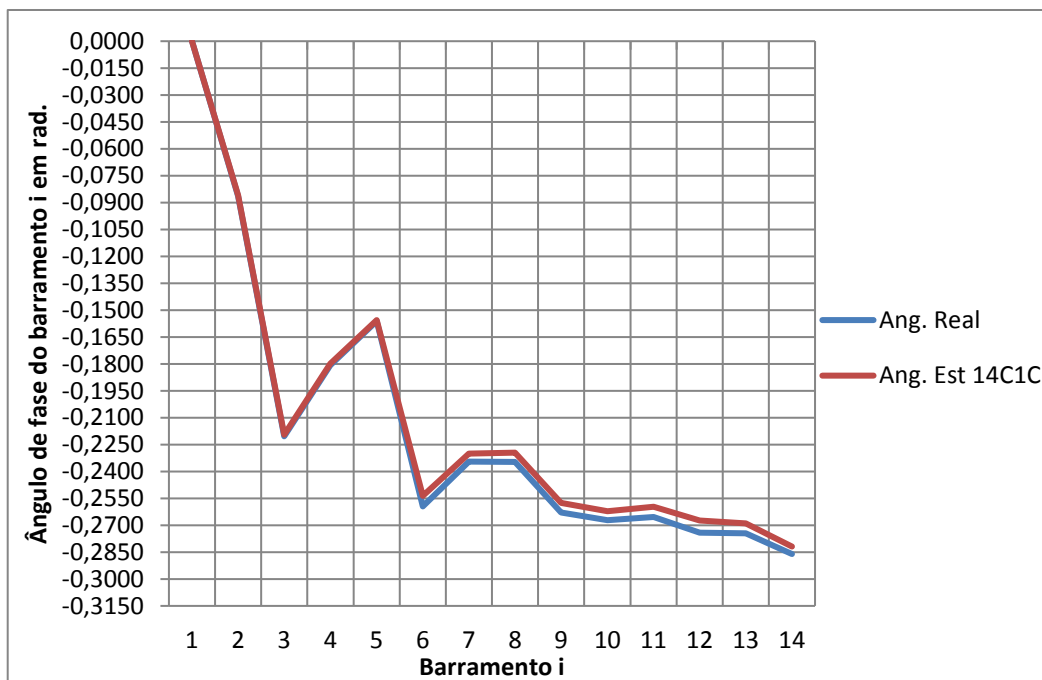


Figura 5.8 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C1C.

Concluída a apresentação de resultados da configuração 14C1C, seguidamente será efetuada uma avaliação resumida para os estudos efetuados na rede de 14 Barramentos com redundância de medidas utilizadas com o valor de 1,78.

Na Tabela 5.19 é possível verificar a evolução do valor da função objetivo $J(x)$ ao longo das iterações. Como era de esperar, é notória a minimização do valor de $J(x)$ a cada iteração ocorrida até atingir a convergência do algoritmo. Para as três configurações estudadas, o algoritmo convergiu em três iterações.

Tabela 5.19 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C.

Iteração k	Converge para $\varepsilon \leq 0.001$		
	1	2	3
Função Objetivo - 14C1A	8,42E+08	729,2819	11,4380
Função Objetivo - 14C1B	8,40E+08	727,9328	11,5360
Função Objetivo - 14C1C	8,42E+08	729,4307	11,8774

Pela verificação dos resultados constantes na Tabela 5.17, é possível aferir que o algoritmo convergiu praticamente com a mesma rapidez e para um valor muito próximo da função objetivo nas três configurações de medida ao longo de três iterações. Este facto pode ser explicado pela utilização da mesma redundância de medida nas configurações utilizadas, variando apenas as quantidades do tipo de medidas nelas constantes. Outro facto que importa referir, é que mesmo tendo o valor da função Objetivo de maior amplitude, o algoritmo 14C1C foi o que apresentou de forma global o melhor resultado de estimação, uma vez que o somatório dos erros médios calculados apresentam um melhor resultado em relação aos anteriores. O que poderá ter contribuído para esta situação são os valores dos erros aleatórios atribuídos às medidas quem em módulo são superiores, e influenciam diretamente os resíduos finais obtidos na estimação.

Nas figuras 5.9 e 5.10 apresenta-se os componentes do vetor de estado estimado para as três configurações estudadas, onde se comparam as mesmas com os respetivos “verdadeiros” valores (módulo e fase).

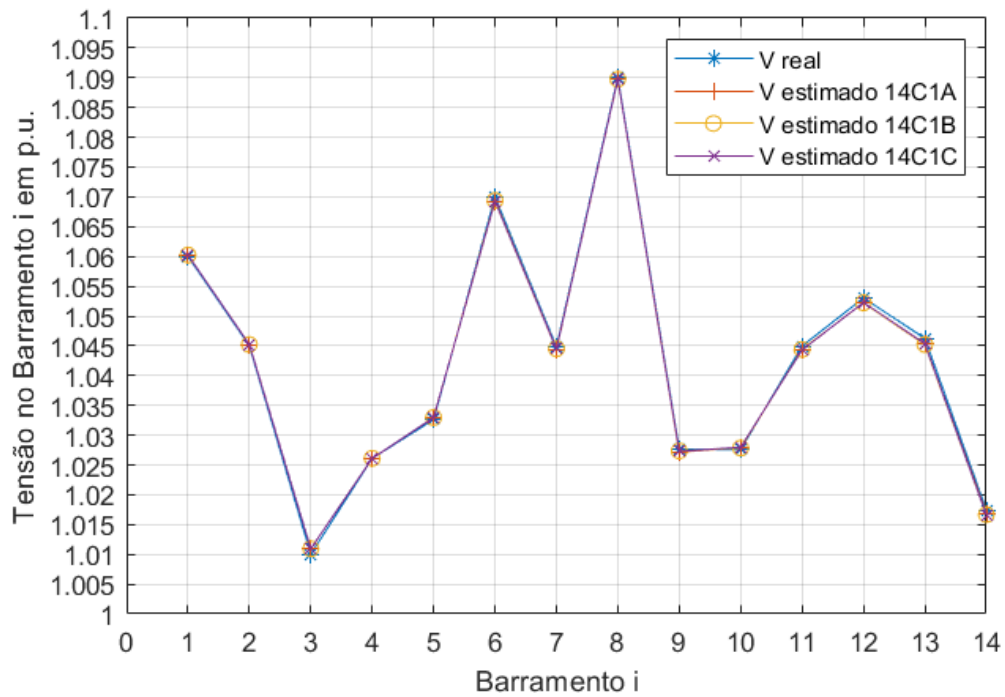


Figura 5.9 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C (Real vs Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.

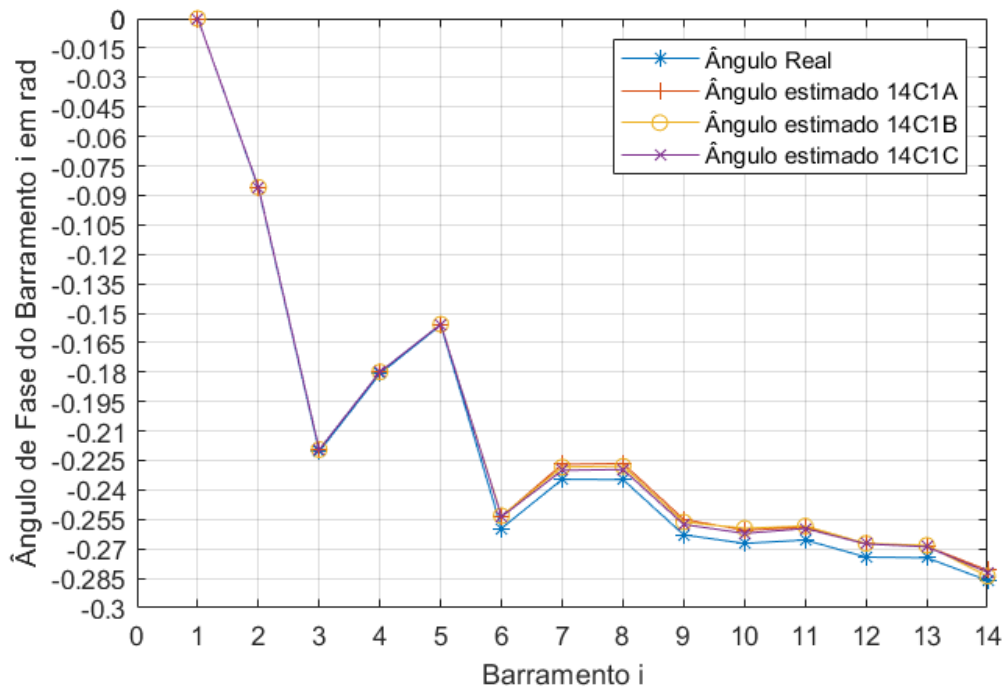


Figura 5.10 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C (Real vs Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.

Como a avaliação do comportamento do estimador elaborado é efetuada por comparação dos erros de estimativa, caracterizado para cada componente do vetor de estado e para cada componente do vetor das medidas, apresenta-se nas figuras 5.11 e 5.12 o erro existente para cada variável de estado para as três configurações de medida, permitindo assim uma análise mais pormenorizada dos erros associados a essas grandezas.

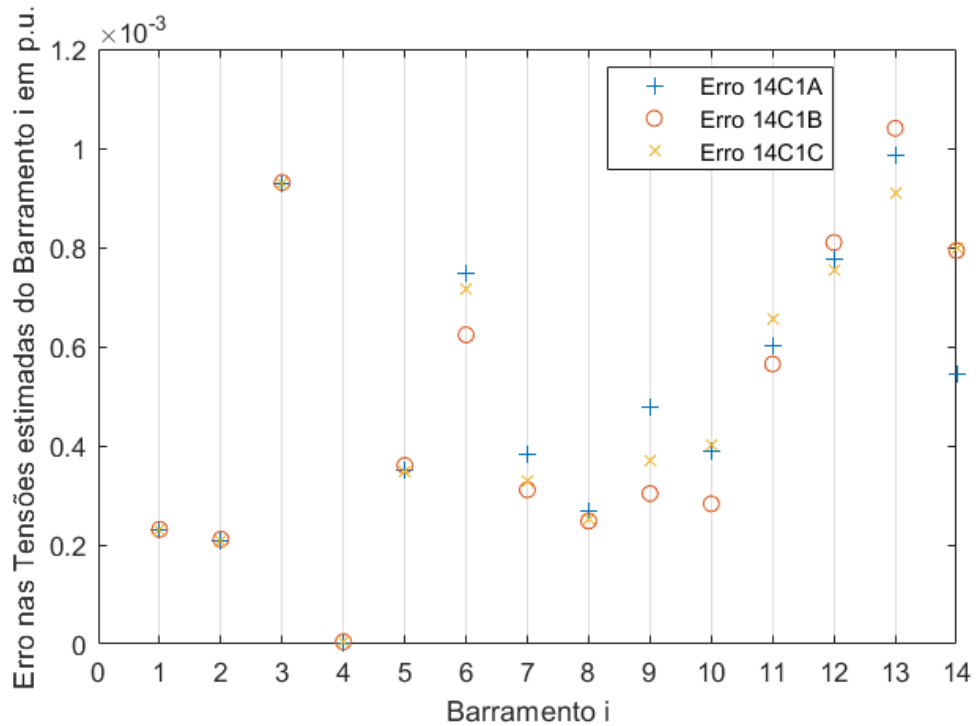


Figura 5.11 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C – Rede IEEE 14 Barramentos.

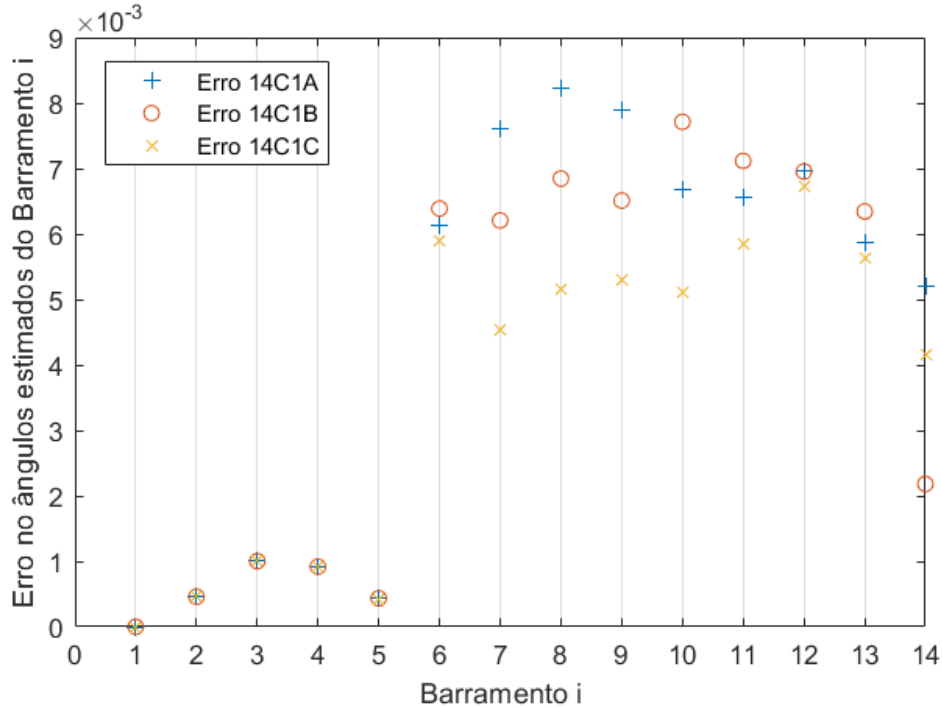


Figura 5.12 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 14C1A, 14C1B e 14C1C – Rede IEEE 14 Barramentos.

Analisando as tabelas 5.8, 5.9, 5.12, 5.13, 5.16, 5.17, é possível constatar que existiu uma ligeira melhoria no comportamento do estimador do teste 14C1A para os testes 14C1B e 14C1C. Nas três simulações efetuadas as mesmas apresentam erros de estimativa em que $\frac{|\delta_x|}{\sqrt{\Sigma_x}}$ não apresenta valores demasiadamente elevados ($\frac{|\delta_x|}{\sqrt{\Sigma_x}} < 3$) confirmando a qualidade da estimativa obtida.

Pelas figuras 5.11 e 5.12 é possível verificar que a configuração de medida 14C1B apresenta erros menores para as amplitudes das Tensões na maioria dos barramentos, facto já explicitado anteriormente. Similarmente a configuração de medida 14C1C apresenta menores erros no que diz respeito aos ângulos de fase das tensões, sendo de notar que dos barramentos 1 a 5 os valores são muito próximos em comparação com as restantes, sendo evidenciada uma melhoria significativa nos restantes barramentos excetuando o barramento numero 14.

O objetivo da avaliação do acoplamento $Q - |V| / P - \theta$ foi conseguido uma vez que conforme explicitado anteriormente, aquando da existência de um maior peso de medidas de potências ativas ou reativas injetadas nos barramentos, existiu uma influência nos resultados para um menor erro nos módulos das tensões quando existe um maior peso de injeções reativas, e de um erro menor para as fases aquando da existência de um peso maior de injeções ativas nos barramentos (quanto maior o numero de medidas P ou Q , maior a sua influência em fase e modulo respetivamente).

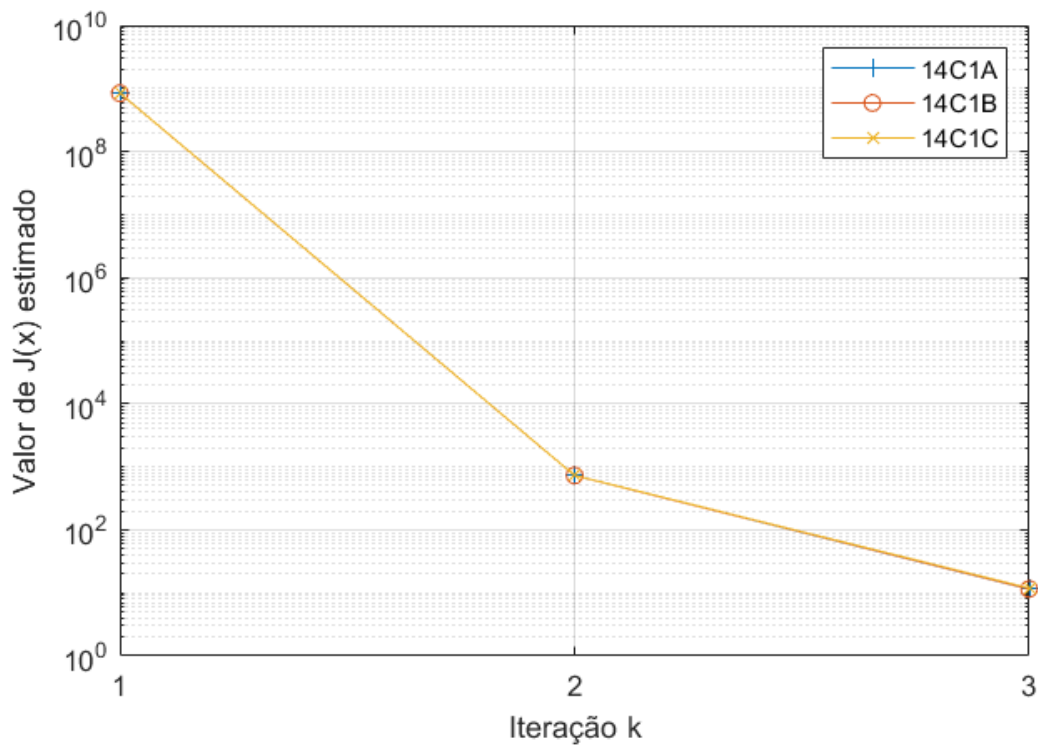


Figura 5.13 – Características de convergência dos testes 14C1A, 14C1B e 14C1C - Rede IEEE 14 Barramentos.

Conforme visto no Capítulo 3, pela formulação matemática do algoritmo implementado, a quantidade de medidas, o tipo de medidas, a localização e o seu peso no conjunto total de medidas disponíveis para cada simulação, estabelece uma relação preponderante na obtenção do vetor de estado estimado do sistema.

Assim, na Figura 5.14 é demonstrado o peso em percentagem de cada tipo de medida no conjunto de medidas que compõem as configurações de medida disponíveis para cada simulação (14C1A, 14C1B e 14C1C).

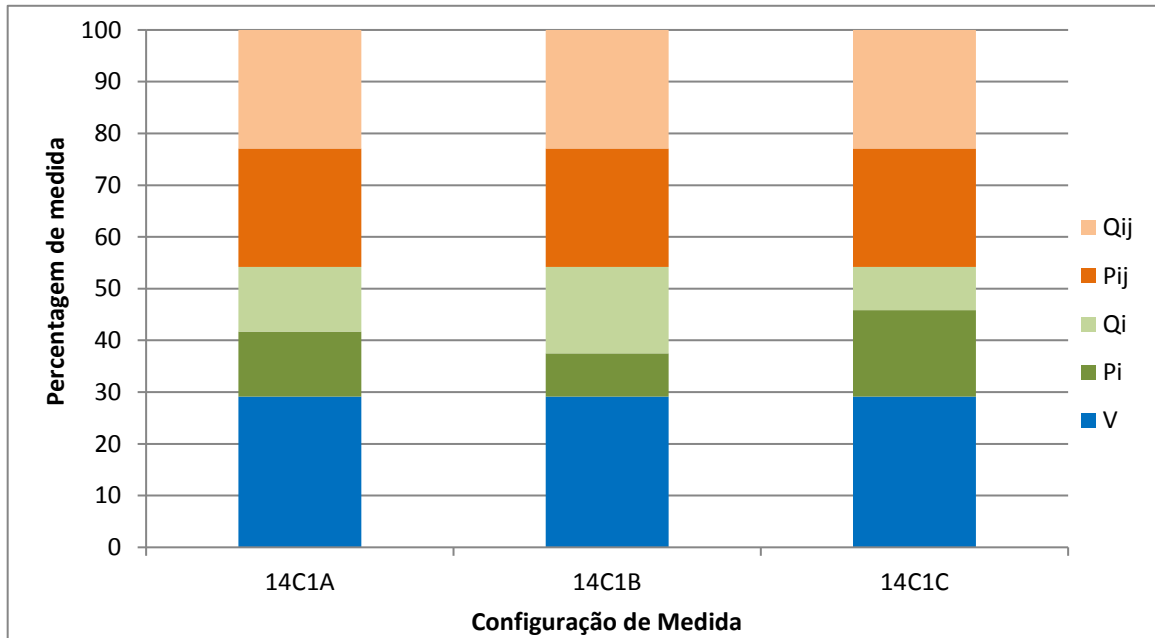


Figura 5.14 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas.

Pode-se então concluir que para as simulações efetuadas, todas elas apresentaram resultados aceitáveis para as variáveis de estado estimadas. É possível afirmar também que a configuração de medida 14C1A é a que apresentou melhor característica de convergência, e que a configuração 14C1C é a que deteve melhor desempenho de qualidade na globalidade da estimativa.

REDUNDÂNCIA DE VALOR 2.22

O aumento da redundância de medidas relativamente à rede de 14 barramentos, serve não só para continuar a avaliar o comportamento do estimador recorrendo a um conjunto inicial de medidas fornecidas, mas também para se avaliar a influência da redundância nos resultados finais do vetor de estado estimado.

As simulações seguintes tomam a mesma forma, e são alvo dos mesmos métodos de avaliação estatística anteriormente utilizados.

A primeira simulação efetuada com valor de redundância 2.22, corresponde à quarta simulação, e é respeitante à configuração de medida 14C2A.

Tabela 5.20 – Configurações de medida 14C2A (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C2A	14	9	9	14	14	60	2,22

A Tabela 5.20 caracteriza o conjunto de medidas utilizado, sendo o mesmo constituído pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potência ativa e reativa injetada nos barramentos 2, 3, 5, 8, 10, 11, 12, 13, 14, e pelos trânsitos de potência ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-7, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, 9-14, 10-11 e 12-13. Desta forma foi garantida a observabilidade da rede com uma redundância aproximada de 2,22.

Respeitando os dados anteriores, são apresentados nas Tabelas 5.21 e 5.22 os resultados estimados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase respetivamente.

Tabela 5.21 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2A.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,06000	1,06024	2,36E-04	6,86E-04	0,34
2	1,04500	1,04522	2,19E-04	5,19E-04	0,42
3	1,01000	1,01094	9,39E-04	7,17E-04	1,31
4	1,02611	1,02614	3,02E-05	5,78E-04	0,05
5	1,03261	1,03298	3,70E-04	5,87E-04	0,63
6	1,07001	1,06944	5,67E-04	6,94E-04	0,82
7	1,04482	1,04450	3,24E-04	6,90E-04	0,47
8	1,09000	1,08975	2,52E-04	8,63E-04	0,29
9	1,02765	1,02736	2,88E-04	6,72E-04	0,43
10	1,02756	1,02750	6,33E-05	6,39E-04	0,10
11	1,04496	1,04444	5,22E-04	7,20E-04	0,73
12	1,05303	1,05233	7,00E-04	8,14E-04	0,86
13	1,04624	1,04494	1,30E-03	6,47E-04	2,02
14	1,01745	1,01700	4,48E-04	8,37E-04	0,54

Tabela 5.22 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2A.

Barramento i	$ \theta_i _{real}$	$ \theta_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08594	4,53E-04	4,89E-04	0,93
3	-0,22044	-0,21943	1,01E-03	1,09E-03	0,92
4	-0,18082	-0,17989	9,28E-04	1,11E-03	0,84
5	-0,15603	-0,15565	3,78E-04	9,98E-04	0,38
6	-0,25953	-0,25458	4,95E-03	2,17E-03	2,28
7	-0,23457	-0,23263	1,94E-03	2,00E-03	0,97
8	-0,23475	-0,23263	2,11E-03	2,53E-03	0,84
9	-0,26285	-0,26012	2,72E-03	2,10E-03	1,30
10	-0,26721	-0,26400	3,21E-03	2,06E-03	1,56
11	-0,26546	-0,26128	4,18E-03	2,14E-03	1,95
12	-0,27419	-0,26853	5,66E-03	2,53E-03	2,24
13	-0,27454	-0,26998	4,56E-03	2,21E-03	2,06
14	-0,28606	-0,28360	2,46E-03	2,39E-03	1,03

Na Tabela 5.23 é apresentado um resumo dos dados relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 14C2A.

Tabela 5.23 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2A.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,22	14C2A	1,30E-03	4,47E-04	5,66E-03	2,47E-03

Pela análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que o algoritmo teve um bom comportamento na obtenção do vetor de estado tanto em módulo como em fase. Verifica-se também, que existe uma melhor estimacão dos valores respeitantes aos módulos das tensões, relativamente aos ângulos de fase, uma vez que o erro médio e máximo para as fases é mais elevado. Pese embora este facto, os resultados obtidos não apresentam valores com grau de desconfiança assinaláveis, pelo que se consideram confiáveis os resultados e a estimacão do vetor de estado obtida.

Verificando por comparacão os resultados obtidos na configuracão 14C1A e na 14C2A, em que nas mesmas se apresentam características de configuracão de medidas similares, isto é, onde existe um equilíbrio entre as medidas disponíveis de potências injetadas nos barramentos (ativa e reativa) e de trânsito de potências (ativa e reativa), o aumento de redundância de medida na configuracão 14C2A, proporcionou uma melhoria na qualidade do vetor de estado estimado, uma vez que os erros médios são inferiores tanto em módulo como em fase.

Para uma melhor análise dos resultados, apresentam-se nas Figuras 5.15 e 5.16 as comparacões entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuracão de medida 14C2A e os valores considerados “reais”.

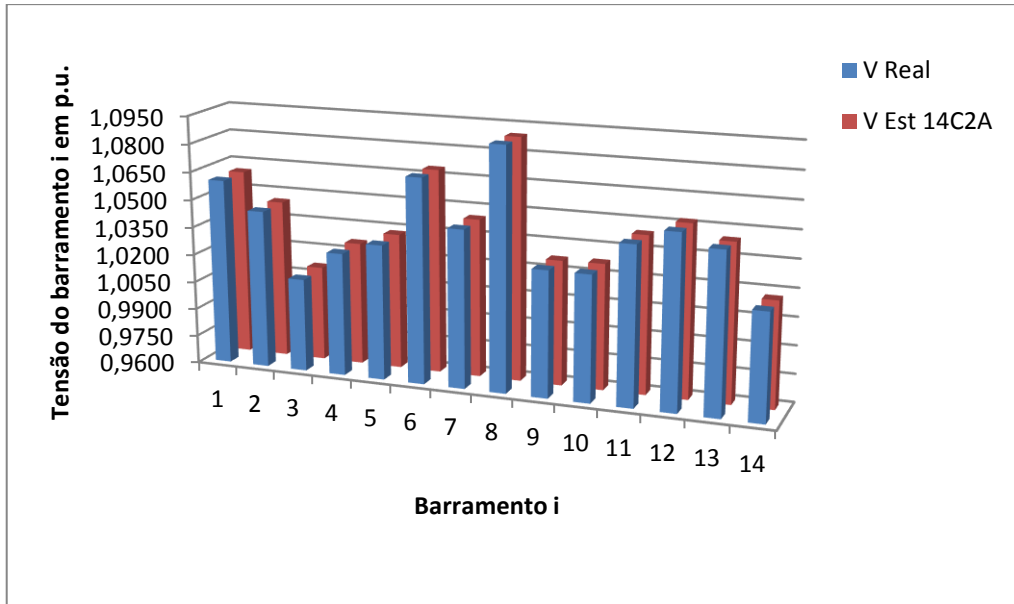


Figura 5.15 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2A.

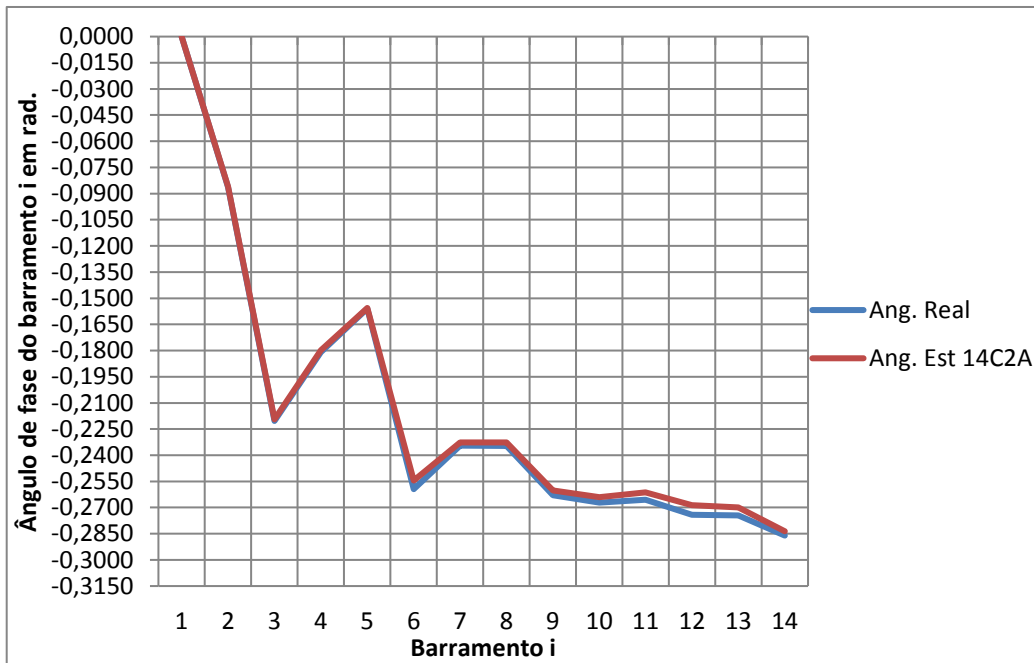


Figura 5.16 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2A.

A segunda simulação efetuada com valor de redundância 2.22, corresponde à quinta simulação, em que a configuração de medida toma a designação de 14C2B.

Tabela 5.24 – Configurações de medida 14C2B (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C2B	14	5	13	14	14	60	2,22

Na Tabela 5.24 encontra-se o conjunto de medidas utilizado na quinta simulação à rede de 14 barramentos, sendo o mesmo constituído pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potencia ativa nos barramentos 2, 3, 8, 11, 12, às medições da potencia reativa nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14 e pelos trânsitos de potencia ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-7, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, 9-14, 10-11 e 12-13.

São apresentados nas Tabelas 5.21 e 5.22 os resultados estimados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase da simulação efetuada para a configuração de medida 14C2B.

Tabela 5.25 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2B.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,06000	1,06001	1,12E-05	5,89E-04	0,02
2	1,04500	1,04517	1,67E-04	5,14E-04	0,32
3	1,01000	1,01096	9,64E-04	7,15E-04	1,35
4	1,02611	1,02621	9,82E-05	5,61E-04	0,18
5	1,03261	1,03308	4,66E-04	5,64E-04	0,83
6	1,07001	1,06935	6,58E-04	6,98E-04	0,94
7	1,04482	1,04436	4,56E-04	6,96E-04	0,66
8	1,09000	1,08971	2,89E-04	8,63E-04	0,33
9	1,02765	1,02700	6,50E-04	7,18E-04	0,90
10	1,02756	1,02812	5,64E-04	7,82E-04	0,72
11	1,04496	1,04450	4,63E-04	7,22E-04	0,64
12	1,05303	1,05227	7,64E-04	8,19E-04	0,93
13	1,04624	1,04513	1,11E-03	7,15E-04	1,55
14	1,01745	1,01690	5,54E-04	8,94E-04	0,62

Tabela 5.26 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2B.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08601	3,80E-04	4,96E-04	0,77
3	-0,22044	-0,21953	9,08E-04	1,10E-03	0,83
4	-0,18082	-0,18002	7,96E-04	1,16E-03	0,69
5	-0,15603	-0,15574	2,89E-04	1,16E-03	0,25
6	-0,25953	-0,25371	5,82E-03	2,28E-03	2,55
7	-0,23457	-0,23343	1,14E-03	2,06E-03	0,55
8	-0,23475	-0,23343	1,31E-03	2,58E-03	0,51
9	-0,26285	-0,26112	1,72E-03	2,20E-03	0,78
10	-0,26721	-0,26126	5,95E-03	2,90E-03	2,05
11	-0,26546	-0,25953	5,94E-03	2,51E-03	2,37
12	-0,27419	-0,26747	6,72E-03	2,67E-03	2,52
13	-0,27454	-0,26866	5,88E-03	2,50E-03	2,35
14	-0,28606	-0,28395	2,11E-03	3,09E-03	0,68

A Tabela 5.27 descreve os resultados estatísticos do vetor de estado estimado em comparação com os valores considerados “reais” respeitantes à simulação com base na configuração de medida 14C2B.

Tabela 5.27 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2B.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,22	14C2B	1,11E-03	5,15E-04	6,72E-03	2,78E-03

Avaliando os resultados do vetor de estado estimado para a configuração de medidas 14C2B, bem como as respetivas avaliações estatísticas constantes nas tabelas 5.25, 5.26 e 5.27, conclui-se que à semelhança da estimação anterior, os resultados relativos aos módulos das tensões tem aproximações maiores aos “verdadeiros” valores comparando com os ângulos de fase.

Ao contrário do que seria de esperar, não se verificou uma melhoria no erro médio relativo aos módulos das tensões uma vez que na presença de um maior número de potências reativas injetadas em comparação com as potências ativas, e sabendo que os dados das medidas de potência reativa influenciam diretamente os valores estimados das tensões, era esperada uma melhoria nestes resultados.

Facto que pode contribuir para o sucedido, é o aumento da redundância, isto porque na configuração 14C2B existe um maior número de medidas de potência injetada reativa do que ativa, e que com a existência de medidas afetadas de erros aleatórios de maior amplitude influenciam diretamente o aumento do erro medio de medida para as medidas de tensão estimadas. O posicionamento das medidas também é um fator determinante, uma vez que com o aumento do número medidas nas imediações dessas medidas, e existindo correlacionamento entre as mesmas, a influência de um número maior de medidas disponíveis condiciona o resultado final da estimativa.

Para se ter uma melhor perceção dos resultados obtidos, são apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18 as comparações entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuração de medida 14C2B e os seus “verdadeiros” valores.

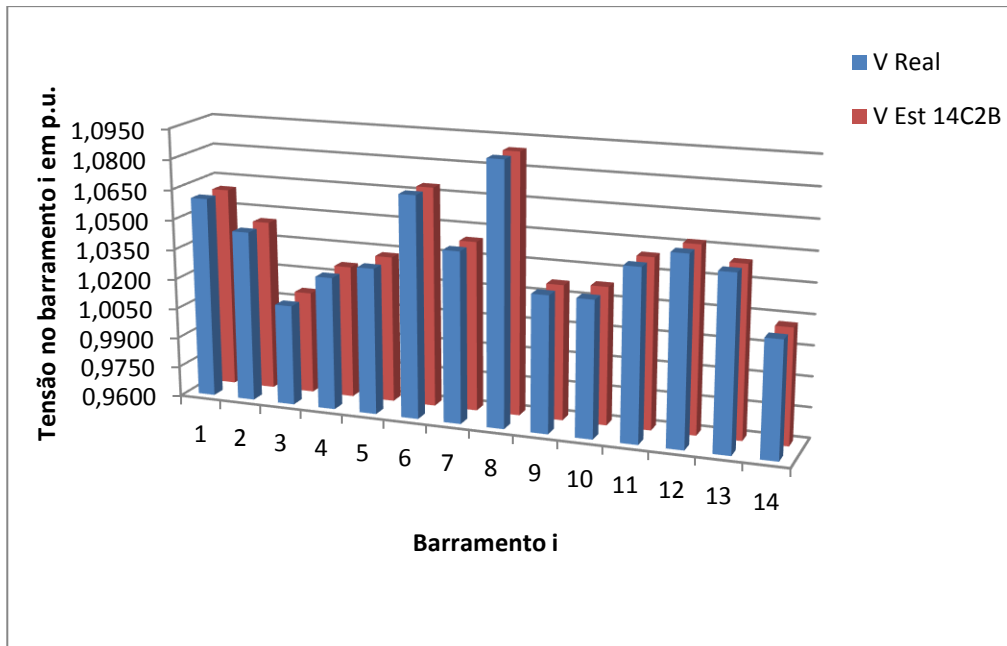


Figura 5.17 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2B.

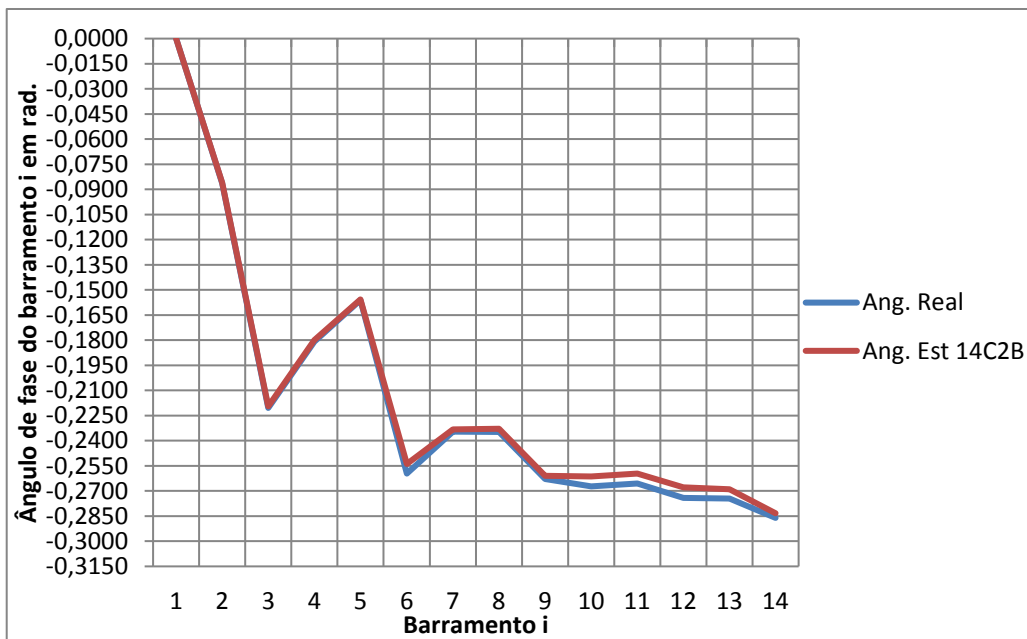


Figura 5.18 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2B.

A terceira simulação efetuada com valor de redundância 2.22, corresponde à sexta simulação para a rede de 14 barramentos, em que a configuração de medida toma a designação de 14C2C.

Tabela 5.28 – Configurações de medida 14C2C (rede de 14 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
14C2C	14	13	5	14	14	60	2,22

A Tabela 5.28 caracteriza a composição do conjunto de medidas utilizado para a sexta simulação, sendo o mesmo constituído pela amplitude da tensão em todos os barramentos, pelos valores correspondentes às medições da potencia ativa nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 às medições da potencia reativa nos barramentos 2, 3, 8, 11, 12, e pelos trânsitos de potencia ativa e reativa nas linhas 1-2, 2-3, 2-4, 2-5, 4-5, 4-7, 4-9, 5-6, 6-11, 6-13, 7-9, 9-14, 10-11 e 12-13. Com a presente configuração de medida, pretende-se avaliar o comportamento do estimador em comparação com as anteriores simulações.

Assim, nas Tabelas 5.29 e 5.30 são apresentados os resultados estimados para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase da simulação efetuada para a configuração de medida 14C2C, bem como a sua avaliação de confiabilidade nos resultados obtidos perante os seus “verdadeiros” valores.

Tabela 5.29 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2C.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,06000	1,06030	2,95E-04	6,84E-04	0,43
2	1,04500	1,04520	2,04E-04	5,19E-04	0,39
3	1,01000	1,01096	9,60E-04	7,14E-04	1,34
4	1,02611	1,02608	2,75E-05	5,76E-04	0,05
5	1,03261	1,03299	3,79E-04	5,87E-04	0,65
6	1,07001	1,06942	5,95E-04	7,02E-04	0,85
7	1,04482	1,04448	3,44E-04	7,03E-04	0,49
8	1,09000	1,08974	2,57E-04	8,64E-04	0,30
9	1,02765	1,02733	3,18E-04	7,64E-04	0,42
10	1,02756	1,02767	1,14E-04	8,83E-04	0,13
11	1,04496	1,04443	5,33E-04	7,23E-04	0,74
12	1,05303	1,05230	7,29E-04	8,14E-04	0,90
13	1,04624	1,04527	9,71E-04	7,70E-04	1,26
14	1,01745	1,01660	8,48E-04	9,43E-04	0,90

Tabela 5.30 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 14 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 14C2C.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	0,00000	-	-	-	-
2	-0,08639	-0,08633	6,39E-05	3,44E-04	0,19
3	-0,22044	-0,21997	4,60E-04	9,36E-04	0,49
4	-0,18082	-0,18090	8,22E-05	7,42E-04	0,11
5	-0,15603	-0,15646	4,30E-04	7,06E-04	0,61
6	-0,25953	-0,25518	4,36E-03	1,64E-03	2,66
7	-0,23457	-0,23302	1,55E-03	1,70E-03	0,91
8	-0,23475	-0,23255	2,19E-03	2,30E-03	0,95
9	-0,26285	-0,26045	2,40E-03	1,61E-03	1,49
10	-0,26721	-0,26459	2,62E-03	1,83E-03	1,43
11	-0,26546	-0,26197	3,50E-03	1,88E-03	1,86
12	-0,27419	-0,26936	4,84E-03	2,28E-03	2,12
13	-0,27454	-0,27094	3,60E-03	1,95E-03	1,84
14	-0,28606	-0,28366	2,40E-03	2,27E-03	1,06

Na Tabela 5.31 apresentam-se os resultados estatísticos do vetor de estado estimado em comparação com os valores considerados “reais” respeitantes à simulação com base na configuração de medida 14C2C.

Tabela 5.31 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 14C2C.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,22	14C2C	9,71E-04	4,70E-04	4,84E-03	2,03E-03

Considerando os dados recolhidos após a resolução do algoritmo de estimação de estado para a Configuração de medida 14C2C, é possível afirmar que a mesma apresentou bons resultados na estimativa obtida. É de notar que o desempenho do estimador revelou-se mais preciso para os módulos das tensões do que para os ângulos de fase, sendo que em ambos os casos os resultados são confiáveis.

Em termos comparativos é também possível verificar que a configuração 14C2C apresenta melhores resultados globais, onde se evidencia a melhor qualidade de estimativa para as fases das tensões em relação às configurações de medida 14C2A e 14C2B. Relativamente aos erros médios encontrados para os módulos das tensões, a configuração 14C2C melhorou em comparação com a 14C2B, mas apresentou resultado menos precisos do que os obtidos aquando da simulação 14C2A.

De notar também, que o acoplamento $P - \theta$ foi evidenciado por na estimativa 14C2C se comprovar o melhor resultado de estimação relativamente aos angulo de fase das tensões, tanto em valor máximo, como em valor médio das três configurações estudadas até ao momento.

Conforme apresentado anteriormente, são representadas nas Figuras 5.19 e 5.20 as comparações entre o vetor de estado estimado recorrendo à configuração de medida 14C2C e os seus “verdadeiros” valores.

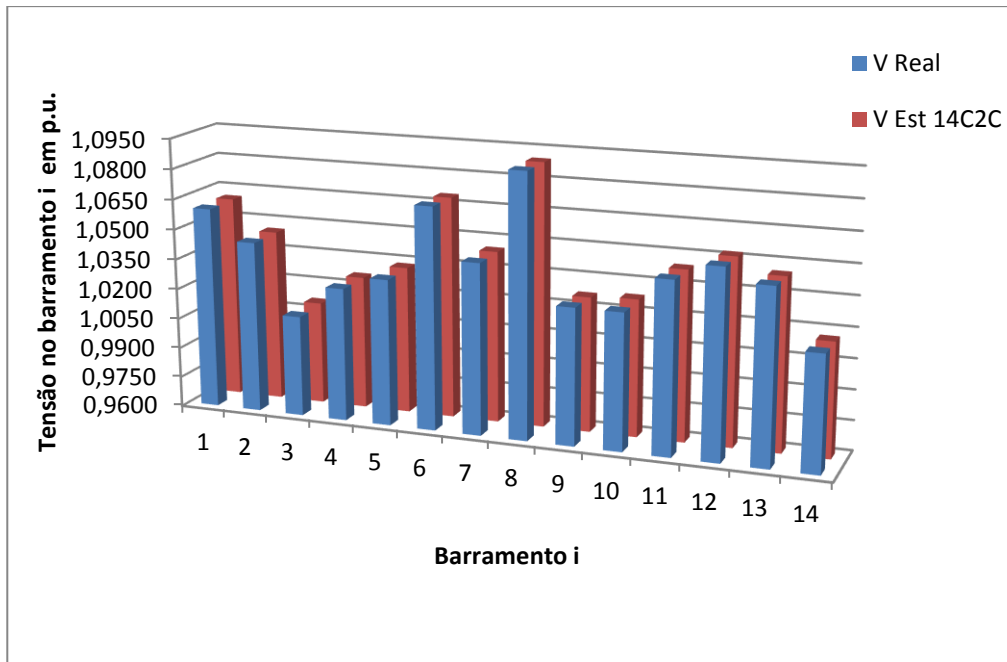


Figura 5.19 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2C.

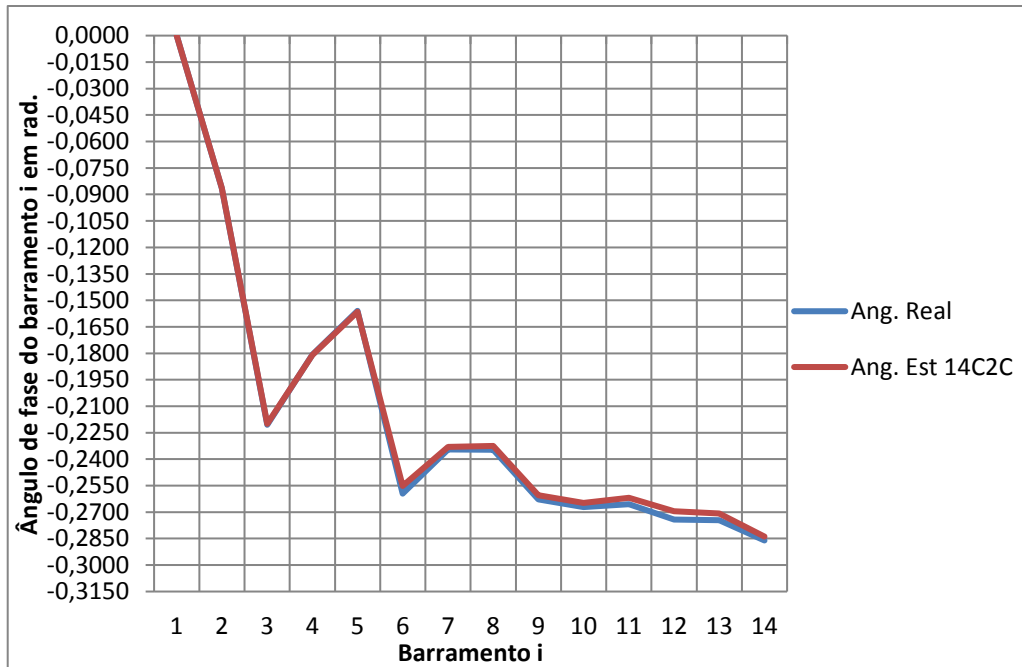


Figura 5.20 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 14C2C.

Após a apresentação dos resultados anteriores para simulações efetuadas na rede de 14 barramentos e com redundância de medida com valor de 2,22, segue-se um resumo dos três casos avaliados.

Tendo por vista a avaliação da convergência do algoritmo implementado para as diferentes simulações, são apresentados na tabela 5.32 os valores de $J(x)$ ao longo das iterações.

Tabela 5.32 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C.

Iteração k	Converge para $\varepsilon \leq 0.001$		
	1	2	3
Função Objetivo - 14C2A	8,56E+04	724,7344	16,9273
Função Objetivo - 14C2B	8,53E+04	739,8896	16,9586
Função Objetivo - 14C2C	1,43E+05	1,55E+03	17,7563

Como se pode constatar pelos resultados apresentados na Tabela 5.32, existiu uma diminuição ao longo das iterações do valor da função objetivo, confirmando a minimização dos resíduos ao longo das mesmas como era de esperar. É notório também que existiu uma convergência mais rápida para as configurações 14C2A e 14C2B, sendo que a função objetivo teve uma convergência mais lenta para a configuração 14C2C. Outro facto que importa referir, é que embora contendo um valor final para a função Objetivo de maior amplitude, o algoritmo 14C1C foi o que apresentou de forma global o melhor resultado de estimação, uma vez que o somatório dos erros médios calculados apresenta um melhor resultado em relação aos anteriores.

De forma se conseguir comparar mais facilmente os resultados obtidos para as três simulações, apresenta-se graficamente nas figuras 5.9 e 5.10 os componentes do vetor de estado estimado para as três configurações estudadas, onde se comparam as mesmas com os respetivos “verdadeiros” valores (módulo e fase).

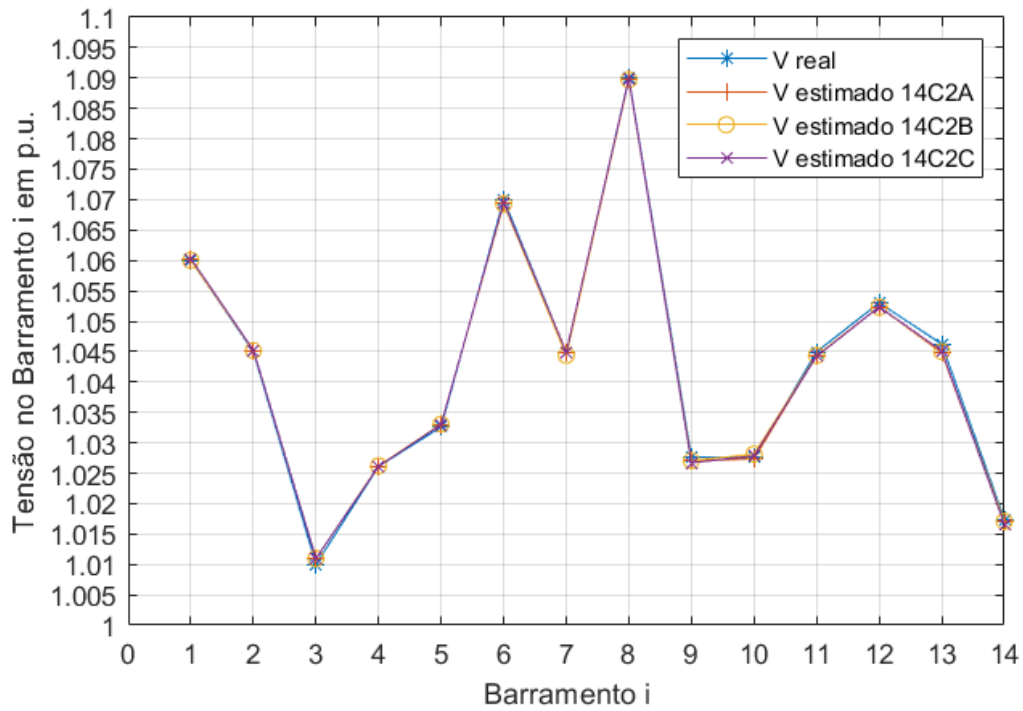


Figura 5.21 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C (Real vs. Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.

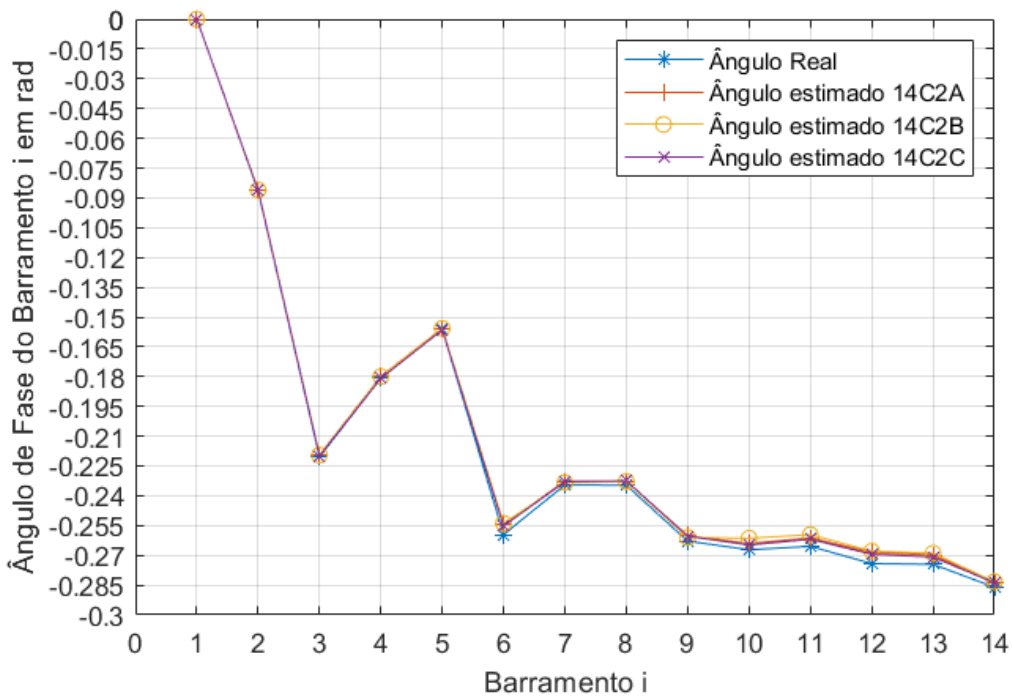


Figura 5.22 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C (Real vs. Estimado) – Rede IEEE 14 Barramentos.

Sendo a avaliação do comportamento do estimador efetuada por comparação dos erros de estimativa, caracterizado para cada componente do vetor de estado e para cada componente do vetor das medidas, apresenta-se nas figuras 5.23 e 5.24 o erro existente para cada variável de estado para as três configurações de medida, permitindo assim uma análise mais pormenorizada dos erros associados a essas grandezas.

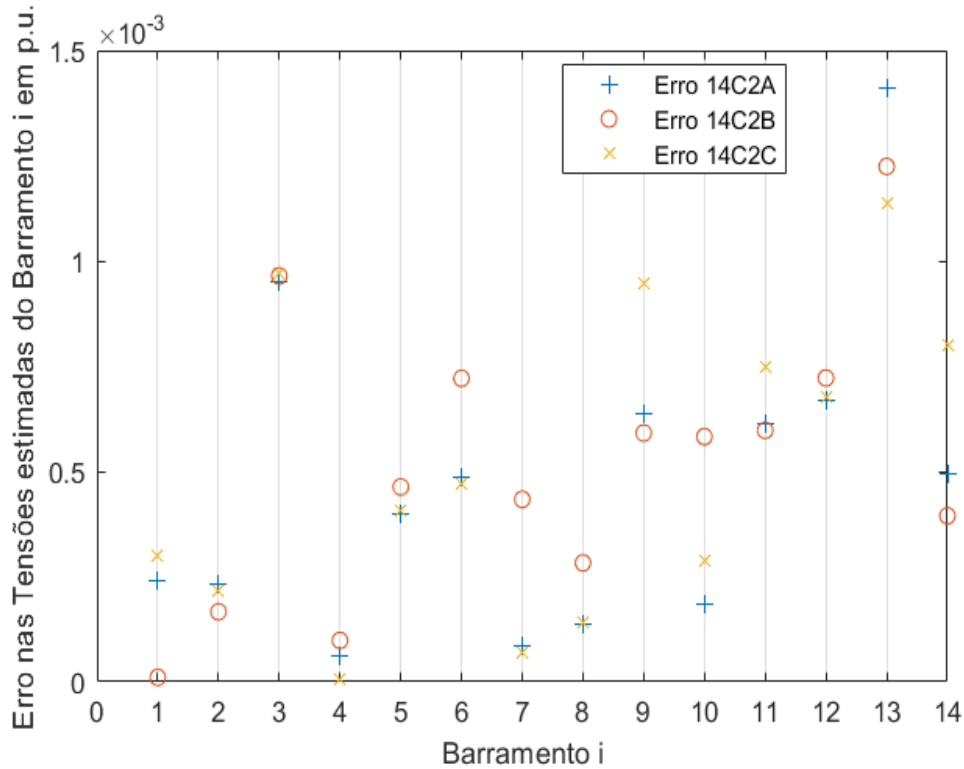


Figura 5.23 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C – Rede IEEE 14 Barramentos.

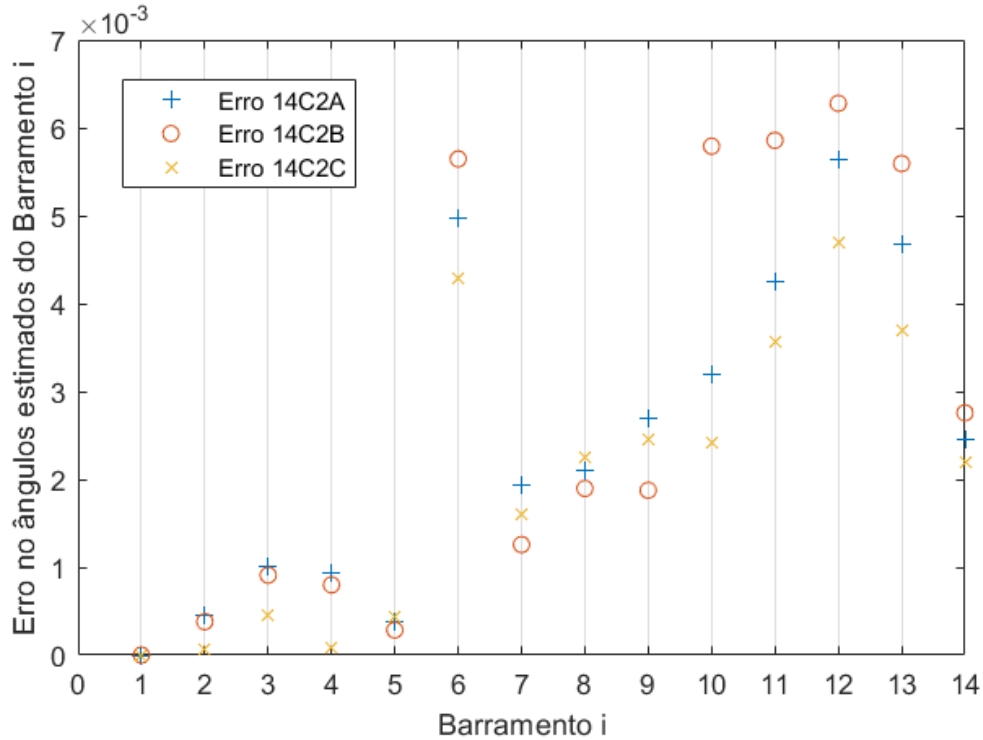


Figura 5.24 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 14C2A, 14C2B e 14C2C – Rede IEEE 14 Barramentos.

Pela análise das tabelas anteriormente apresentadas, nomeadamente as Tabelas 5.21, 5.22, 5.25, 5.26, 5.29 e 5.30, constata-se que o algoritmo apresentou melhores resultados para os módulos das tensões para a configuração 14C2A e que para os ângulos de fase a configuração de medida que permitiu um melhor desempenho foi a configuração 14C2C. É possível também verificar que para todas as configurações disponíveis o algoritmo apresentou resultados em que é possível afirmar a boa qualidade das estimativas obtidas (todos os valores estatísticos respeitam $\frac{|\delta_x|}{\sqrt{\Sigma_x}} < 3$).

Relativamente aos erros para os valores estimados, é possível concluir que existe uma ampla variação entre os resultados dos 3 estimadores evidenciando uma maior aproximação do valor estimado nos barramentos na configuração 14C2B em que nos mesmos existiam medidas iniciais, e uma depreciação da qualidade nos que não haviam medidas de potência reativa injetada. O facto anteriormente descrito, não proporcionou todavia o melhor resultado na estimativa para os módulos das tensões por forma dos maiores desvios nos restantes barramentos.

Para as fases das tensões como descrito anteriormente o melhor desempenho proporcionado pela configuração de medida 14C2C é claramente notório pelo menor módulo de erro em todos os barramentos com a exceção dos barramentos, 5, 7, 8 e 9.

Foi novamente testado o acoplamento $Q - |V| / P - \theta$, sendo evidente a influência do maior número de medidas de potência ativas injetadas nas barramentos (14C2C) provocou um erro global menor nos ângulos, o mesmo não se verificou na globalidade para a configuração 14C2B, facto já explicitado anteriormente em maior pormenor.

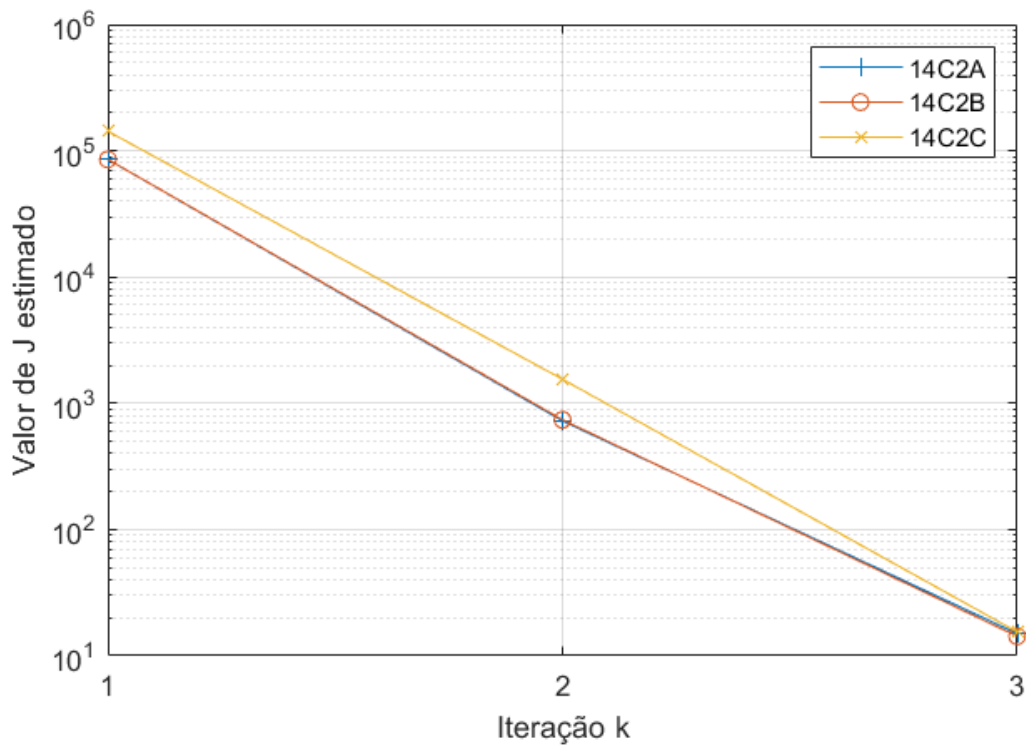


Figura 5.25 – Características de convergência dos testes 14C1A, 14C1B e 14C1C - Rede IEEE 14 Barramentos.

Como já afirmado ao longo da dissertação, o tipo, quantidade, localização, e o peso das medidas disponíveis, influenciam diretamente os resultados das estimativas obtidas.

Desta forma, na Figura 5.26 é demonstrado o peso em percentagem de cada tipo de medida no conjunto de medidas que compõem as configurações de medida disponíveis para cada simulação (14C2A, 14C2B e 14C2C), tendo em vista uma melhor clarificação do peso de cada um dos resultados obtidos.

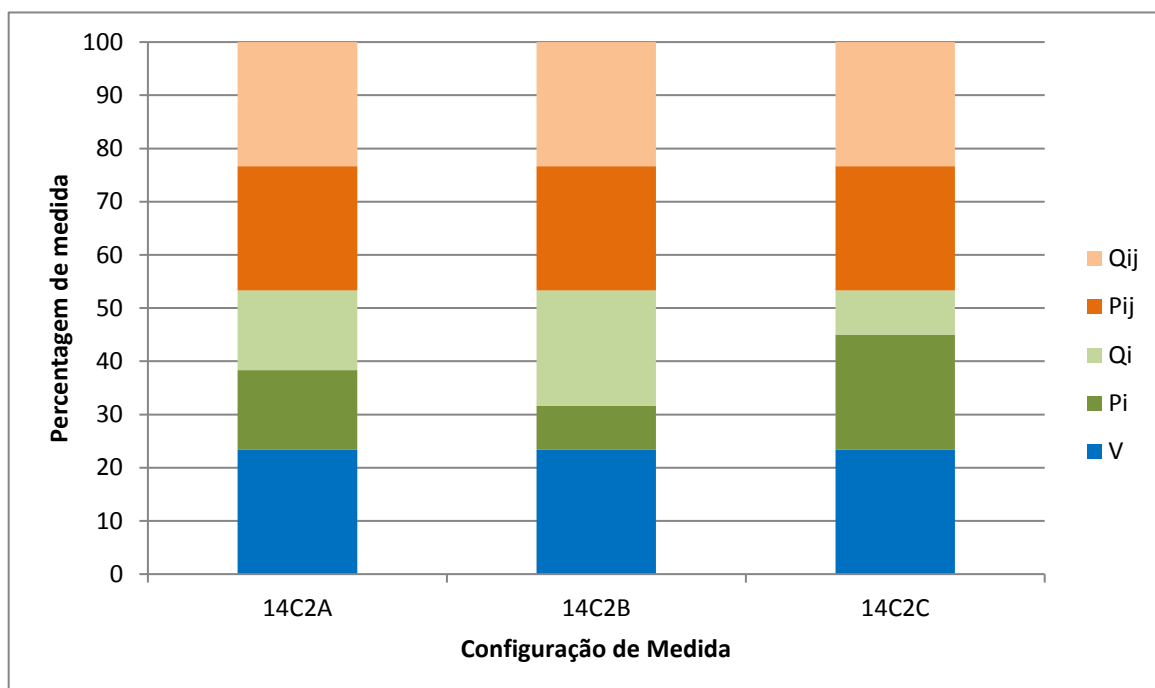


Figura 5.26 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas (14C2A, 14C2B e 14C2C).

Após as constatações expostas anteriormente em cada simulação estudada, é possível concluir que em todas as configurações de medida se obtiveram bons resultados. Relativamente ao comportamento do estimador perante as diferentes configurações de medida, apesar da configuração de medida 14C1B apresentar uma melhor convergência, foi a que evidenciou maiores deslizamentos relativamente ao módulo dos erros médios tanto para as tensões como para as fases. Seguindo esta análise, a Configuração 14C2C é a que melhores resultados globais apresentou, salientando a maior eficácia para as fases das tensões.

5.4.2 – REDE DE TESTE IEEE DE 118 BARRAMENTOS

Continuando a analisar o comportamento do estimador e da verificação do desempenho do mesmo, foram efetuadas duas simulações para a rede IEEE de 118 barramentos. O que diferencia as simulações da presente rede, das efetuadas anteriormente, é o maior número de elementos constituintes do SEE e do conseqüente aumento de complexidade do mesmo, tendo como conseqüência o aumento significativo do vetor de medidas necessário para que seja verificada a observabilidade da rede e seja possível a convergência do algoritmo de estimação de estado.

Deste modo, o objetivo é avaliar as capacidades do estimador implementado, uma vez que com um aumento significativos de dados disponíveis e da complexidade da rede, o algoritmo terá que desempenhar cálculos muito mais complexos e demorados.

Similarmente aos estudos apresentados anteriormente, para a rede de 118 barramentos também será testada a influência da redundância de medida. Este estudo, serve não só para continuar a avaliar o comportamento do estimador recorrendo a um conjunto inicial de medidas fornecidas, mas também para se avaliar a influência da redundância nos resultados finais do vetor de estado estimado (agora de grandes dimensões).

As simulações seguintes tomam a mesma forma, e são alvo dos mesmos métodos de avaliação estatística anteriormente utilizados.

Para a avaliação do estudo relativo ao algoritmo baseado no método WLS na rede de 118 barramentos, o mesmo foi efetuado com recurso a dois conjuntos de medidas de forma a simular valores distintos de redundância conforme indicado nas tabelas 5.33 e 5.37.

Os conjuntos de medidas selecionados não respeitam pares de medidas P_i-Q_i e $P_{ij}-Q_{ij}$ por forma a verificar o comportamento do estimador em condições mais próximas da realidade. Por forma a simplificar a apresentação de resultados, os mesmos serão apresentados pela seguinte ordem:

1. Configuração de medida 118C1 (Redundância 2,3);
2. Configuração de medida 118C2 (Redundância 2,7);

CONFIGURAÇÃO 118C1 (Redundância de 2,3)

A primeira simulação para a rede de 118 barramentos respeita a configuração de medida 118C1 e pode ser verificada em pormenor na tabela 5.33 e nos dados seguintes:

Tabela 5.33 – Configurações de medida 118C1 (rede de 118 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
118C1	107	57	54	172	164	554	2.3

De acordo com a configuração de medidas constante na Tabela 5.33, o primeiro teste à rede de 118 barramentos corresponde à configuração 118C1, do qual fazem parte as seguintes medidas:

- Amplitude de tensão nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 57, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118;
- Injeção de Potencia ativa nos barramentos 1, 2, 4, 5, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 34, 36, 37, 39, 43, 44, 48, 49, 50, 52, 53, 61, 63, 64, 67, 71, 73, 75, 79, 82, 83, 84, 87, 93, 94, 95, 97, 102, 104, 106, 108, 109, 110, 114, 116, 117, 118;
- Injeção de Potencia reativa nos barramentos 1, 2, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 15, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 29, 34, 36, 37, 39, 43, 48, 50, 52, 53, 61, 63, 64, 67, 71, 73, 75, 79, 84, 85, 87, 88, 93, 94, 95, 97, 102, 104, 106, 108, 109, 110, 114, 116, 117, 118;
- Trânsito de Potência ativa nas linhas 1-2, 1-3, 2-12, 3-5, 3-12, 4-5, 4-11, 5-6, 8-5, 5-11, 6-7, 7-12, 8-9, 8-30, 9-10, 11-12, 12-14, 12-16, 12-117, 13-15, 14-15, 15-17, 15-19, 15-33, 16-17, 17-18, 30-17, 17-31, 17-113, 18-19, 19-20, 19-34, 20-21, 21-22, 22-23, 23-24, 23-25, 23-32, 24-70, 24-72, 26-25, 25-27,

26-30, 27-28, 27-32, 27-115, 28-29, 29-31, 30-38, 31-32, 32-113, 32-114, 33-37, 34-36, 34-37, 34-43, 35-36, 35-37, 38-37, 37-39, 37-40, 39-40, 40-41, 42-49, 42-49, 42-49, 43-44, 44-45, 45-46, 45-49, 46-47, 46-48, 47-49, 47-69, 48-49, 49-50, 49-54, 49-54, 49-54, 49-66, 49-69, 50-57, 51-52, 51-58, 52-53, 53-54, 54-55, 54-56, 55-56, 56-58, 56-59, 56-59, 56-59, 59-60, 59-61, 63-59, 60-61, 60-62, 61-62, 64-61, 63-64, 64-65, 68-69, 68-81, 68-116, 69-70, 69-75, 69-77, 70-71, 70-74, 70-75, 71-72, 71-73, 74-75, 75-77, 75-118, 76-77, 76-118, 77-78, 77-82, 78-79, 79-80, 81-80, 80-96, 80-97, 80-98, 80-99, 82-83, 82-96, 83-84, 83-85, 84-85, 85-86, 85-88, 86-87, 89-92, 89-92, 91-90, 91-92, 92-93, 92-94, 92-100, 92-102, 93-94, 94-95, 94-96, 94-100, 95-96, 96-97, 98-100, 99-100, 100-101, 100-103, 100-104, 100-106, 101-102, 103-104, 103-105, 103-110, 104-105, 105-106, 105-107, 105-108, 106-107, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112, 114-115;

- Trânsito de Potência reativa nas linhas 1-2, 1-3, 2-12, 3-5, 3-12, 4-5, 4-11, 5-6, 5-11, 6-7, 7-12, 8-9, 8-30, 9-10, 11-12, 11-13, 12-14, 12-16, 12-117, 13-15, 14-15, 15-17, 15-19, 15-33, 16-17, 17-18, 17-31, 17-113, 18-19, 19-20, 19-34, 20-21, 21-22, 22-23, 23-24, 23-25, 23-32, 24-70, 24-72, 25-27, 26-30, 27-28, 27-32, 27-115, 28-29, 29-31, 31-32, 32-113, 32-114, 33-37, 34-36, 34-43, 35-36, 35-37, 37-39, 37-40, 38-65, 39-40, 40-41, 40-42, 41-42, 42-49, 42-49, 42-49, 43-44, 44-45, 45-46, 45-49, 46-47, 47-49, 47-69, 49-50, 49-66, 49-66, 49-66, 49-69, 50-57, 51-52, 51-58, 52-53, 53-54, 54-55, 54-56, 55-56, 56-58, 56-59, 56-59, 56-59, 59-60, 59-61, 60-61, 60-62, 61-62, 62-66, 62-67, 63-64, 64-65, 65-68, 66-67, 68-81, 68-116, 69-70, 69-75, 69-77, 70-71, 70-74, 70-75, 71-72, 71-73, 74-75, 75-77, 75-118, 76-77, 76-118, 77-78, 77-82, 80-96, 80-97, 80-98, 80-99, 82-96, 83-84, 83-85, 84-85, 85-86, 85-88, 85-89, 86-87, 88-89, 89-90, 89-90, 89-90, 89-92, 89-92, 91-90, 91-92, 92-93, 92-94, 92-102, 93-94, 94-95, 94-96, 94-100, 95-96, 96-97, 98-100, 99-100, 100-101, 100-103, 100-104, 100-106, 101-102, 103-104, 103-105, 103-110, 104-105, 105-106, 105-107, 105-108, 106-107, 108-109, 109-110, 110-112, 114-115.

Os resultados obtidos recorrendo ao algoritmo implementado, e respeitando a configuração anteriormente descrita para a rede IEEE de 118 barramentos, são apresentados nas Tabelas 5.34 e 5.35. Nas tabelas encontram-se os resultados “reais” para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase bem como os valores estimados respetivamente.

Tabela 5.34 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C1.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,03500	1,03424	7,64E-04	1,39E-03	0,55
2	0,97222	0,97230	8,41E-05	1,35E-03	0,06
3	0,96902	0,96920	1,75E-04	1,48E-03	0,12
4	0,99800	0,99820	1,99E-04	1,25E-03	0,16
5	1,00207	1,00225	1,82E-04	1,24E-03	0,15
6	0,99000	0,99000	7,63E-07	1,29E-03	0,00
7	0,98932	0,98945	1,26E-04	1,29E-03	0,10
8	1,01500	1,01488	1,20E-04	1,21E-03	0,10
9	1,04278	1,04262	1,58E-04	1,22E-03	0,13
10	1,05000	1,04969	3,09E-04	1,20E-03	0,26
11	0,98510	0,98485	2,52E-04	1,27E-03	0,20
12	0,99000	0,98977	2,31E-04	1,26E-03	0,18
13	0,96824	0,96799	2,54E-04	1,33E-03	0,19
14	0,98359	0,98358	1,27E-05	1,41E-03	0,01
15	0,97000	0,97022	2,21E-04	1,26E-03	0,17
16	0,98395	0,98335	5,95E-04	1,44E-03	0,41
17	0,99524	0,99543	1,95E-04	1,30E-03	0,15
18	0,97300	0,97349	4,94E-04	1,31E-03	0,38
19	0,96342	0,96384	4,18E-04	1,29E-03	0,32
20	0,95814	0,95804	9,68E-05	1,51E-03	0,06
21	0,95874	0,95788	8,58E-04	1,62E-03	0,53
22	0,96979	0,96872	1,07E-03	1,74E-03	0,61
23	0,99974	0,99909	6,52E-04	1,34E-03	0,49
24	0,99200	0,99181	1,87E-04	1,35E-03	0,14
25	1,05000	1,04927	7,27E-04	1,31E-03	0,55
26	1,01500	1,01421	7,86E-04	1,27E-03	0,62
27	0,96800	0,96790	1,02E-04	1,46E-03	0,07
28	0,96158	0,96150	8,45E-05	1,61E-03	0,05
29	0,96320	0,96269	5,14E-04	1,54E-03	0,33
30	0,98586	0,98546	4,04E-04	1,27E-03	0,32
31	0,96700	0,96627	7,32E-04	1,54E-03	0,48
32	0,96368	0,96334	3,37E-04	1,48E-03	0,23

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
33	0,97162	0,97270	1,08E-03	1,59E-03	0,68
34	0,98593	0,98527	6,62E-04	1,39E-03	0,48
35	0,98070	0,98025	4,55E-04	1,44E-03	0,31
36	0,98000	0,97948	5,20E-04	1,43E-03	0,36
37	0,99211	0,99248	3,65E-04	1,39E-03	0,26
38	0,96329	0,95967	3,62E-03	1,57E-03	2,30
39	0,97082	0,97085	2,68E-05	1,54E-03	0,02
40	0,97000	0,97028	2,77E-04	1,62E-03	0,17
41	0,96667	0,96666	5,29E-06	1,67E-03	0,00
42	0,98500	1,01716	3,22E-02	1,61E-03	19,94
43	0,97869	0,97954	8,45E-04	1,66E-03	0,51
44	0,98531	0,98604	7,33E-04	1,92E-03	0,38
45	0,98689	0,98686	3,45E-05	1,82E-03	0,02
46	1,00500	1,00668	1,68E-03	1,76E-03	0,96
47	1,01729	1,01831	1,02E-03	1,47E-03	0,69
48	1,02063	1,01537	5,26E-03	1,45E-03	3,62
49	1,02500	1,02602	1,02E-03	1,38E-03	0,74
50	1,00148	1,00194	4,64E-04	1,54E-03	0,30
51	0,96759	0,98830	2,07E-02	1,94E-03	10,69
52	0,95755	0,97883	2,13E-02	1,93E-03	11,05
53	0,94634	0,96810	2,18E-02	1,84E-03	11,85
54	0,95500	0,97729	2,23E-02	1,68E-03	13,31
55	0,95200	0,97416	2,22E-02	1,69E-03	13,15
56	0,95459	0,97684	2,22E-02	1,67E-03	13,30
57	0,97124	0,97143	1,91E-04	2,10E-03	0,09
58	0,95972	0,98115	2,14E-02	1,88E-03	11,42
59	0,98500	0,98742	2,42E-03	1,53E-03	1,58
60	0,99322	0,99572	2,50E-03	1,43E-03	1,75
61	0,99500	0,99748	2,48E-03	1,42E-03	1,75
62	0,99800	1,00047	2,47E-03	1,44E-03	1,71
63	0,96905	0,97149	2,44E-03	1,40E-03	1,74
64	0,98389	0,98642	2,53E-03	1,38E-03	1,84
65	1,00500	1,00733	2,33E-03	1,35E-03	1,73
66	1,05000	1,03709	1,29E-02	1,37E-03	9,45
67	1,01985	1,01399	5,86E-03	1,38E-03	4,24
68	1,00319	1,00396	7,73E-04	1,35E-03	0,57
69	0,95717	0,95741	2,39E-04	1,47E-03	0,16
70	0,98400	0,98281	1,19E-03	1,48E-03	0,80
71	0,98685	0,98584	1,01E-03	1,46E-03	0,69
72	0,98000	0,98001	5,08E-06	1,76E-03	0,00
73	0,99100	0,98978	1,22E-03	1,52E-03	0,81
74	0,95857	0,95746	1,11E-03	1,56E-03	0,71
75	0,96822	0,96714	1,08E-03	1,46E-03	0,74

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
76	0,94300	0,94149	1,51E-03	1,66E-03	0,91
77	1,01173	1,01091	8,23E-04	1,40E-03	0,59
78	1,00844	1,00754	9,01E-04	1,41E-03	0,64
79	1,01307	1,00862	4,45E-03	1,37E-03	3,24
80	1,04000	1,03952	4,78E-04	1,58E-03	0,30
81	0,99674	0,99755	8,10E-04	1,35E-03	0,60
82	1,00000	0,99924	7,56E-04	1,44E-03	0,52
83	0,99390	0,99648	2,58E-03	2,04E-03	1,27
84	0,98522	0,98744	2,22E-03	1,84E-03	1,20
85	0,98832	0,99063	2,31E-03	1,74E-03	1,33
86	0,98883	0,99061	1,78E-03	2,15E-03	0,83
87	1,01500	1,01704	2,04E-03	2,51E-03	0,81
88	0,98914	0,99112	1,98E-03	1,66E-03	1,19
89	1,00500	1,00340	1,60E-03	1,59E-03	1,00
90	0,98500	0,98494	6,50E-05	1,66E-03	0,04
91	0,98000	0,97990	1,00E-04	1,79E-03	0,06
92	0,99781	0,99665	1,16E-03	1,58E-03	0,73
93	0,99121	0,99035	8,63E-04	1,52E-03	0,57
94	0,99408	0,99330	7,75E-04	1,44E-03	0,54
95	0,98534	0,98456	7,75E-04	1,46E-03	0,53
96	0,99816	0,99750	6,56E-04	1,45E-03	0,45
97	1,01423	1,01401	2,17E-04	1,50E-03	0,14
98	1,02353	1,02342	1,10E-04	1,75E-03	0,06
99	1,01000	1,00966	3,43E-04	1,65E-03	0,21
100	1,01700	1,01633	6,68E-04	1,48E-03	0,45
101	0,99468	0,99328	1,40E-03	1,71E-03	0,82
102	0,99538	0,99437	1,01E-03	1,59E-03	0,64
103	1,00632	1,00565	6,66E-04	1,56E-03	0,43
104	0,98821	0,98807	1,43E-04	1,65E-03	0,09
105	0,98239	0,98256	1,75E-04	1,71E-03	0,10
106	0,97260	0,97304	4,43E-04	1,72E-03	0,26
107	0,95200	0,95326	1,26E-03	2,17E-03	0,58
108	0,97666	0,97730	6,38E-04	1,77E-03	0,36
109	0,97459	0,97527	6,84E-04	1,80E-03	0,38
110	0,97286	0,97348	6,16E-04	1,90E-03	0,32
111	0,98000	0,98496	4,96E-03	2,65E-03	1,87
112	0,97500	0,97556	5,65E-04	2,01E-03	0,28
113	0,99300	0,99299	7,44E-06	1,33E-03	0,01
114	0,96049	0,96072	2,29E-04	1,53E-03	0,15
115	0,96037	0,96068	3,09E-04	1,54E-03	0,20
116	1,00500	1,00568	6,85E-04	1,34E-03	0,51
117	0,98241	0,97344	8,97E-03	1,66E-03	5,42
118	0,94992	0,94861	1,31E-03	1,55E-03	0,84

Tabela 5.35 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C1.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	-0,31800	-0,31796	3,54E-05	2,27E-03	0,02
2	-0,30823	-0,30830	7,49E-05	2,21E-03	0,03
3	-0,30229	-0,30260	3,05E-04	2,28E-03	0,13
4	-0,23719	-0,23725	6,13E-05	2,12E-03	0,03
5	-0,22951	-0,22950	1,28E-05	2,11E-03	0,01
6	-0,27698	-0,27708	9,70E-05	2,17E-03	0,04
7	-0,28466	-0,28504	3,73E-04	2,18E-03	0,17
8	-0,14190	-0,14183	6,46E-05	2,07E-03	0,03
9	-0,01518	-0,01508	1,05E-04	2,10E-03	0,05
10	0,11711	0,11749	3,78E-04	2,16E-03	0,17
11	-0,28187	-0,28198	1,05E-04	2,16E-03	0,05
12	-0,29095	-0,29099	4,40E-05	2,16E-03	0,02
13	-0,30578	-0,30549	2,92E-04	2,21E-03	0,13
14	-0,30334	-0,30278	5,53E-04	2,27E-03	0,24
15	-0,30805	-0,30784	2,15E-04	2,12E-03	0,10
16	-0,29636	-0,29639	3,35E-05	2,29E-03	0,01
17	-0,26512	-0,26519	7,92E-05	2,09E-03	0,04
18	-0,30316	-0,30289	2,69E-04	2,13E-03	0,13
19	-0,31102	-0,31064	3,79E-04	2,12E-03	0,18
20	-0,29618	-0,29551	6,69E-04	2,24E-03	0,30
21	-0,26878	-0,26839	3,87E-04	2,28E-03	0,17
22	-0,22462	-0,22452	1,06E-04	2,34E-03	0,05
23	-0,13945	-0,13902	4,30E-04	1,88E-03	0,23
24	-0,14364	-0,14309	5,51E-04	1,76E-03	0,31
25	-0,01745	-0,01710	3,57E-04	1,97E-03	0,18
26	0,01361	0,01399	3,73E-04	1,99E-03	0,19
27	-0,23475	-0,23429	4,60E-04	2,12E-03	0,22
28	-0,26320	-0,26263	5,68E-04	2,28E-03	0,25
29	-0,27890	-0,27875	1,57E-04	2,24E-03	0,07
30	-0,17715	-0,17710	4,66E-05	2,04E-03	0,02
31	-0,27611	-0,27632	2,06E-04	2,25E-03	0,09
32	-0,24452	-0,24415	3,66E-04	2,15E-03	0,17
33	-0,31643	-0,31639	4,17E-05	2,34E-03	0,02
34	-0,30264	-0,30231	3,27E-04	2,11E-03	0,15
35	-0,30980	-0,30949	3,02E-04	2,16E-03	0,14
36	-0,30980	-0,30949	3,07E-04	2,15E-03	0,14
37	-0,29426	-0,29425	1,40E-05	2,11E-03	0,01
38	-0,21101	-0,21069	3,23E-04	2,06E-03	0,16
39	-0,33982	-0,33969	1,21E-04	2,28E-03	0,05
40	-0,35081	-0,35100	1,91E-04	2,37E-03	0,08

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
41	-0,35256	-0,35237	1,89E-04	2,43E-03	0,08
42	-0,30840	-0,22607	8,23E-02	2,12E-03	38,75
43	-0,30561	-0,30544	1,71E-04	2,10E-03	0,08
44	-0,26564	-0,26560	4,15E-05	2,12E-03	0,02
45	-0,23492	-0,23550	5,81E-04	2,16E-03	0,27
46	-0,18710	-0,18746	3,62E-04	2,07E-03	0,17
47	-0,14975	-0,15058	8,32E-04	1,88E-03	0,44
48	-0,16162	-0,16063	9,92E-04	1,87E-03	0,53
49	-0,14416	-0,14499	8,25E-04	1,81E-03	0,46
50	-0,17663	-0,17721	5,84E-04	1,98E-03	0,29
51	-0,21799	-0,17438	4,36E-02	2,43E-03	17,98
52	-0,23335	-0,18948	4,39E-02	2,40E-03	18,28
53	-0,24696	-0,20184	4,51E-02	2,29E-03	19,73
54	-0,22846	-0,18402	4,44E-02	2,13E-03	20,86
55	-0,23579	-0,19075	4,50E-02	2,14E-03	21,03
56	-0,23143	-0,18678	4,47E-02	2,13E-03	20,93
57	-0,21485	-0,21413	7,22E-04	2,52E-03	0,29
58	-0,22899	-0,18472	4,43E-02	2,36E-03	18,78
59	-0,18169	-0,16261	1,91E-02	2,24E-03	8,52
60	-0,12130	-0,10254	1,88E-02	2,25E-03	8,33
61	-0,10577	-0,08714	1,86E-02	2,24E-03	8,32
62	-0,11851	-0,10006	1,85E-02	2,27E-03	8,13
63	-0,12601	-0,10730	1,87E-02	2,23E-03	8,40
64	-0,09704	-0,07856	1,85E-02	2,23E-03	8,30
65	-0,04451	-0,02637	1,81E-02	2,24E-03	8,09
66	-0,05760	-0,10113	4,35E-02	1,82E-03	23,89
67	-0,09931	-0,11523	1,59E-02	2,01E-03	7,91
68	-0,04573	-0,04585	1,27E-04	3,38E-04	0,38
69	0,00000	-	-	-	-
70	-0,12409	-0,12399	1,03E-04	9,94E-04	0,10
71	-0,13073	-0,13091	1,87E-04	1,04E-03	0,18
72	-0,14696	-0,14780	8,48E-04	1,82E-03	0,47
73	-0,13439	-0,13460	2,07E-04	1,11E-03	0,19
74	-0,14102	-0,14160	5,78E-04	9,51E-04	0,61
75	-0,11921	-0,11944	2,36E-04	7,27E-04	0,33
76	-0,13718	-0,13699	1,93E-04	1,07E-03	0,18
77	-0,05079	-0,05120	4,07E-04	6,18E-04	0,66
78	-0,05742	-0,05793	5,07E-04	6,23E-04	0,81
79	-0,05515	-0,05465	5,07E-04	5,67E-04	0,89
80	-0,02409	-0,02402	7,05E-05	4,73E-04	0,15
81	-0,03718	-0,03740	2,24E-04	3,81E-04	0,59
82	-0,05236	-0,05208	2,75E-04	7,56E-04	0,36
83	-0,03595	-0,03650	5,48E-04	1,02E-03	0,54

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
84	0,00140	0,00122	1,73E-04	1,32E-03	0,13
85	0,02513	0,02495	1,85E-04	1,43E-03	0,13
86	0,00175	0,00160	1,41E-04	1,93E-03	0,07
87	0,00663	0,00661	2,68E-05	2,43E-03	0,01
88	0,07330	0,07253	7,70E-04	1,78E-03	0,43
89	0,13963	0,12391	1,57E-02	1,31E-03	11,95
90	0,06039	0,06010	2,86E-04	2,03E-03	0,14
91	0,06458	0,06435	2,31E-04	1,83E-03	0,13
92	0,07749	0,07690	5,95E-04	1,25E-03	0,48
93	0,02112	0,02085	2,68E-04	1,05E-03	0,26
94	-0,01990	-0,01970	2,01E-04	8,75E-04	0,23
95	-0,03892	-0,03846	4,62E-04	8,55E-04	0,54
96	-0,04451	-0,04412	3,83E-04	8,18E-04	0,47
97	-0,04032	-0,04010	2,16E-04	6,75E-04	0,32
98	-0,04747	-0,04651	9,66E-04	1,03E-03	0,93
99	-0,05027	-0,04999	2,72E-04	1,16E-03	0,23
100	-0,03002	-0,03018	1,63E-04	9,91E-04	0,16
101	0,00052	0,00068	1,53E-04	1,36E-03	0,11
102	0,05009	0,04981	2,79E-04	1,23E-03	0,23
103	-0,09372	-0,09342	3,03E-04	1,14E-03	0,27
104	-0,14399	-0,14516	1,17E-03	1,30E-03	0,90
105	-0,16301	-0,16426	1,25E-03	1,40E-03	0,89
106	-0,16581	-0,16692	1,11E-03	1,39E-03	0,80
107	-0,21049	-0,21195	1,47E-03	2,05E-03	0,71
108	-0,18134	-0,18217	8,31E-04	1,48E-03	0,56
109	-0,18832	-0,18903	7,07E-04	1,51E-03	0,47
110	-0,20089	-0,20099	1,02E-04	1,58E-03	0,06
111	-0,17226	-0,17334	1,08E-03	1,93E-03	0,56
112	-0,25499	-0,25493	5,90E-05	1,87E-03	0,03
113	-0,26721	-0,26761	3,99E-04	2,11E-03	0,19
114	-0,25028	-0,24959	6,89E-04	2,19E-03	0,31
115	-0,25028	-0,24965	6,33E-04	2,20E-03	0,29
116	-0,05341	-0,05340	5,72E-06	3,44E-04	0,02
117	-0,29164	-0,31709	2,54E-02	2,42E-03	10,50
118	-0,13561	-0,13556	5,70E-05	8,89E-04	0,06

Na Tabela 5.36 é apresentado um resumo dos dados relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 118C1.

Tabela 5.36 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 118C1.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,3	118C1	3,22E-02	2,63E-03	8,23E-02	5,59E-03

Verificando os dados obtidos após a simulação efetuada do estimador para a configuração 118C1, é possível afirmar que na generalidade existiu um bom comportamento do estimador obtendo valores próximos em quase todos os barramentos.

Embora se constatem valores aceitáveis para os erros médios, é evidente uma depreciação acentuada em alguns barramentos tanto para os módulos das tensões como para os ângulos de fase. Isto faz com que não se possam aceitar os valores obtidos como precisos, situados nos barramentos 42, 48, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 66, 67, 79 e 117 para os módulos das tensões, e nos barramentos 42, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 89 e 117 para os ângulos de fase, conforme evidenciado estatisticamente nas tabelas 5.34 e 5.35.

Examinando os erros obtidos, constata-se que os mesmos ocorrem em zonas onde na configuração de medidas utilizada, existe uma menor ocorrência de medidas nos barramentos em causa. Posto isto, a influência da localização e uma reduzida quantidade de medidas utilizadas, repercutiu-se numa depreciação da qualidade da estimativa nos barramentos com menor índice de medidas correspondentes, seja de tensão seja de potências injetadas nesses barramentos.

Para uma melhor análise dos resultados obtidos apresentam-se nas Figuras 5.27 e 5.28 as comparações entre o vetor de estado estimado, recorrendo à configuração de medida 18C1, e os valores considerados “reais”.

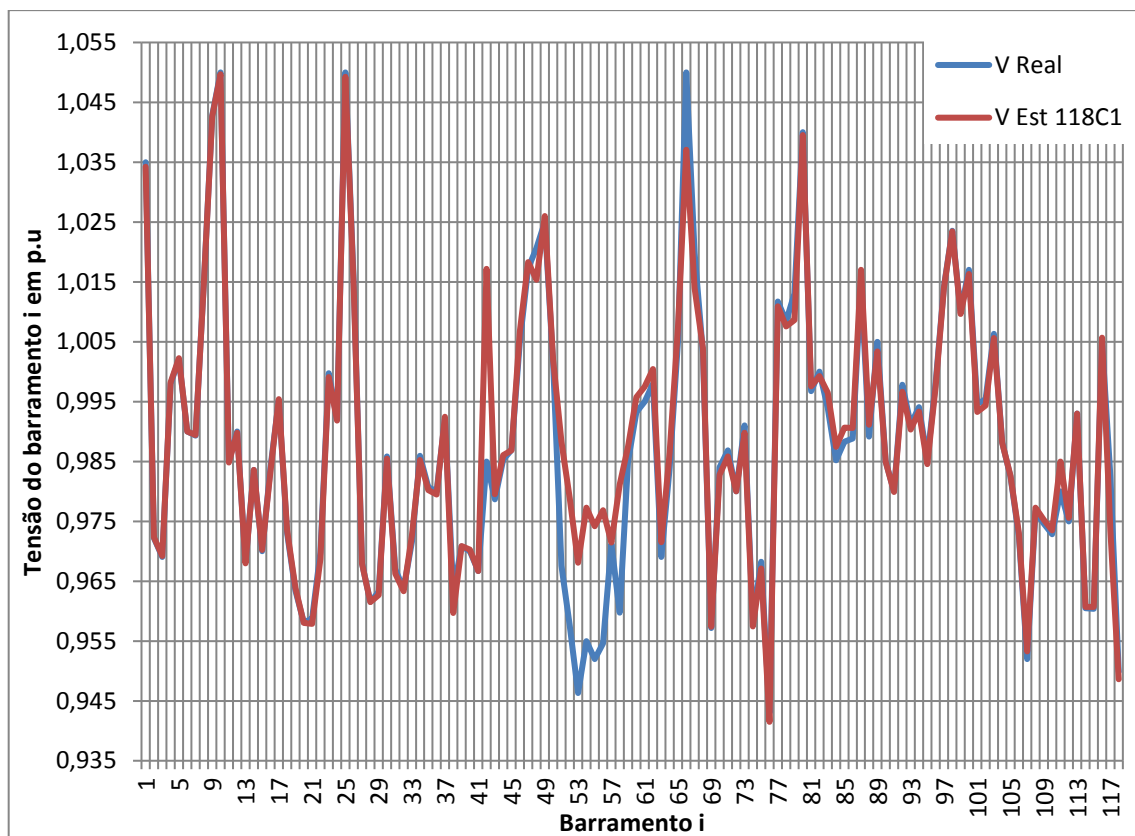


Figura 5.27 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C1.

Conforme explicitado anteriormente, é possível verificar na figura 5.27 os desvios verificados nas amplitudes de Tensão estimadas em alguns barramentos ido de encontro com as avaliações estatísticas apresentadas na tabela 5.34 e com a análise efetuada anteriormente.

Desta forma, e como se depreende graficamente, a estimativa obtida para os módulos das tensões apresenta resultados muito próximos na grande maioria dos barramentos, mas face aos desvios evidenciados (supra referidos), não se considera fiável a estimativa, uma vez que o objetivo do estimador é apresentar valores estimados com elevado grau de confiança em todos os barramentos, e não somente em alguns.

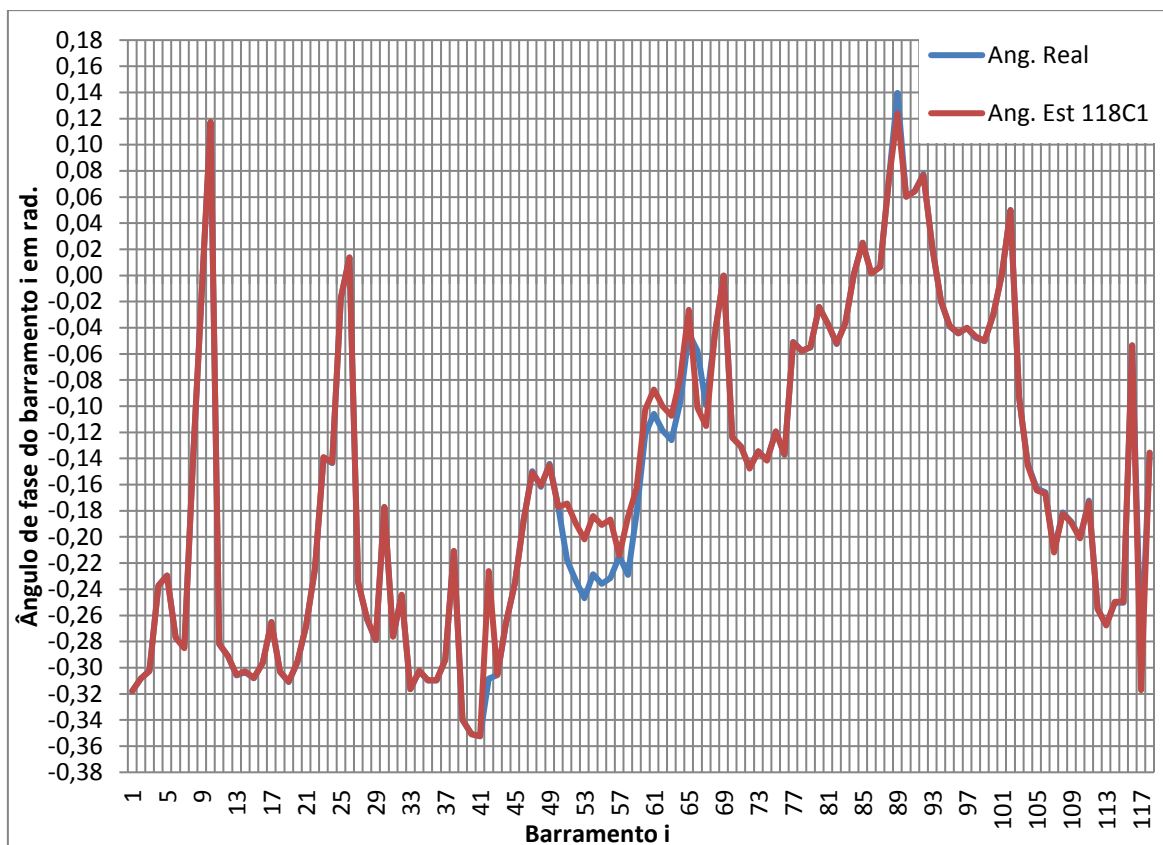


Figura 5.28 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C1.

Além do referido e constatado anteriormente, é possível também vislumbrar a depreciação evidenciada em determinados barramentos relativamente aos ângulos de fase aquando da utilização da configuração de medidas 118C1.

Assim, globalmente pode-se verificar que o algoritmo estimou resultados bastante próximos na quase totalidade dos 118 barramentos tanto em módulo como em fase (com valores bastante confiáveis), mas após uma avaliação rigorosa do controlo estatístico e dos erros de medida, não se pode considerar o resultado da estimativa como válido.

CONFIGURAÇÃO 118C2 (Redundância de 2,7)

Após a simulação anterior, e verificando-se que na configuração utilizada não se obteve uma estimativa totalmente confiável, seguidamente analisou-se o comportamento do algoritmo aplicado recorrendo a uma configuração de medida com redundância superior, avaliando se a presente alteração proporciona uma melhoria nos resultados obtidos.

A segunda simulação para a rede de 118 barramentos respeita a configuração de medida 118C2 e pode ser verificada em pormenor na tabela 5.37 e nos dados seguintes:

Tabela 5.37 – Configurações de medida 118C2 (rede de 118 barramentos)

Configuração de Medida	V_i	P_i	Q_i	P_{ij}	Q_{ij}	Total de Medidas	Redundância
118C2	114	100	95	164	163	636	2.7

De acordo com a configuração de medidas constante na Tabela 5.37, o segundo teste à rede de 118 barramentos corresponde à configuração 118C2, do qual fazem parte as seguintes medidas:

- Amplitude de tensão nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118;
- Injeção de Potencia ativa nos barramentos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 63, 64, 68, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 78, 81, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118;

- Injeção de Potencia reativa nos barramentos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 47, 49, 50, 52, 53, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 78, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 91, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 114, 115, 116, 117, 118;

- Trânsito de Potência ativa nas linhas 1-2, 1-3, 2-12, 3-5, 3-12, 4-5, 4-11, 5-6, 8-5, 5-11, 6-7, 7-12, 8-9, 8-30, 9-10, 11-12, 11-13, 12-14, 12-16, 12-117, 13-15, 14-15, 15-17, 15-19, 15-33, 16-17, 17-18, 30-17, 17-31, 17-113, 18-19, 19-20, 19-34, 20-21, 21-22, 22-23, 23-24, 23-25, 23-32, 24-70, 24-72, 26-25, 25-27, 26-30, 27-28, 27-32, 27-115, 28-29, 29-31, 30-38, 31-32, 32-113, 32-114, 33-37, 34-36, 34-37, 34-43, 35-36, 35-37, 38-37, 37-39, 37-40, 38-65, 39-40, 40-41, 40-42, 41-42, 43-44, 44-45, 45-46, 45-49, 46-47, 46-48, 47-49, 47-69, 48-49, 49-54, 49-54, 49-54, 49-69, 51-52, 51-58, 52-53, 53-54, 56-58, 56-59, 56-59, 56-59, 59-60, 59-61, 63-59, 60-61, 60-62, 61-62, 64-61, 62-67, 63-64, 64-65, 65-68, 68-69, 69-70, 69-75, 70-71, 70-74, 70-75, 71-72, 71-73, 74-75, 75-77, 75-118, 76-77, 76-118, 77-78, 77-80, 77-80, 78-79, 81-80, 80-96, 80-97, 80-98, 80-99, 82-83, 83-84, 83-85, 84-85, 85-86, 85-88, 85-89, 86-87, 88-89, 89-90, 89-90, 89-92, 89-92, 92-93, 92-94, 92-100, 92-102, 93-94, 94-95, 94-96, 94-100, 95-96, 96-97, 98-100, 99-100, 100-101, 100-103, 100-104, 100-106, 101-102, 103-104, 103-105, 103-110, 104-105, 105-106, 105-107, 105-108, 106-107, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112, 114-115;

- Trânsito de Potência reativa nas linhas 1-2, 1-3, 2-12, 3-5, 3-12, 4-5, 4-11, 5-6, 5-11, 6-7, 7-12, 8-9, 8-30, 9-10, 11-12, 11-13, 12-14, 12-16, 12-117, 13-15, 14-15, 15-17, 15-19, 15-33, 16-17, 17-18, 17-31, 17-113, 18-19, 19-20, 19-34, 20-21, 21-22, 22-23, 23-24, 23-25, 23-32, 24-70, 24-72, 25-27, 26-30, 27-28, 27-32, 27-115, 28-29, 29-31, 30-38, 31-32, 32-113, 32-114, 33-37, 34-36, 34-43, 35-36, 35-37, 37-39, 37-40, 38-65, 39-40, 40-41, 40-42, 41-42, 42-49, 42-49, 42-49, 43-44, 44-45, 45-46, 45-49, 46-47, 46-48, 47-49, 47-69, 48-49, 49-50, 49-66, 49-66, 49-66, 49-69, 50-57, 51-52, 51-58, 52-53, 53-54, 54-55, 55-56, 56-58, 59-60, 59-61, 60-61, 60-62, 61-62, 62-66, 62-67, 63-64, 64-65, 65-68, 68-81, 68-116, 69-70, 69-75, 69-77, 70-71, 70-74, 70-75, 71-72,

71-73, 74-75, 75-77, 75-118, 76-77, 76-118, 77-78, 77-80, 77-80, 77-82, 78-79, 82-83, 82-96, 84-85, 85-86, 85-88, 85-89, 86-87, 88-89, 89-90, 89-90, 89-90, 89-92, 89-92, 89-92, 91-90, 91-92, 92-93, 92-94, 92-100, 92-102, 93-94, 94-95, 94-96, 94-100, 95-96, 96-97, 98-100, 99-100, 100-101, 100-103, 100-104, 100-106, 101-102, 103-104, 103-105, 103-110, 104-105, 105-106, 105-107, 105-108, 106-107, 108-109, 109-110, 110-111, 110-112, 114-115.

De forma semelhante ao efetuado na simulação anterior, são apresentados nas tabelas 5.38 e 5.39, os resultados obtidos pelo algoritmo implementado para a rede IEEE de 118 barramentos com recurso à configuração de medidas descrita anteriormente. Nas tabelas encontram-se os resultados “reais” para as medidas de Tensão e para os Ângulos de fase bem como os valores estimados para as respetivas variáveis de estado.

Tabela 5.38 – Amplitudes das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C2.

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	1,03500	1,03592	9,20E-04	8,85E-04	1,04
2	0,97222	0,97379	1,57E-03	1,36E-03	1,16
3	0,96902	0,97097	1,95E-03	1,39E-03	1,40
4	0,99800	0,99937	1,37E-03	1,05E-03	1,30
5	1,00207	1,00331	1,24E-03	1,06E-03	1,17
6	0,99000	0,99129	1,29E-03	1,09E-03	1,19
7	0,98932	0,99054	1,22E-03	1,06E-03	1,15
8	1,01500	1,01629	1,29E-03	9,00E-04	1,43
9	1,04278	1,04407	1,29E-03	1,18E-03	1,09
10	1,05000	1,05098	9,75E-04	1,38E-03	0,71
11	0,98510	0,98631	1,21E-03	9,27E-04	1,30
12	0,99000	0,99110	1,10E-03	9,10E-04	1,20
13	0,96824	0,96941	1,17E-03	1,56E-03	0,75
14	0,98359	0,98450	9,09E-04	1,46E-03	0,62
15	0,97000	0,97115	1,15E-03	9,95E-04	1,15
16	0,98395	0,98483	8,85E-04	1,53E-03	0,58

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
17	0,99524	0,99612	8,79E-04	9,05E-04	0,97
18	0,97300	0,97399	9,90E-04	1,20E-03	0,83
19	0,96342	0,96442	1,00E-03	1,10E-03	0,91
20	0,95814	0,95912	9,80E-04	1,72E-03	0,57
21	0,95874	0,95969	9,49E-04	1,82E-03	0,52
22	0,96979	0,97080	1,01E-03	1,87E-03	0,54
23	0,99974	1,00113	1,39E-03	1,23E-03	1,12
24	0,99200	0,99346	1,46E-03	1,49E-03	0,98
25	1,05000	1,05138	1,38E-03	1,29E-03	1,07
26	1,01500	1,01636	1,36E-03	1,32E-03	1,04
27	0,96800	0,96904	1,04E-03	1,30E-03	0,80
28	0,96158	0,96264	1,06E-03	1,60E-03	0,66
29	0,96320	0,96374	5,45E-04	1,58E-03	0,34
30	0,98586	0,98701	1,15E-03	7,91E-04	1,46
31	0,96700	0,96695	5,26E-05	1,66E-03	0,03
32	0,96368	0,96445	7,73E-04	1,17E-03	0,66
33	0,97162	0,97300	1,38E-03	1,75E-03	0,79
34	0,98593	0,98613	2,03E-04	1,16E-03	0,17
35	0,98070	0,98146	7,64E-04	1,28E-03	0,60
36	0,98000	0,98063	6,32E-04	1,26E-03	0,50
37	0,99211	0,99317	1,06E-03	1,23E-03	0,86
38	0,96329	0,96444	1,15E-03	8,96E-04	1,28
39	0,97082	0,97229	1,47E-03	1,50E-03	0,98
40	0,97000	0,97132	1,32E-03	1,40E-03	0,94
41	0,96667	0,96790	1,23E-03	1,63E-03	0,75
42	0,98500	0,98543	4,31E-04	1,81E-03	0,24
43	0,97869	0,97998	1,29E-03	2,18E-03	0,59
44	0,98531	0,98669	1,38E-03	2,31E-03	0,60
45	0,98689	0,98801	1,12E-03	2,12E-03	0,53
46	1,00500	1,00598	9,84E-04	2,15E-03	0,46
47	1,01729	1,01721	8,13E-05	1,38E-03	0,06
48	1,02063	1,02036	2,71E-04	1,75E-03	0,15
49	1,02500	1,02345	1,55E-03	1,05E-03	1,48
50	1,00148	1,00204	5,64E-04	1,62E-03	0,35
51	0,96759	0,96898	1,39E-03	1,87E-03	0,74
52	0,95755	0,95900	1,45E-03	1,80E-03	0,81
53	0,94634	0,94794	1,60E-03	1,92E-03	0,84
54	0,95500	0,95645	1,45E-03	1,64E-03	0,89
55	0,95200	0,95288	8,77E-04	1,39E-03	0,63
56	0,95459	0,95535	7,60E-04	1,37E-03	0,56
57	0,97124	0,97300	1,76E-03	1,84E-03	0,96
58	0,95972	0,96076	1,04E-03	1,59E-03	0,65
59	0,98500	0,98666	1,66E-03	1,66E-03	0,99

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
60	0,99322	0,99461	1,39E-03	1,14E-03	1,22
61	0,99500	0,99640	1,40E-03	1,09E-03	1,29
62	0,99800	0,99891	9,07E-04	1,17E-03	0,78
63	0,96905	0,97065	1,60E-03	1,11E-03	1,45
64	0,98389	0,98532	1,43E-03	9,97E-04	1,43
65	1,00500	1,00592	9,20E-04	1,11E-03	0,83
66	1,05000	1,04803	1,97E-03	3,16E-03	0,62
67	1,01985	1,01962	2,32E-04	1,74E-03	0,13
68	1,00319	1,00404	8,50E-04	1,04E-03	0,82
69	0,95717	0,95940	2,23E-03	1,55E-03	1,44
70	0,98400	0,98501	1,01E-03	1,20E-03	0,84
71	0,98685	0,98775	8,96E-04	1,37E-03	0,65
72	0,98000	0,98059	5,85E-04	2,10E-03	0,28
73	0,99100	0,99171	7,08E-04	1,69E-03	0,42
74	0,95857	0,95966	1,09E-03	1,72E-03	0,64
75	0,96822	0,96947	1,25E-03	1,28E-03	0,97
76	0,94300	0,94464	1,64E-03	1,75E-03	0,93
77	1,01173	1,01431	2,58E-03	1,21E-03	2,13
78	1,00844	1,01091	2,47E-03	1,22E-03	2,02
79	1,01307	1,01505	1,98E-03	1,37E-03	1,44
80	1,04000	1,03648	3,52E-03	1,28E-03	2,75
81	0,99674	0,99734	5,98E-04	1,25E-03	0,48
82	1,00000	0,99932	6,84E-04	1,51E-03	0,45
83	0,99390	0,99221	1,69E-03	1,39E-03	1,21
84	0,98522	0,98679	1,57E-03	1,63E-03	0,96
85	0,98832	0,98948	1,16E-03	1,24E-03	0,94
86	0,98883	0,99077	1,94E-03	2,00E-03	0,97
87	1,01500	1,01556	5,59E-04	2,68E-03	0,21
88	0,98914	0,99005	9,06E-04	1,42E-03	0,64
89	1,00500	1,00446	5,41E-04	1,22E-03	0,44
90	0,98500	0,98065	4,35E-03	1,48E-03	2,94
91	0,98000	0,98372	3,72E-03	1,67E-03	2,23
92	0,99781	0,99680	1,01E-03	1,21E-03	0,83
93	0,99121	0,99163	4,24E-04	1,33E-03	0,32
94	0,99408	0,99463	5,45E-04	9,66E-04	0,56
95	0,98534	0,98595	6,06E-04	1,20E-03	0,51
96	0,99816	0,99748	6,79E-04	1,03E-03	0,66
97	1,01423	1,01137	2,86E-03	1,47E-03	1,94
98	1,02353	1,02095	2,58E-03	1,82E-03	1,42
99	1,01000	1,01038	3,84E-04	1,62E-03	0,24
100	1,01700	1,01749	4,90E-04	8,87E-04	0,55
101	0,99468	0,99442	2,64E-04	1,68E-03	0,16
102	0,99538	0,99440	9,79E-04	1,38E-03	0,71

Barramento i	$ V_i _{real}$	$ V_i _{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
103	1,00632	1,00749	1,17E-03	1,12E-03	1,05
104	0,98821	0,99037	2,16E-03	1,31E-03	1,64
105	0,98239	0,98445	2,06E-03	1,37E-03	1,51
106	0,97260	0,97415	1,55E-03	1,44E-03	1,08
107	0,95200	0,95126	7,43E-04	2,18E-03	0,34
108	0,97666	0,97877	2,11E-03	1,39E-03	1,52
109	0,97459	0,97637	1,78E-03	1,42E-03	1,26
110	0,97286	0,97276	1,04E-04	1,38E-03	0,08
111	0,98000	0,98016	1,57E-04	1,96E-03	0,08
112	0,97500	0,97509	8,83E-05	1,90E-03	0,05
113	0,99300	0,99325	2,49E-04	1,39E-03	0,18
114	0,96049	0,96112	6,33E-04	1,59E-03	0,40
115	0,96037	0,96098	6,07E-04	1,61E-03	0,38
116	1,00500	1,00575	7,47E-04	1,05E-03	0,71
117	0,98241	0,97421	8,20E-03	3,42E-03	2,40
118	0,94992	0,95113	1,21E-03	1,64E-03	0,74

Tabela 5.39 – Ângulos de fase das tensões para a rede IEEE de 118 barramentos com o valor real, estimado e erro associado. Configuração de medida utilizada 118C2.

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
1	-0,31800	-0,31439	3,61E-03	4,09E-03	0,88
2	-0,30823	-0,30505	3,18E-03	3,92E-03	0,81
3	-0,30229	-0,29892	3,37E-03	3,96E-03	0,85
4	-0,23719	-0,23416	3,03E-03	3,58E-03	0,84
5	-0,22951	-0,22645	3,06E-03	3,57E-03	0,86
6	-0,27698	-0,27403	2,95E-03	3,71E-03	0,80
7	-0,28466	-0,28183	2,84E-03	3,72E-03	0,76
8	-0,14190	-0,13916	2,73E-03	3,46E-03	0,79
9	-0,01518	-0,01281	2,38E-03	3,60E-03	0,66
10	0,11711	0,11921	2,09E-03	3,75E-03	0,56
11	-0,28187	-0,27905	2,82E-03	3,65E-03	0,77
12	-0,29095	-0,28812	2,83E-03	3,67E-03	0,77
13	-0,30578	-0,30313	2,65E-03	3,91E-03	0,68
14	-0,30334	-0,30074	2,60E-03	3,84E-03	0,68
15	-0,30805	-0,30586	2,19E-03	3,34E-03	0,66
16	-0,29636	-0,29384	2,52E-03	3,85E-03	0,65

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
17	-0,26512	-0,26318	1,93E-03	3,28E-03	0,59
18	-0,30316	-0,30104	2,12E-03	3,42E-03	0,62
19	-0,31102	-0,30892	2,10E-03	3,39E-03	0,62
20	-0,29618	-0,29392	2,26E-03	4,28E-03	0,53
21	-0,26878	-0,26656	2,22E-03	4,60E-03	0,48
22	-0,22462	-0,22236	2,27E-03	4,50E-03	0,50
23	-0,13945	-0,13722	2,23E-03	3,54E-03	0,63
24	-0,14364	-0,14147	2,17E-03	3,48E-03	0,62
25	-0,01745	-0,01535	2,10E-03	3,57E-03	0,59
26	0,01361	0,01579	2,17E-03	3,52E-03	0,62
27	-0,23475	-0,23329	1,46E-03	4,00E-03	0,36
28	-0,26320	-0,26233	8,67E-04	4,32E-03	0,20
29	-0,27890	-0,27897	6,54E-05	4,23E-03	0,02
30	-0,17715	-0,17497	2,18E-03	3,09E-03	0,71
31	-0,27611	-0,27701	9,03E-04	4,07E-03	0,22
32	-0,24452	-0,24339	1,13E-03	3,84E-03	0,29
33	-0,31643	-0,31451	1,92E-03	3,62E-03	0,53
34	-0,30264	-0,30095	1,69E-03	2,94E-03	0,58
35	-0,30980	-0,30835	1,45E-03	3,05E-03	0,47
36	-0,30980	-0,30830	1,49E-03	3,04E-03	0,49
37	-0,29426	-0,29290	1,37E-03	2,91E-03	0,47
38	-0,21101	-0,20952	1,49E-03	2,59E-03	0,57
39	-0,33982	-0,33994	1,29E-04	3,65E-03	0,04
40	-0,35081	-0,35177	9,61E-04	3,84E-03	0,25
41	-0,35256	-0,35420	1,64E-03	4,18E-03	0,39
42	-0,30840	-0,31225	3,85E-03	5,08E-03	0,76
43	-0,30561	-0,30533	2,77E-04	4,02E-03	0,07
44	-0,26564	-0,26756	1,92E-03	4,42E-03	0,44
45	-0,23492	-0,23798	3,06E-03	4,05E-03	0,76
46	-0,18710	-0,19091	3,81E-03	3,78E-03	1,01
47	-0,14975	-0,15383	4,08E-03	3,18E-03	1,28
48	-0,16162	-0,16653	4,91E-03	3,53E-03	1,39
49	-0,14416	-0,14928	5,11E-03	3,36E-03	1,52
50	-0,17663	-0,17254	4,09E-03	3,67E-03	1,12
51	-0,21799	-0,20522	1,28E-02	4,74E-03	2,70
52	-0,23335	-0,23914	5,79E-03	4,57E-03	1,27
53	-0,24696	-0,23510	1,19E-02	3,97E-03	2,99
54	-0,22846	-0,22341	5,05E-03	3,15E-03	1,60
55	-0,23579	-0,23000	5,79E-03	2,88E-03	2,01
56	-0,23143	-0,23811	6,68E-03	2,92E-03	2,29
57	-0,21485	-0,22120	6,35E-03	3,74E-03	1,70
58	-0,22899	-0,22221	6,77E-03	3,89E-03	1,74
59	-0,18169	-0,17990	1,79E-03	1,89E-03	0,95

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\sum_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\sum_x}}$
60	-0,12130	-0,12022	1,08E-03	1,65E-03	0,66
61	-0,10577	-0,10470	1,07E-03	1,59E-03	0,67
62	-0,11851	-0,11795	5,61E-04	1,94E-03	0,29
63	-0,12601	-0,12453	1,48E-03	1,51E-03	0,98
64	-0,09704	-0,09588	1,16E-03	1,36E-03	0,85
65	-0,04451	-0,04409	4,20E-04	1,10E-03	0,38
66	-0,05760	-0,05542	2,17E-03	1,16E-02	0,19
67	-0,09931	-0,09921	1,04E-04	4,04E-03	0,03
68	-0,04573	-0,04537	3,61E-04	9,17E-04	0,39
69	0,00000	-	-	-	-
70	-0,12409	-0,12241	1,69E-03	2,00E-03	0,84
71	-0,13073	-0,12915	1,57E-03	2,43E-03	0,65
72	-0,14696	-0,14553	1,43E-03	3,72E-03	0,38
73	-0,13439	-0,13301	1,38E-03	2,81E-03	0,49
74	-0,14102	-0,13814	2,89E-03	2,23E-03	1,29
75	-0,11921	-0,11631	2,90E-03	1,87E-03	1,55
76	-0,13718	-0,13272	4,46E-03	2,49E-03	1,80
77	-0,05079	-0,05386	3,07E-03	1,97E-03	1,55
78	-0,05742	-0,05655	8,74E-04	2,00E-03	0,44
79	-0,05515	-0,05846	3,31E-03	2,15E-03	1,54
80	-0,02409	-0,02500	9,19E-04	1,87E-03	0,49
81	-0,03718	-0,03729	1,15E-04	1,29E-03	0,09
82	-0,05236	-0,05893	6,57E-03	4,59E-03	1,43
83	-0,03595	-0,04305	7,10E-03	4,47E-03	1,59
84	0,00140	-0,00904	1,04E-02	4,55E-03	2,29
85	0,02513	0,01368	1,15E-02	4,34E-03	2,64
86	0,00175	-0,01029	1,20E-02	5,63E-03	2,14
87	0,00663	-0,00631	1,29E-02	7,74E-03	1,67
88	0,07330	0,06263	1,07E-02	4,25E-03	2,51
89	0,13963	0,12936	1,03E-02	4,16E-03	2,47
90	0,06039	0,05754	2,85E-03	4,42E-03	0,64
91	0,06458	0,06712	2,55E-03	4,53E-03	0,56
92	0,07749	0,07694	5,57E-04	4,10E-03	0,14
93	0,02112	0,01988	1,24E-03	3,72E-03	0,33
94	-0,01990	-0,02189	1,99E-03	3,28E-03	0,61
95	-0,03892	-0,04131	2,39E-03	3,26E-03	0,73
96	-0,04451	-0,04773	3,23E-03	3,09E-03	1,04
97	-0,04032	-0,04270	2,38E-03	2,56E-03	0,93
98	-0,04747	-0,04912	1,65E-03	2,71E-03	0,61
99	-0,05027	-0,05207	1,80E-03	3,25E-03	0,56
100	-0,03002	-0,03214	2,12E-03	3,29E-03	0,64
101	0,00052	-0,00106	1,58E-03	3,99E-03	0,40
102	0,05009	0,04917	9,24E-04	4,08E-03	0,23

Barramento i	$(\theta_i)_{real}$	$(\theta_i)_{estim}$	$ \delta_x $	$\sqrt{\Sigma_x}$	$\frac{ \delta_x }{\sqrt{\Sigma_x}}$
103	-0,09372	-0,09618	2,46E-03	3,70E-03	0,66
104	-0,14399	-0,14682	2,83E-03	4,14E-03	0,68
105	-0,16301	-0,16603	3,02E-03	4,25E-03	0,71
106	-0,16581	-0,16877	2,97E-03	4,34E-03	0,68
107	-0,21049	-0,21311	2,62E-03	5,21E-03	0,50
108	-0,18134	-0,18471	3,37E-03	4,61E-03	0,73
109	-0,18832	-0,19174	3,42E-03	4,69E-03	0,73
110	-0,20089	-0,20420	3,32E-03	4,80E-03	0,69
111	-0,17226	-0,17607	3,80E-03	5,34E-03	0,71
112	-0,25499	-0,25892	3,93E-03	5,25E-03	0,75
113	-0,26721	-0,26570	1,51E-03	3,50E-03	0,43
114	-0,25028	-0,24906	1,22E-03	4,22E-03	0,29
115	-0,25028	-0,24919	1,09E-03	4,23E-03	0,26
116	-0,05341	-0,05291	5,01E-04	9,50E-04	0,53
117	-0,29164	-0,29585	4,20E-03	5,00E-03	0,84
118	-0,13561	-0,13217	3,45E-03	2,33E-03	1,48

Apresentam-se seguidamente na tabela 5.40 os dados complementares relativos à análise de desempenho do estimador para a configuração de medida 118C2.

Tabela 5.40 – Resultados e avaliação estatística para a configuração de medida 118C2.

Redundância	Configuração de Medida	δ_{max}^V	δ_{med}^V	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,7	118C2	8,20E-03	1,25E-03	1,29E-02	3,07E-03

Após recolha e análise dos resultados decorrentes da simulação com a utilização da configuração de medida 118C2, é possível concluir pela verificação dos resultados apresentados nas tabelas 5.38 e 5.39, que o comportamento do estimador perante o conjunto de medidas utilizado é bom, uma vez que a solução obtida, para o vetor de estado estimado, na sua grande maioria caracterizam-se por $|\delta_x| \ll \sigma_{xii}$, e que nunca é ultrapassada a barreira de confiabilidade adotada dos resultados, definida por $\frac{|\delta_x|}{\sqrt{\Sigma_x}} < 3$.

Dos resultados obtidos é possível destacar o acoplamento existente entre $|V|$ e Q , uma vez que comparando com a simulação efetuada recorrendo à configuração 118C1,

existiu uma melhoria significativa no erro máximo e médio obtido na simulação 118C2. É possível afirmar que o acoplamento existente entre θ e P também se evidenciou, dada a redução do erro máximo e médio de medida obtido da configuração 118C1 para a 118C2. Importa realçar que na presente simulação, a redundância de medida foi preponderante nos resultados obtidos, sendo possível afirmar que nos casos em que existe um aumento da complexidade da rede em estudo e o conseqüente número de medidas disponíveis, é de todo importante uma boa definição da quantidade de medidas seleccionadas, bem como da sua localização e peso atribuído a cada uma, pois como foi verificado, uma definição do vetor de medidas disponíveis mesmo permitindo a convergência do algoritmo e retorno de uma estimativa (118C1), por si só, não é suficiente para a obtenção de resultados confiáveis na sua globalidade.

Para uma melhor análise dos resultados obtidos, apresentam-se nas Figuras 5.29 e 5.30 as comparações entre o vetor de estado estimado, recorrendo à configuração de medida 118C2, e os valores considerados “reais”.

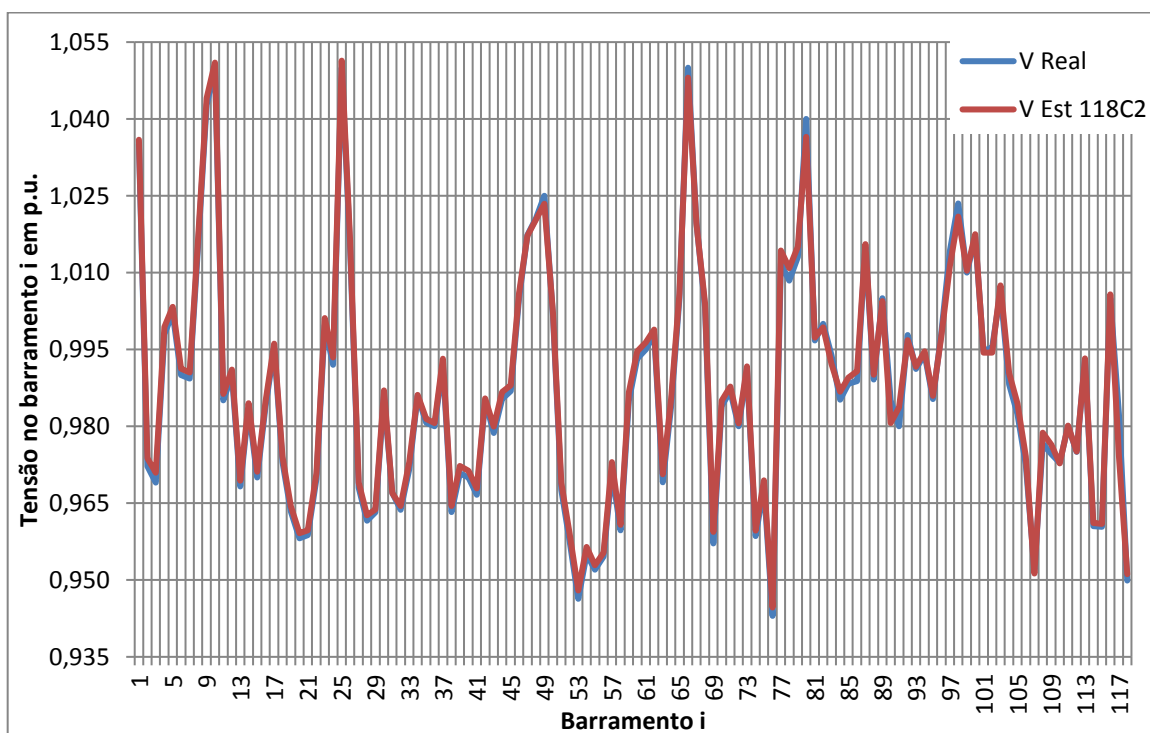


Figura 5.29 – Comparação dos valores relativos às amplitudes das tensões para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C2.

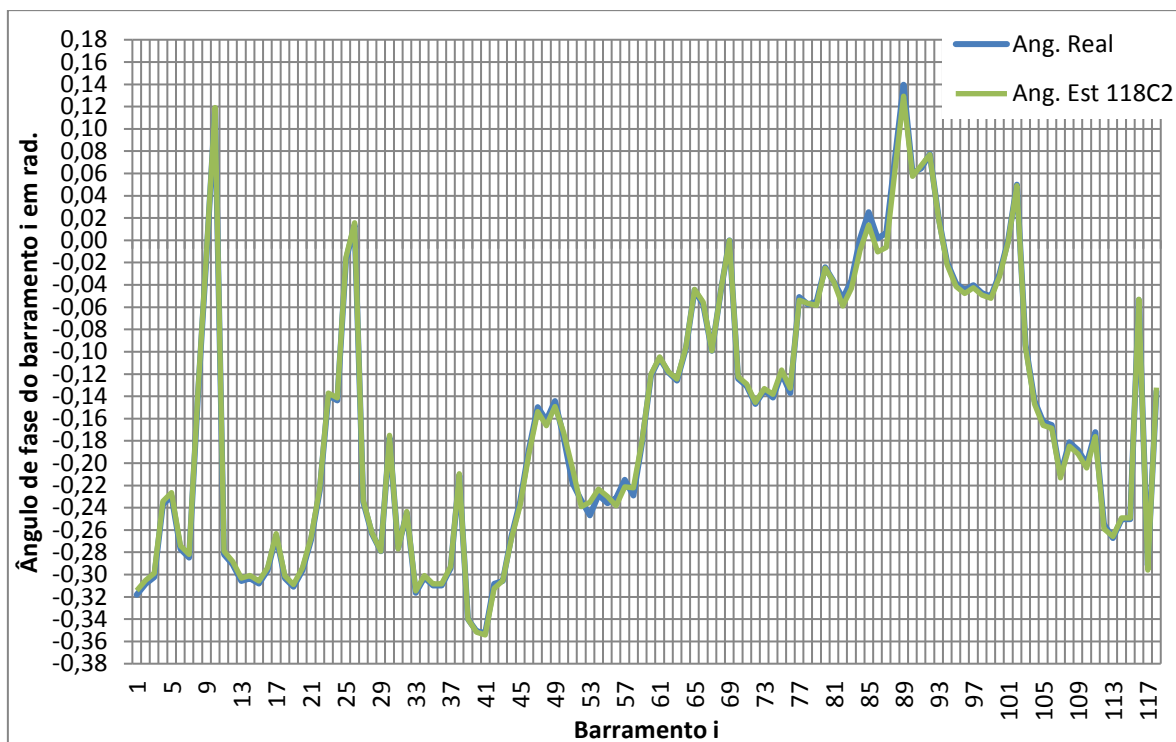


Figura 5.30 – Comparação dos valores relativos aos ângulos de fase para os valores considerados reais, e os recolhidos no teste efetuado para a configuração de medida 118C2.

Como é possível verificar graficamente, existe uma aproximação bastante boa dos valores estimados para os módulos das tensões como para os ângulos de fase. É notória também a melhoria significativa da estimativa nos barramentos em que na configuração 118C1 apresentaram desvios elevados, confirmado desta forma a qualidade da estimativa obtida pela configuração de medida 118C2.

Apresentados os resultados, é feito seguidamente um resumo dos dois casos avaliados, onde se apresentam as características de convergência dos mesmos e se faz uma exposição gráfica dos erros de medida.

Tendo por vista a avaliação da convergência do algoritmo implementado para as diferentes simulações, são apresentados na tabela 5.41 os valores de $J(x)$ ao longo das iterações até ser atingida a convergência do algoritmo.

Tabela 5.41 – Evolução de $J(x)$ para as configurações de medida 118C1 e 118C2.

Iteração k	Converge para $\varepsilon \leq 0.001$					
	1	2	3	4	5	6
Função Objetivo – 118C1	1,799E+6	1,093E+4	108,638	80,253	-	-
Função Objetivo – 118C2	1,999E+5	2,111E+3	118,229	79,550	71,015	68,889

É possível constatar após a análise da tabela 5.41, que como era de esperar, existiu uma diminuição ao longo das iterações do valor de $J(x)$, atestando que à medida que as iterações se vão sucedendo, a minimização dos resíduos também se verifica.

Verifica-se também que o algoritmo quando recorreu à configuração 118C1 convergiu em 4 iterações, sendo que quando utiliza a configuração 118C2 converge em 6 iterações. Apesar do algoritmo convergir em 4 iterações para a configuração de medida 118C1, o mesmo apresenta um resultado final de $J(\hat{x})$ superior ao da configuração 118C2. Isto pode ser explicado por um lado, por ser caracterizado com um número inferior de medidas iniciais, e por outro pela pior qualidade de estimativa evidenciada e já abordada anteriormente. Facto do algoritmo ter convergido em 6 iterações para a configuração 118C2 não é sinonimo de um pior processo de cálculo, e pode ser explicado por na configuração de medida respetiva, a mesma conter um número superior de medidas disponíveis, obrigando o estimador a um maior número de iterações para obedecer ao critério de convergência em todas medidas.

De forma a se conseguir comparar mais facilmente os resultados obtidos para as duas simulações, apresenta-se graficamente nas figuras 5.31 e 5.32 os componentes do vetor de estado estimado para as duas configurações estudadas, onde se comparam as mesmas com os respetivos “verdadeiros” valores (módulo e fase).

Nas próximas figuras é notório o desvio evidenciado para os valores estimados para a configuração 118C1 nos barramentos nos barramentos 42, 48, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 66, 67, 79 e 117 para os módulos das tensões, e nos barramentos 42, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 89 e 117 para os ângulos de fase. Simultaneamente, comprova-se por comparação, a melhoria evidencia na configuração 118C2 nesses mesmos barramentos.

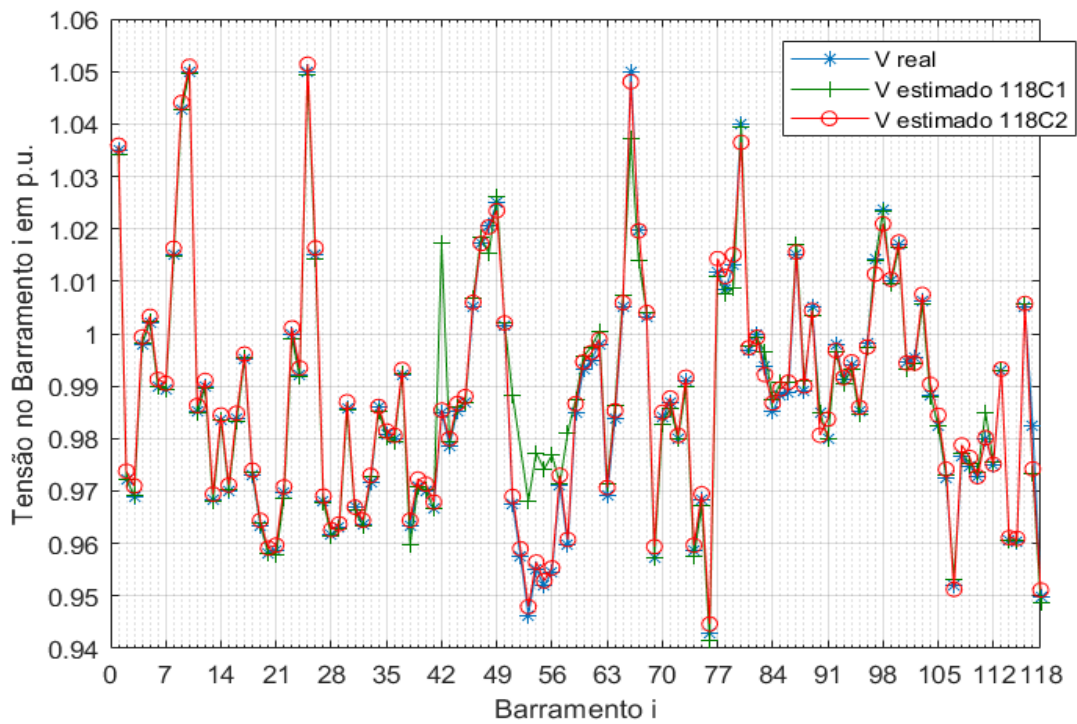


Figura 5.31 – Comparação dos módulos das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 (Real vs Estimado) – Rede IEEE 118 Barramentos.

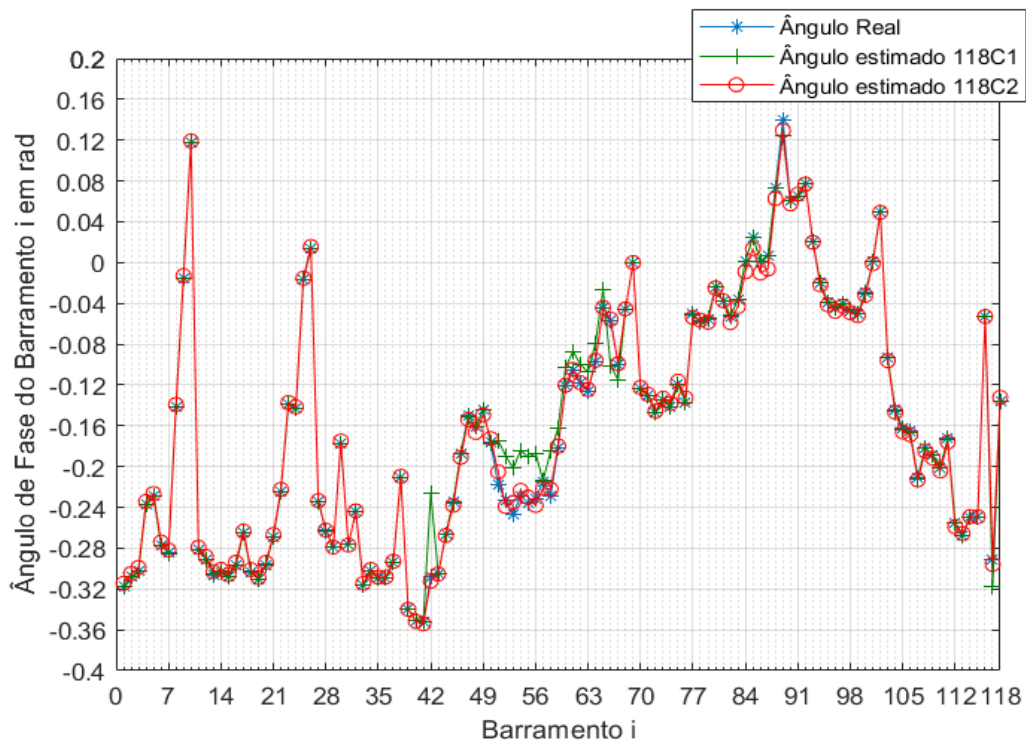


Figura 5.32 – Comparação dos ângulos de fase das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 (Real vs Estimado) – Rede IEEE 118 Barramentos.

Sendo a avaliação do comportamento do estimador efetuada por comparação dos erros de estimativa, caracterizado para cada componente do vetor de estado e para cada componente do vetor das medidas, apresenta-se nas figuras 5.33 e 5.34 o erro existente para cada variável de estado para as duas configurações de medida, permitindo assim uma análise mais pormenorizada dos erros associados a essas grandezas.

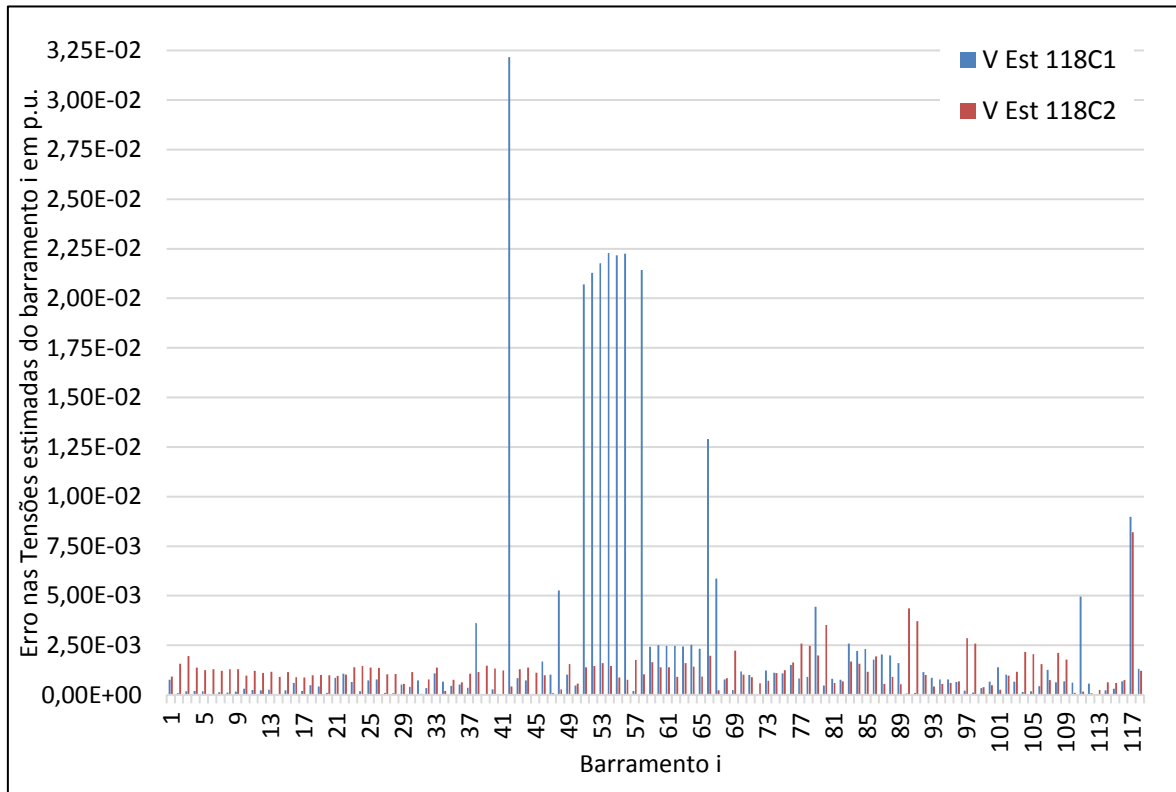


Figura 5.33 – Caracterização do erro nos módulos das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 – Rede IEEE 118 Barramentos.

Verificados os erros contantes na figura 5.33, é possível afirmar que a configuração 118C2 apresenta valores médios de erro praticamente constantes ao longo dos 118 barramentos, sendo evidenciado o problema de estimação na configuração 118C1 nos barramentos identificados com maior amplitude de erro. Também é visível que na configuração 118C1 em determinados barramentos, se obteve uma boa qualidade de estimativa, uma vez que os módulos dos erros são inferiores aos obtidos na configuração 118C2, sendo notório que o que originou o deslizamento da precisão, se deveu a uma deficiente seleção das medidas em número e localização.

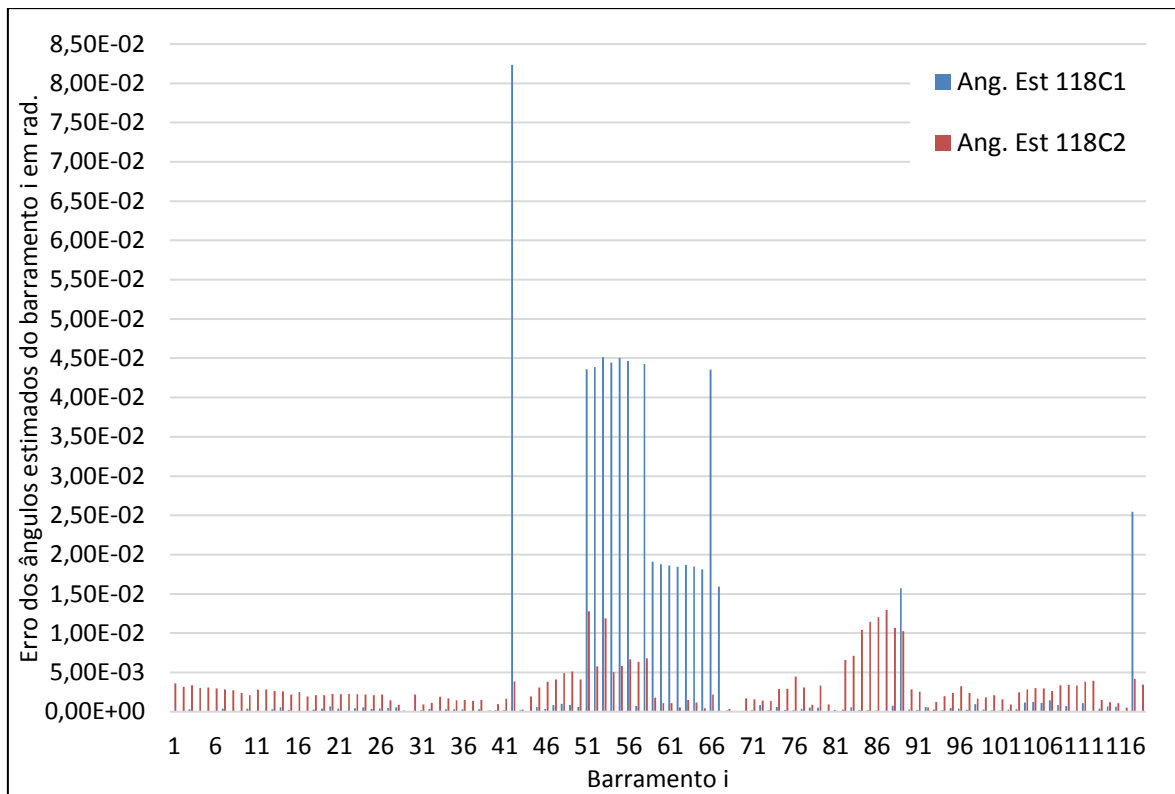


Figura 5.34 – Caracterização do erro nas fases das tensões para as configurações de medida 118C1 e 118C2 – Rede IEEE 118 Barramentos.

Conforme a análise anterior, a caracterização dos erros para os ângulos de fase, toma as mesmas características, ou seja, a configuração 118C2 apresenta valores médios de erro praticamente constantes ao longo dos 118 barramentos, com algumas oscilações entre os barramentos 51 a 60 bem como nos barramentos 82 a 89, sendo evidenciado o problema de estimação na configuração 118C1 nos barramentos identificados com maior amplitude de erro. Mais uma vez em comparação, é possível afirmar que a menor redundância de medida da configuração 118C1 prejudicou o resultado final obtido, dado que nos barramentos em que existiam medidas disponíveis ou medidas vizinhas, o estimador apresentou um excelente desempenho.

Foi novamente testado o acoplamento $Q - |V| / P - \theta$, sendo evidente a influência do maior número de medidas de potência ativas e reativas injetadas nas barramentos na configuração 118C2 obtendo um erro médio menor, tanto nos módulos das tensões como nos ângulos de fase.

Assim, é possível afirmar que a configuração 118C2 é que apresentou um melhor resultado global na estimativa obtida.

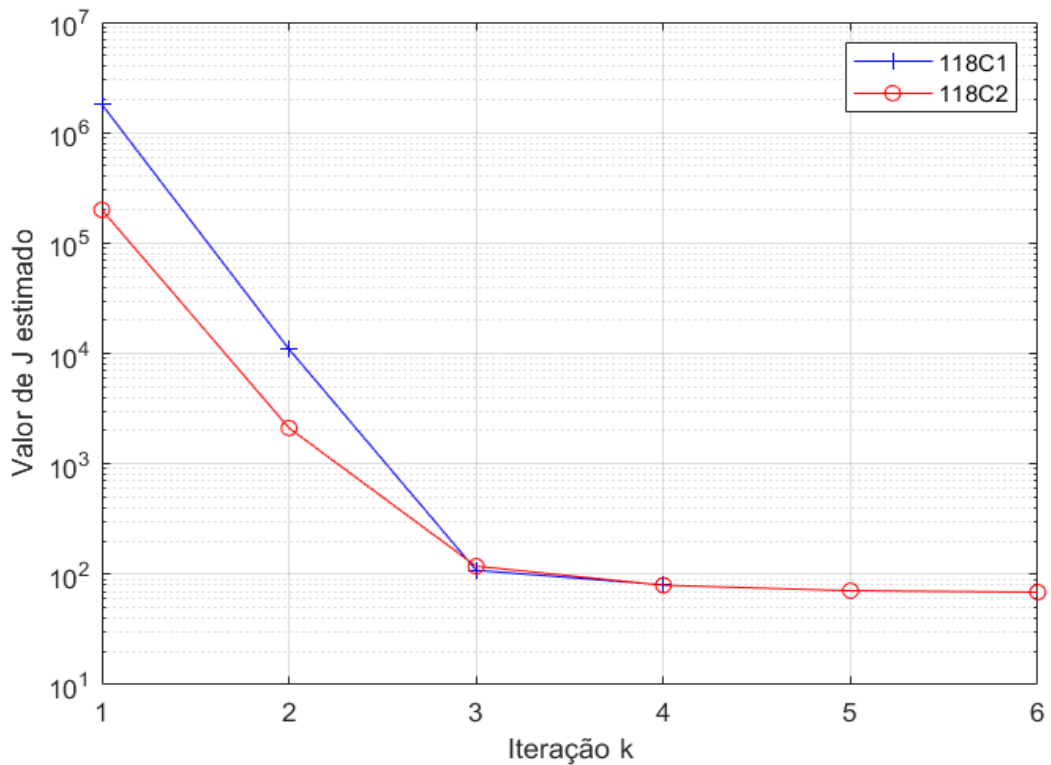


Figura 5.35 – Características de convergência dos testes 118C1 e 118C2 - Rede IEEE 118 Barramentos.

Como já afirmado ao longo da dissertação, o tipo, quantidade, a localização, e o peso das medidas disponíveis, influencia diretamente os resultados das estimativas obtidas. Nas presentes simulações foi comprovada essa mesma influência, verificando-se uma melhor qualidade de estimativa quando da disponibilização de uma quantidade adequada de medidas, a sua localização, os tipos escolhidos, bem como dos pesos atribuídos de acordo com o erro de medida esperado.

Na Figura 5.36 é apresentado o peso em porcentagem de cada tipo de medida no conjunto de medidas utilizadas, tendo em vista uma melhor clarificação do peso de cada uma nos resultados obtidos.

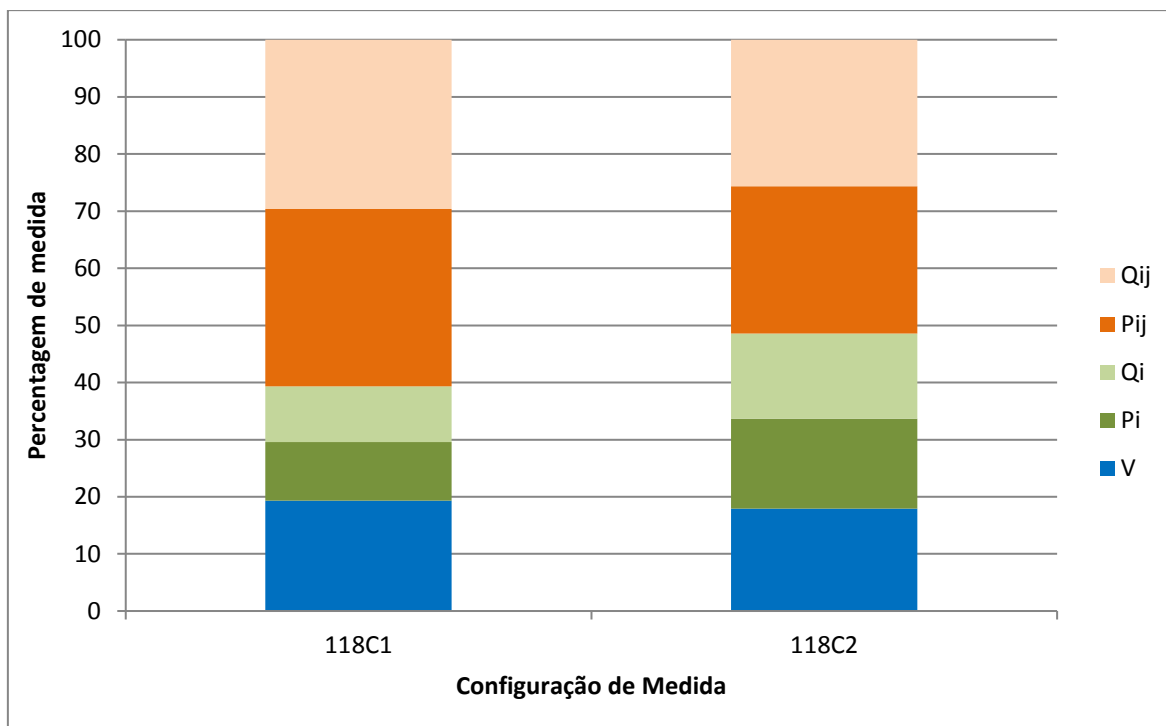


Figura 5.36 – Representação do peso de cada tipo de medida nas configurações testadas (118C1 e 118C2).

Após as análises anteriormente expostas, constata-se que o estimador apresentou um bom comportamento ao nível da convergência e dos resultados obtidos. Apesar de na configuração 118C1 se evidenciar à posteriori, uma configuração de medida inadequada para a totalidade dos 118 barramentos, o estimador utilizando as medidas disponíveis conseguiu convergir. Posteriormente, foi possível efetuar uma correção de forma a se obter uma estimativa com bons valores globais tanto para as tensões como para os ângulos de fase (Configuração 118C2).

O algoritmo na presença da configuração de medidas 118C2, apresentou bons resultados, sendo que na sua globalidade obteve erros bastante aceitáveis, não existindo nenhum valor estimado que mereça desconfiança. Posto isto, é a configuração que melhor traduz o desempenho dos testes realizados para a rede de IEEE de 118 barramentos.

5.5 - CONCLUSÃO

Neste capítulo, foi analisado o comportamento do algoritmo de estimação de estado baseado no método WLS, sendo efetuada uma descrição do método implementado e os pressupostos utilizados nas simulações.

Tendo em vista a validação prática do algoritmo desenvolvido, foram descritos no presente capítulo os testes realizados, e foram de uma forma detalhada, apresentados e analisados os resultados obtidos. Os testes computacionais efetuados, visaram verificar o comportamento do estimador, recorrendo a um conjunto redundante de medidas, quando aplicado a duas redes de teste. As redes utilizadas para os testes efetuados foram a rede de teste IEEE de 14 barramentos e a rede IEEE de 118 barramentos.

Foi abordada em maior pormenor a rede de 14 barramentos, sendo estudados seis casos. Com o objetivo de confirmar a funcionalidade do algoritmo de estimação de estado, foram efetuadas adicionalmente duas simulações à rede de 118 barramentos.

Dos resultados obtidos, é possível afirmar que os testes efetuados apresentaram uma boa concordância entres os erros de estimação e os respetivos desvios de padrão. Para a rede de 14 barramentos dos seis testes implementados, pode-se destacar o teste que recorreu à configuração de medida 14C2C, que obteve a melhor relação global entre os valores considerados “Verdadeiros” e os respetivos valores estimados. Pode-se afirmar também que nos resultados das estimativas obtidos, existiu uma precisão maior para os Módulos das tensões, sendo menores para os ângulos de fase.

Relativamente à rede de 118 barramentos, após a obtenção do vetor de estado estimado para a configuração 118C1 e analisados os resultados, concluiu-se que a configuração de medida não era suficientemente completa que permitisse uma boa estimativa na globalidade do sistema, apresentando resultados concordantes em grande parte dos barramentos, mas evidenciando erros de medida exagerados num elevado número de barramentos.

Utilizando a configuração 118C2, o algoritmo obteve uma estimativa coerente e fiável para o sistema em análise, comprovando que o tipo de medidas, quantidade e a sua localização se mostra preponderante na obtenção de uma estimativa com valores que se

possam considerar confiáveis. Na presente configuração, foi também evidenciada a melhor capacidade de filtragem do erro de medida dos estudos efetuados.

A filtragem do erro de medida, verificar-se-á se os níveis de redundância forem adequados e o erro associado aos valores do vetor estimado para as grandezas medidas, for inferior ao erro associado aos valores das medidas constituintes do vetor de medidas, ido de encontro ao que acontece na realidade nos centros de controlo.

Como as propriedades das redes influenciam diretamente a construção da matriz jacobina de medida $H(x)$, é possível confirmar na tabela 5.42 a esparsidade da matriz $H(x)$, para os testes efetuados. Este facto comprova o esforço computacional necessário para o cálculo do algoritmo implementado.

Tabela 5.42 – Analise da esparsidade da matriz jacobiana de medida $H(x)$

Sistema	Numero de elementos diferentes de zero na matriz jacobiana de Medida $H(x)$	
	IEEE 14 Barramentos	IEEE 118 Barramentos
C1	176	2261
C2	228	2894

Para a compilação do algoritmo e posterior obtenção dos valores estimados, foi usado um computador com um processador Intel Core i7 a 2.2GHz, 6GB de memória RAM, e sistema Operativo Windows 10 de 64 bits.

Na tabela 5.43 é apresentado um resumo das características das configurações utilizadas, bem como do comportamento do estimador em termos de convergência e de tempo de cálculo necessário à aquisição de uma solução para o vetor de estado estimado. Na tabela é evidenciada a alteração da redundância e da sua influência nos tempos de cálculo obtidos.

Tabela 5.43 – Resumo dos comportamentos dos sistemas avaliados

Sistema e Configuração de medida	Nº de Tensões	Nº de Injeções de Potência		Nº de Trânsitos de Potência		Redundância	Convergência	Tempo de Processamento
		Ativa	Reativa	Ativa	Reativa			
14C1A	14	6	6	11	11	1,78	3 iter	60,9 ms
14C1B	14	4	8	11	11	1,78	3 iter	62,3 ms
14C1C	14	8	4	11	11	1,78	3 iter	62,9 ms
14C2A	14	9	9	14	14	2,22	3 iter	64,8 ms
14C2B	14	5	13	14	14	2,22	3 iter	64,5 ms
14C2C	14	13	5	14	14	2,22	3 iter	65,7 ms
118C1	107	57	54	172	164	2,3	4 iter	440,9 ms
118C2	114	100	95	164	163	2,7	6 iter	771,5 ms

A redundância de medida foi avaliada em ambas as redes, sendo evidenciados melhores resultados nas configurações em que o valor de redundância era superior. Porém, a redundância de medida por si só, não justifica uma melhor estimativa, pois para além do aumento do número de medidas, é preponderante o tipo de medidas e a sua localização na rede sob avaliação. É importante notar que aquando de uma redundância demasiado pequena, ou na inexistência de medidas críticas, o algoritmo demonstrou perturbações no cálculo do vetor de estado, incluindo interrupção do processo de convergência por não ter sido atingida a singularidade da matriz de Ganho (G).

Outro aspeto comprovado foi o acoplamento $Q - |V|$ e $P - \theta$, sendo evidente a influência do maior número de medidas de potências ativas e reativas injetadas nos barramentos na qualidade da estimativa obtida.

Finalmente, o algoritmo implementado apresentou boas características de convergência e de precisão dos resultados obtidos, constatando-se também que o tempo de processamento para cada iteração é extremamente reduzido, sendo evidente o bom comportamento computacional do mesmo.

CAPÍTULO 6

DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

Capítulo 6

DETEÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

6.1 – DETEÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

Conforme exposto nos capítulos anteriores, os algoritmos de estimação de estado, devem providenciar a detecção de erros grosseiros uma vez que, se as medidas que chegam aos Centros de Controlo contiverem de alguma forma erros grosseiros, estes, desvirtuam por completo o processo de estimação de estado contaminando o resultado obtido.

Desta forma, foi implementado ao algoritmo desenvolvido dois métodos de detecção por forma a avaliar o seu comportamento aquando da existência de erros grosseiros, bem como verificar a aplicabilidade dos métodos estudados.

Como referido anteriormente, para a fase de detecção de erros grosseiros, adotaram-se dois métodos. Dos métodos aplicados, um recorre à avaliação pelo teste do $J(\hat{x})$, e outro pelo teste dos resíduos normalizados. Ambos os métodos foram descritos no capítulo 4.

Com o intuito de se efetuar a análise da detecção de erros grosseiros, serão apresentados seguidamente para a rede de 14 barramentos, duas configurações de medida distintas com 3 tipos de erros para cada uma (Tensões, Potencia Injetada e Transito de Potencia nas Linhas). No que concerne à rede de 118 Barramentos o comportamento do estimador para a análise efetuada é semelhante. As configurações selecionadas constam das análises anteriormente efetuadas.

Assim de uma forma resumida são efetuadas as seguintes avaliações:

- Teste para a configuração 14C1A (Redundância 1.78)
 - 3 Avaliações (Tensões, Potencia Injetada e Trânsito de Potencia nas Linhas);

- Teste para a configuração 14C2A (Redundância 2.22)
 - 3 Avaliações (Tensões, Potencia Injetada e Trânsito de Potencia nas Linhas);

De forma a avaliar a capacidade de detecção pelos métodos selecionados, foram simulados três tipos de erros grosseiros de forma independente, isto é, um nas medidas de tensão, outro nas medidas de potência injetada e por ultimo, um nas medidas de trânsito de potência. Para cada um dos erros fez-se variar a sua amplitude no intervalo de -30σ a 30σ , calculando-se a estimativa do vetor estado do sistema e o correspondente valor de $J(\hat{x})$, e do resíduo normalizado máximo para cada amplitude.

As medidas utilizadas para a afetação dos erros grosseiros são as seguintes:

- Medida de Tensão: V_6
- Medida de Potencia Injetada: P_2
- Medida de Trânsito de Potências: Q_{4-5}

Nas Tabelas seguintes são apresentados os resultados obtidos e a indicação do nível de detecção respetivo.

Tabela 6.1 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida V_6 –
Configuração 14C1A.

14C1A – V_6				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x}) / \chi^2$	$r_{N \max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
30x σ	519,653	13,348 (E)	22,619	11,540 (E)
20x σ	252,132	6,476 (E)	15,614	7,966 (E)
15x σ	155,312	3,989 (E)	12,118	6,183 (E)
10x σ	82,979	2,131 (E) *1	8,628	4,402 (E)
5x σ	35,049	0,900	5,141	2,623 (E)
4x σ	28,384	0,729	4,445	2,268 (E)
3x σ	22,691	0,583	3,748	1,912 (E)
2x σ	17,970	0,462	3,052	1,557 (E)
1x σ	14,219	0,365	2,356	1,202 (E)
0	11,438	0,294	1,660	0,847
-1x σ	9,627	0,247	0,964	0,492
-2x σ	8,784	0,226	0,269	0,137
-3x σ	8,909	0,229	0,427	0,218
-4x σ	10,001	0,257	1,122	0,572
-5x σ	12,061	0,310	1,817	0,927
-10x σ	36,831	0,946	5,289	2,698 (E) *2
-15x σ	85,661	2,200 (E) *3	8,756	4,468 (E)
-20x σ	158,464	4,070 (E)	12,219	6,234 (E)
-30x σ	375,634	9,648 (E)	19,131	9,760 (E)

- *1 A deteção foi conseguida para 6x σ ;
- *2 A deteção foi conseguida para -6x σ ;
- *3 A deteção foi conseguida para -11x σ .

Graus de liberdade = 21

$$\chi_{0,99}^2 = 38.932$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.2 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida P₂ –
Configuração 14C1A.

14C1A – P ₂				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$	$r_{N\ max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
30xσ	224,800	5,774 (E)	14,737	7,519 (E)
20xσ	110,186	2,830 (E)	10,077	5,141 (E)
15xσ	69,177	1,777 (E)	7,746	3,952 (E)
10xσ	39,043	1,003 (E)	5,414	2,762 (E)
5xσ	19,794	0,508	3,081	1,572 (E)
4xσ	17,251	0,443	2,615	1,334 (E)
3xσ	15,144	0,389	2,148	1,096 (E)
2xσ	13,473	0,346	1,681	0,858
1xσ	12,237	0,314	1,663	0,848
0	11,438	0,294	1,660	0,847
-1xσ	11,075	0,284	1,657	0,845
-2xσ	11,148	0,286	1,654	0,844
-3xσ	11,657	0,299	1,651	0,842
-4xσ	12,602	0,324	1,781	0,909
-5xσ	13,984	0,359	2,227	1,136 (E)
-10xσ	27,441	0,705	4,455	2,273 (E)
-15xσ	51,817	1,331 (E) *1	6,683	3,410 (E)
-20xσ	87,122	2,238 (E)	8,911	4,547 (E)
-30xσ	190,554	4,895 (E)	13,367	6,820 (E)

– *1 A deteção Foi conseguida para -13xσ;

Graus de liberdade = 21

$$\chi_{0,99}^2 = 38.932$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.3 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida $Q_{4.5}$ –
Configuração 14C1A.

14C1A – $Q_{4.5}$				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$	$r_{N\ max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
$30x\sigma$	117,247	3,012 (E)	10,338	5,275 (E)
$20x\sigma$	59,779	1,535 (E)	6,998	3,570 (E)
$15x\sigma$	39,327	1,010 (E)	5,323	2,716 (E)
$10x\sigma$	24,434	0,628	3,645	1,860 (E)
$5x\sigma$	15,128	0,389	2,008	1,024 (E)
$4x\sigma$	13,940	0,358	1,776	0,906
$3x\sigma$	12,977	0,333	1,735	0,885
$2x\sigma$	12,238	0,314	1,710	0,873
$1x\sigma$	11,725	0,301	1,685	0,860
0	11,438	0,294	1,660	0,847
$-1x\sigma$	11,376	0,292	1,635	0,834
$-2x\sigma$	11,541	0,296	1,610	0,821
$-3x\sigma$	11,932	0,306	1,585	0,808
$-4x\sigma$	12,549	0,322	1,591	0,812
$-5x\sigma$	13,393	0,344	1,711	0,873
$-10x\sigma$	21,020	0,540	3,096	1,580 (E) *1
$-15x\sigma$	34,351	0,882	4,789	2,443 (E)
$-20x\sigma$	53,412	1,372 (E) *2	6,485	3,309 (E)
$-30x\sigma$	108,848	2,796 (E)	9,886	5,044 (E)

- *1 A deteção Foi conseguida para $-7x\sigma$;
- *2 A deteção Foi conseguida para $-17x\sigma$

Graus de liberdade = 21

$$\chi_{0,99}^2 = 38.932$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.4 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida V_6 –
Configuração 14C2A.

14C2A – V_6				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$	$r_{N\ max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
30 $\times\sigma$	544,099	9,933 (E)	23,018	11,744 (E)
20 $\times\sigma$	263,807	4,816 (E)	15,784	8,053 (E)
15 $\times\sigma$	162,961	2,975 (E)	12,172	6,210 (E)
10 $\times\sigma$	88,238	1,611 (E) *1	8,563	4,369 (E)
5 $\times\sigma$	39,580	0,723	4,957	2,529 (E)
4 $\times\sigma$	32,971	0,602	4,236	2,161 (E)
3 $\times\sigma$	27,401	0,500	3,515	1,793 (E)
2 $\times\sigma$	22,871	0,418	2,795	1,426 (E)
1 $\times\sigma$	19,380	0,354	2,074	1,058 (E)
0	16,927	0,309	1,760	0,898
-1 $\times\sigma$	15,512	0,283	1,756	0,896
-2 $\times\sigma$	15,135	0,276	1,752	0,894
-3 $\times\sigma$	15,794	0,288	1,749	0,892
-4 $\times\sigma$	17,490	0,319	1,745	0,890
-5 $\times\sigma$	20,222	0,369	2,246	1,146 (E)
-10 $\times\sigma$	49,404	0,902	5,843	2,981 (E)
-15 $\times\sigma$	104,413	1,906 (E) *2	9,437	4,815 (E)
-20 $\times\sigma$	185,190	3,381 (E)	13,027	6,647 (E)
-30 $\times\sigma$	423,802	7,737 (E)	20,199	10,306 (E)

- *1 A deteção foi conseguida para 7 $\times\sigma$;
- *2 A deteção foi conseguida para -11 $\times\sigma$;

Graus de liberdade = 33

$$\chi_{0,99}^2 = 54.776$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.5 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida P_2 –
Configuração 14C2A.

14C2A – P_2				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$	$r_{N\ max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
30x σ	254,026	4,638 (E)	15,521	7,919 (E)
20x σ	126,176	2,303 (E)	10,585	5,400 (E)
15x σ	80,540	1,470 (E) *1	8,115	4,140 (E)
10x σ	47,112	0,860	5,645	2,880 (E)
5x σ	25,904	0,473	3,173	1,619 (E)
4x σ	23,130	0,422	2,679	1,367 (E)
3x σ	20,845	0,381	2,184	1,114 (E)
2x σ	19,050	0,348	1,715	0,875
1x σ	17,744	0,324	1,738	0,887
0	16,927	0,309	1,760	0,898
-1x σ	16,601	0,303	1,782	0,909
-2x σ	16,764	0,306	1,805	0,921
-3x σ	17,417	0,318	1,827	0,932
-4x σ	18,560	0,339	1,856	0,947
-5x σ	20,194	0,369	2,321	1,184 (E)
-10x σ	35,715	0,652	4,648	2,371 (E)
-15x σ	63,504	1,159 (E) *2	6,974	3,558 (E)
-20x σ	103,571	1,891 (E)	9,301	4,745 (E)
-30x σ	220,590	4,027 (E)	14,154	7,221 (E)

- *1 A deteção foi conseguida para 12x σ ;
- *2 A deteção foi conseguida para -14x σ ;

Graus de liberdade = 33

$$\chi_{0,99}^2 = 54.776$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.6 – Detecção de erro grosseiro para diferentes amplitudes – Medida $Q_{4.5}$ –
Configuração 14C2A.

14C2A – $Q_{4.5}$				
Amplitude do Erro Grosseiro	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$	$r_{N\ max}$	$r_N / N_{1-\alpha/2}$
$30x\sigma$	130,754	2,387 (E)	10,707	5,463 (E)
$20x\sigma$	69,018	1,260 (E) *1	7,250	3,699 (E)
$15x\sigma$	47,037	0,859	5,517	2,815 (E)
$10x\sigma$	31,013	0,566	3,783	1,930 (E)
$5x\sigma$	20,968	0,383	2,045	1,044 (E)
$4x\sigma$	19,679	0,359	1,836	0,937
$3x\sigma$	18,630	0,340	1,817	0,927
$2x\sigma$	17,822	0,325	1,798	0,917
$1x\sigma$	17,254	0,315	1,779	0,908
0	16,927	0,309	1,760	0,898
$-1x\sigma$	16,842	0,307	1,741	0,888
$-2x\sigma$	16,997	0,310	1,722	0,879
$-3x\sigma$	17,394	0,318	1,703	0,869
$-4x\sigma$	18,033	0,329	1,684	0,859
$-5x\sigma$	18,914	0,345	1,728	0,882
$-10x\sigma$	26,952	0,492	3,180	1,623 (E) *2
$-15x\sigma$	41,066	0,750	4,927	2,514 (E)
$-20x\sigma$	61,280	1,119 (E) *3	6,677	3,406 (E)
$-30x\sigma$	120,110	2,193 (E)	10,182	5,195 (E)

- *1 A deteção foi conseguida para $17x\sigma$;
- *2 A deteção foi conseguida para $-7x\sigma$
- *3 A deteção foi conseguida para $-19x\sigma$

Graus de liberdade = 33

$$\chi_{0.99}^2 = 54.776$$

$$\lambda = N_{1-\alpha/2} = 1,96$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Após a apresentação dos resultados nas tabelas anteriores, é possível concluir que em todos os testes efetuados a rotina de detecção de erros grosseiros pelo teste do $J(\hat{x})$, têm um desempenho melhor quando os erros ocorrem nas medidas de tensão. Uma explicação para o sucedido, é o maior peso que é atribuído às medidas de tensão no processo de estimação pelo método WLS. É possível aferir também que quando as medidas afetadas com um erro grosseiro correspondem às medidas de tensão, o valor de $J(\hat{x})$ aumenta em maior modulo em comparação com as restantes. Posto isto, é possível afirmar que quando os erros grosseiros existem nas medidas de tensão, o impacto dos mesmos no processo de estimação tem maior significância devido ao peso associado a estas medidas.

Quando os erros se verificam nas medidas de potência injetadas nos barramentos ou nos fluxos de potência nas linhas, a rotina não é tão eficiente, sendo apenas detetados os erros grosseiros de amplitude mais elevada.

De forma a avaliar a influência da redundância no processo de detecção, apresenta-se na Tabela 6.7 um resumo das amplitudes iniciais para os quais foram detetados erros grosseiros em ambas as configurações simuladas.

Tabela 6.7 – Resumo das amplitudes de detecção de erros grosseiros, para as configurações 14C1A e 14C2A e respetivas medidas afetadas.

Amplitudes de Detecção de Erros Grosseiros				
Configuração	Método de Detecção			
	$J(\hat{x})$		r_N	
14C1A - V ₆	-11xσ	6xσ	-6xσ	1xσ
14C2A - V ₆	-11xσ	7xσ	-5xσ	1xσ
14C1A - P ₂	-13xσ	10xσ	-5xσ	3xσ
14C2A - P ₂	-14xσ	12xσ	-5xσ	3xσ
14C1A - Q _{4.5}	-17xσ	15xσ	-7xσ	5xσ
14C2A - Q _{4.5}	-19xσ	17xσ	-7xσ	5xσ

Como é possível verificar pela análise da Tabela 6.7, a redundância de medida teve influência no desempenho da rotina de detecção, isto porque para erros grosseiros nas mesmas medidas, os mesmos só foram detetados em amplitudes superiores, ou seja, quanto maior o número de medidas disponíveis para o estimador, maior a dificuldade de detecção de erros grosseiros com baixas amplitudes. Uma explicação para o sucedido é a existência de um maior número de medidas iniciais, e conseqüente maior número de medidas próximas das medidas afetadas por erros grosseiros, que por força da sua correlação e efeito de camuflagem das medidas contaminadas, provocam uma menor influencia da medida afetada no calculo da função objetivo $J(\hat{x})$, e conseqüente detecção pelo teste do $J(\hat{x})$.

Em comparação, se para a detecção de erros grosseiros for aplicado o método dos resíduos normalizados considerando uma probabilidade de falso alarme (α) de 10%, é possível afirmar que com base nos resultados apresentados pelas tabelas anteriores, que este tipo de teste apresenta uma melhor eficiência pois consegue detetar a presença do erro grosseiro para um menor valor da amplitude deste.

Importa salientar que nos testes e resultados apresentados, foi apenas considerada uma medida afetada de erros grosseiros por cada simulação.

6.2 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS

No seguimento do ponto anterior, e após um processo de estimação a rotina de detecção de erros grosseiros informar da existência de erros grosseiros presentes nas medidas, existe a necessidade de se identificar qual ou quais as medidas afetadas e proceder à sua eliminação ou correção de forma a tornar confiáveis os valores obtidos, uma vez que na realidade não se tem conhecimento, à partida, da quantidade de medidas portadoras de erros grosseiros.

Conforme exposto no Capítulo 4, existem vários métodos que quando aplicados, permitem uma identificação das medidas afetadas, para posteriormente se proceder à sua correção/eliminação.

Assim, na presente dissertação, foi aplicado o método identificação pelos resíduos normalizados de medida, com o método de correção por eliminação (IBE).

Quando só existe uma medida afetada por erros grosseiros, já se mostrou no ponto anterior a sua eficácia, pelo que será avaliado o desempenho da detecção e identificação na presença de mais de uma medida afetada de erros grosseiros.

Desta forma e similarmente ao estudo efetuado anteriormente serão apresentados seguidamente para a rede de 14 barramentos, duas configurações de medida distintas com 3 tipos de erros em simultâneo para cada uma (Tensões, Potencia Injetada e Transito de Potencia nas Linhas). Para isso, foram afetadas as medidas V_{13} , P_{11} e Q_{2-3} com erros de amplitude igual a $20\sigma_i$, $30\sigma_i$, e $25\sigma_i$ respetivamente.

Assim de uma forma resumida são efetuadas as seguintes avaliações:

- Teste para a configuração 14C1A (Redundância 1.78)
 - 1 Avaliação - Erros simultâneos nas medidas V_{13} , P_{11} e Q_{2-3}
- Teste para a configuração 14C2A (Redundância 2.22)
 - 1 Avaliação - Erros simultâneos nas medidas V_{13} , P_{11} e Q_{2-3}

Após a obtenção da estimativa do estado do sistema com as medidas acima indicadas afetadas de erros grosseiros, aplica-se o teste $J(\hat{x})$, por forma verificar se existem erros grosseiros. Seguidamente são calculados os resíduos normalizados, sendo apresentados os 6 resíduos de maior amplitude. Após a identificação das medidas com maior amplitude, existem vários processos possíveis de aplicar. O processo escolhido na presente dissertação como anteriormente referido foi o processo de eliminação da medida com o maior resíduo normalizado (IBE). Após a eliminação, é novamente estimado o estado do sistema, e volta-se a aplicar o processo descrito até que após a execução do teste $J(\hat{x})$ este não detete a presença de erros grosseiros.

Seguidamente são apresentados os resultados para cada configuração de medida utilizada (14C1A e 14C2A).

Verificação e identificação de erros grosseiros para a configuração 14C1A.

Após a afetação das medidas V_{13} , P_{11} e Q_{2-3} na configuração 14C1A é apresentada na tabela 6.8 os valores da função objetivo e da deteção de erro grosseiros na estimativa obtida.

Tabela 6.8 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 1º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
1º Ciclo	764.47	19.64 (E)

Graus de liberdade = 21

$$\chi_{0.99}^2 = 38.932$$

(E) – Indica deteção de erro grosseiro

Tabela 6.9 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 1º ciclo

Medida	Q ₂₋₃	V ₁₃	Q ₆₋₁₃	P ₆₋₁₃	Q ₁₁	V ₁₀
Amplitude do Resíduo Normalizado	23,01	12,77	9,31	8,78	8,25	8,24

Após o 1º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida Q₂₋₃.

Na Tabela 6.10 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida Q₂₋₃ (2º ciclo).

Tabela 6.10 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 2º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
2º Ciclo	233.53	6.22 (E)

Graus de liberdade = 20

$$\chi_{0,99}^2 = 37.566$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Tabela 6.11 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 2º ciclo

Medida	V ₁₃	Q ₆₋₁₁	P ₆₋₁₃	Q ₁₁	V ₁₀	P ₁₁
Amplitude do Resíduo Normalizado	12,79	9,35	8,81	8,24	8,23	8,17

Após o 2º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida V₁₃.

Na Tabela 6.12 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida V₁₃ (3º ciclo).

Tabela 6.12 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 3º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
3º Ciclo	71.29	1.97 (E)

Graus de liberdade = 19

$$\chi_{0,99}^2 = 36.191$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Tabela 6.13 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 3º ciclo

Medida	P ₁₁	Q ₁₁	V ₁₀	V ₁₁	V ₆	Q ₆₋₁₁
Amplitude do Resíduo Normalizado	7,58	7,57	7,57	6,42	3,39	2,15

Após o 3º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida P₁₁.

Na Tabela 6.14 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida P₁₁ (4º ciclo).

Tabela 6.14 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 4º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
4º Ciclo	13.11	0.38

Graus de liberdade = 18

$$\chi_{0.99}^2 = 34.805$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Após o 4º ciclo, o teste do $J(\hat{x})$ não detetou a presença de erros grosseiros nas medidas, terminando desta forma o processo de detecção-identificação-eliminação.

Terminado o processo detecção-identificação-eliminação, e depois de verificados os resultados obtidos, é possível afirmar que o processo detetou, e identificou corretamente as medidas afetadas com os erros grosseiros.

Importa no presente caso referir que, à medida que se vão eliminando as medidas, o aumento do correlacionamento das medidas aumenta e o valor da redundância diminui, tendo como consequência a diminuição da eficácia do teste de detecção, bem como da possibilidade de tornar a rede inobservável e da consequente falha da convergência do algoritmo.

Por forma a comparar a influência do processo de detecção-identificação-eliminação na configuração estudada (14C1A), apresenta-se na Tabela 6.15 os erros obtidos após o processo de eliminação em comparação com os erros obtidos sem a presença de erros grosseiros.

Tabela 6.15 – Erros de estimação (Médio e Máximo) no vetor de estado estimado.

Redundância Final	Configuração de Medida	δ_{max}^v	δ_{med}^v	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
1.78	14C1A – Sem Erros	9,84E-04	4,92E-04	8,24E-03	4,57E-03
1,67	14C1A – Após medidas eliminadas	1,91E-03	5,64E-04	8,26E-03	4,92E-03

Na Figura 6.1 é possível verificar os erros médio e máximo tanto para os módulos das tensões como para os ângulos de fase, onde são comparados os mesmos considerando o vetor de estado sem medidas com erros grosseiros e o vetor de estado estimado sem as medidas identificada como contendo erro grosseiro (Vetor sem as medidas eliminadas anteriormente).

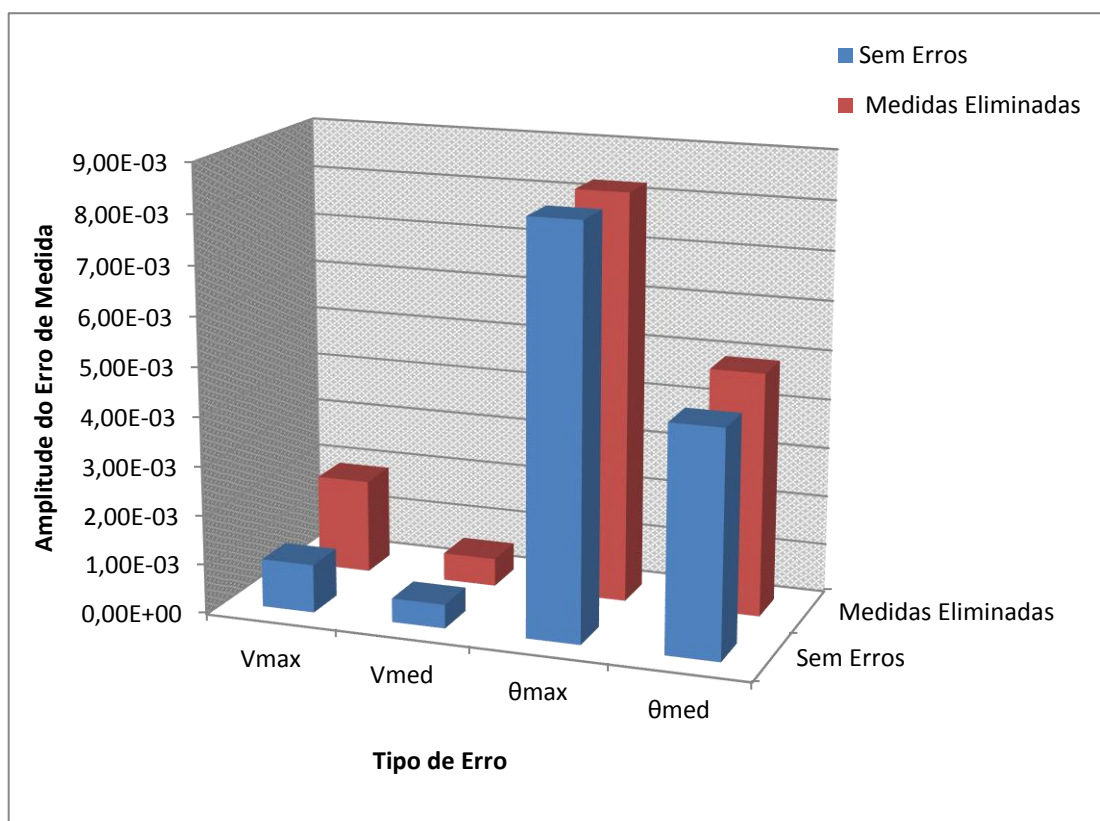


Figura 6.1 – Comparação dos erros de estimação no vetor de estado para a configuração 14C1A (Com e sem erros grosseiros).

É possível aferir que após o processo de eliminação das medidas afetadas de erro grosseiro, existiu uma depreciação da qualidade da estimativa obtida em tanto nos módulos das tensões como nos ângulos de fase. Isto pode ser explicado pela eliminação das medidas identificadas como contendo erros, provocando um maior correlacionamento nas medidas vizinhas. Verifica-se também que uma redundância no limite da não observabilidade da rede, prejudica também os resultados de estimação. Todavia, os resultados obtidos compreendem erros médios dentro dos limites de confiabilidade das medidas obtidas, pelo que podemos concluir que o processo funcionou corretamente.

Verificação e identificação de erros grosseiros para a configuração 14C2A.

Continuando a avaliação do funcionamento do processo de detecção-identificação-eliminação, aplica-se utilizando os pressupostos na configuração de medida 14C1A avaliada anteriormente com a particularidade de na configuração 14C2A existir uma redundância de medida superior ($2,22 > 1,78$).

Desta forma poderá ser verificada a influência da redundância de medida na aplicabilidade do teste.

Assim após a afetação das medidas V_{13} , P_{11} e Q_{2-3} com erro grosseiro na configuração 14C2A, são apresentados na tabela 6.16 os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida.

Tabela 6.16 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 1º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
1º Ciclo	1155.07	21.09 (E)

Graus de liberdade = 33

$$\chi_{0,99}^2 = 54.776$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Tabela 6.17 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 1º ciclo

Medida	Q_{2-3}	P_{11}	V_{13}	P_{10-13}	P_{6-11}	Q_{13}
Amplitude do Resíduo Normalizado	23,01	19,03	16,39	11,11	10,84	8,79

Após o 1º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida Q₂₋₃.

Na Tabela 6.18 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida Q₂₋₃ (2º ciclo).

Tabela 6.18 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 2º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
2º Ciclo	624.26	11.67 (E)

Graus de liberdade = 32

$$\chi_{0,99}^2 = 53.486$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Tabela 6.19 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 2º ciclo

Medida	P ₁₁	V ₁₃	P ₁₀₋₁₃	P ₆₋₁₁	Q ₁₃	V ₁₁
Amplitude do Resíduo Normalizado	19,03	16,41	11,10	10,86	8,80	8,45

Após o 2º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida P₁₁.

Na Tabela 6.20 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida P₁₁ (3º ciclo).

Tabela 6.20 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 3º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
3º Ciclo	262.03	5.02 (E)

Graus de liberdade = 31

$$\chi_{0,99}^2 = 52.191$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Tabela 6.21 – Resíduos Normalizados de maior amplitude para o 3º ciclo

Medida	V ₁₃	Q ₁₃	V ₁₂	P ₁₃	V ₆	V ₁₄
Amplitude do Resíduo Normalizado	15,67	8,42	6,93	6,09	4,45	4,24

Após o 3º ciclo e existindo a confirmação da existência de erro grosseiro elimina-se a medida com maior resíduo, que neste caso é a medida V₁₃.

Na Tabela 6.22 apresentam-se os valores da função objetivo e da detecção de erro grosseiros na estimativa obtida, após a eliminação da medida V₁₃ (4º ciclo).

Tabela 6.22 – Valores de $J(\hat{x})$ e $J(\hat{x})/\chi^2$ para o 4º ciclo

	$J(\hat{x})$	$J(\hat{x})/\chi^2$
4º Ciclo	17.16	0.34

Graus de liberdade = 30

$$\chi_{0,99}^2 = 50.892$$

(E) – Indica detecção de erro grosseiro

Após o 4º ciclo, o teste do $J(\hat{x})$ não detetou a presença de erros grosseiros nas medidas, terminando desta forma o processo de detecção-identificação-eliminação.

Após a aplicação do processo IBE, conclui-se que para a configuração 14C2A o processo também detetou, e identificou corretamente as medidas afetadas com os erros grosseiros.

Similarmente ao caso anterior, conforme se vão eliminando as medidas, o aumento do correlacionamento das medidas aumenta e o valor da redundância diminui, não se fazendo sentir porém, uma acentuação da diminuição da eficácia do teste de deteção. Um facto que poderá contribuir para o sucedido, é a maior redundância da configuração atual, o que para o número de medidas eliminadas, é claramente suficiente para uma estimação de estado adequada. Convém referir que no caso da existência de um número maior de medidas afetadas, poderá acontecer uma falha na observabilidade da rede, ou pela redução do número de medidas, ou pela eliminação de medidas que para certas condições são consideradas críticas.

Na presente simulação foi notória uma identificação mais precisa do resíduo de medida, uma vez que com uma redundância superior, permite um menor correlacionamento dos resíduos (isto para amplitudes de erro grosseiro elevadas), evitando desta forma possíveis falsas contaminações.

Assim é possível afirmar que para uma redundância adequada, o teste IBE demonstra um bom desempenho. É necessário atentar que a existência de erros correlacionados poderá causar a falha na identificação da medida a eliminar, devido ao efeito de camuflagem.

Por forma a comparar a influência do processo de deteção-identificação-eliminação, na configuração estudada (14C2A) apresenta-se na Tabela 6.23 os erros obtidos após o processo de eliminação em comparação com os erros obtidos sem a presença de erros grosseiros.

Tabela 6.23 – Erros de estimação (Médio e Máximo) no vetor de estado estimado.

Redundância Final	Configuração de Medida	δ_{max}^v	δ_{med}^v	δ_{max}^θ	δ_{med}^θ
2,22	14C2A – Sem Erros	1,30E-03	4,47E-04	5,66E-03	2,47E-03
2.11	14C2A – Após medidas eliminadas	1,68E-03	5,55E-04	5,77E-03	2,50E-03

Na Figura 6.2 é possível verificar os erros médios e máximos tanto para os módulos das tensões como para os ângulos de fase, nas configurações testadas anteriormente (sem erros grosseiros / após eliminação de medias contaminadas com erros grosseiros).

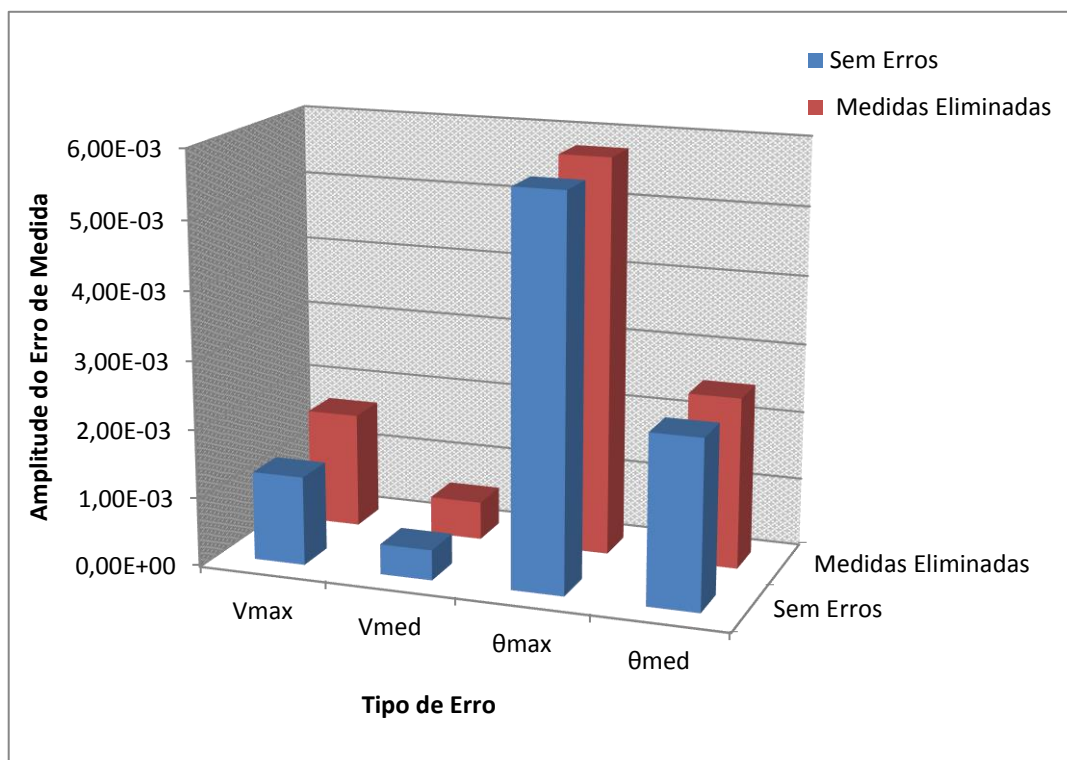


Figura 6.2 – Comparação dos erros de estimação no vetor de estado para a configuração 14C2A (Com e sem erros grosseiros).

É possível aferir que após o processo de eliminação das medidas afetadas de erro grosseiro, existiu uma depreciação da qualidade da estimativa obtida em tanto nos módulos das tensões como nos ângulos de fase. Isto pode ser explicado pela eliminação das medidas identificadas como contendo erros, provocando uma diminuição da redundância de medida e o conseqüente correlacionamento nas medidas vizinhas. A eliminação das medidas no presente caso não afetou o vetor das medidas com significância, demonstrando que existindo um conjunto de medidas com redundâncias superiores e localizações adequadas, pode ser benéfico para processos onde se desconfia da existência de erros grosseiros.

Perante isto, é possível afirmar a boa qualidade da estimativa do vetor de estado obtida após o processo de identificação e eliminação de erros grosseiros, bem como do bom funcionamento do processo de correção implementado.

6.3 – CONCLUSÃO

No presente capítulo foram aplicados métodos que permitem a detecção e a identificação de erros grosseiros. Para a sua avaliação foram utilizadas duas redes de teste com redundâncias diferentes.

Para a detecção de erros grosseiros foram utilizados dois métodos distintos, o que utiliza o teste do $J(\hat{x})$, e outro que utiliza o teste dos resíduos normalizados de medida.

Conforme foi possível verificar, ambos os testes detetaram as medidas afetadas com erros grosseiros. Analisando os dois testes, o teste do $J(\hat{x})$ na presença das mesmas condições, detetou as medidas afetadas com erros grosseiros em amplitudes superiores quando comparado com o teste dos resíduos normalizados. Foi possível verificar também que aquando da existência de erros nas medidas de Tensão, a influência dos mesmos no processo de estimação de estado é maior do que em relação aquando da ocorrência nas medidas de potência injetadas nos barramentos ou nos fluxos de potência nas linhas.

Pelos resultados obtidos pode-se afirmar que existe um aumento de influência do erro grosseiro nas medidas com a seguinte ordem de importância: 1º Medidas de Tensão nos Barramentos em 2º Medidas de Potencia Injetadas nos Barramentos e em 3º Medidas de Transito de Potências nas Linhas. É importante notar que basta apenas um erro com amplitude assinalável em qualquer medida, para proporcionar uma estimativa sem grau de confiança nos valores obtidos.

Pela avaliação da redundância no processo de detecção, foi possível verificar que a redundância de medida teve influência no desempenho da rotina de detecção, isto porque para erros grosseiros nas mesmas medidas, os mesmos só foram detetados em amplitudes superiores.

Seguidamente à apresentação de resultados para a fase de detecção de erros grosseiros, foi testado método IBE, onde se verificou a aplicabilidade do mesmo no processo de identificação dos erros e a sua posterior eliminação tendo em vista a obtenção de uma estimativa sem a presença de erros grosseiros.

Nos resultados obtidos, foi possível verificar que o processo aplicado identificou corretamente as medidas afetadas com erros grosseiros e que após a eliminação das mesmas

do vetor das medidas, foi possível obter para ambos os testes estimativas com bons resultados, confirmado assim o seu funcionamento. Foram efetuados estudos em duas configurações de medidas com redundâncias diferentes, constatando o melhor desempenho na configuração com maior número de medidas.

Resumindo, os processos de detecção, identificação e correção de medidas contaminadas com erros grosseiros, evidenciaram-se funcionais e muito eficazes em todas as simulações efetuadas.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

Capítulo 7

CONCLUSÕES

No presente trabalho de dissertação foi efetuado um estudo aprofundado relativamente à importância da aplicabilidade da estimação de estado em sistemas elétricos de energia. Foi apresentada a evolução histórica desta temática, bem como foram descritos diferentes tipos de algoritmos aplicados em estimação de estado em sistemas elétricos de energia.

O principal objetivo do trabalho aqui apresentado, consistiu no desenvolvimento de um algoritmo de Estimação de Estado implementado na ferramenta MATLAB®, onde foram analisadas diversas redes de teste, e onde foram comparados os valores medidos com os valores “estimados” após as diversas simulações.

O trabalho de investigação sobre algoritmos de estimação de estado desenvolvidos, centrou-se principalmente no funcionamento e na aplicabilidade prática de um algoritmo baseado no método dos mínimos quadrados ponderados (WLS ou de Gauss-Newton), sendo o mesmo alvo de análise detalhada. O método WLS, método utilizado para o desenvolvimento do algoritmo utilizado nas diversas simulações efetuadas, possui uma interpretação física muito simples. O mesmo tem por base, o fornecimento de uma estimativa do estado do sistema recorrendo a um conjunto redundante de medidas da rede em estudo, sendo caracterizado pela minimização da soma ponderada do quadrado dos resíduos (caracterizados pelas diferenças entre as observações atuais e os dados previstos com recurso ao modelo matemático), onde a ponderação é definida de acordo com a precisão das medidas disponíveis.

O algoritmo aplicado no presente trabalho mostrou-se eficiente e funcional, fornecendo estimativas do estado do sistema com bom grau de precisão e grande velocidade de cálculo computacional em quase todos os testes efetuados.

Dos resultados obtidos nas diversas simulações, é possível constatar que a redundância de medidas tem um papel importante na obtenção de resultados com maior precisão, quando no vetor de medidas estas são disponibilizadas em número suficiente, uma vez que pelas simulações efetuadas, um nível de redundância demasiado baixo condiciona a qualidade da estimativa obtida. Contudo, é possível aferir que a redundância de medidas por si só, não justifica uma melhor estimativa, pois para além do aumento do número de medidas, é preponderante o tipo de medidas e a sua localização na rede sob avaliação. Assim, é importante a conciliação entre uma quantidade de medidas adequada, o tipo de medidas e a sua localização, e não apenas ao recurso de uma determinada característica em particular.

Não menos importante, é o valor atribuído aos pesos das medidas disponíveis, uma vez que o algoritmo assume um conjunto de variâncias do erro de medida, cujas inversas tem recurso nos valores atribuídos aos pesos de cada medida. Assim, a escolha dos pesos também se mostra muito importante, pelo que deverá ser de escolha cuidadosa, uma vez que os mesmos influenciam a qualidade da estimativa obtida, mas também influenciam diretamente o processo de deteção e identificação de erros grosseiros nas medidas.

Outro aspeto comprovado foi o desacoplamento $Q - |V|$ e $P - \theta$, sendo evidente a influência do maior número de medidas de potências ativas e reativas injetadas nos barramentos na qualidade da estimativa obtida.

Como no processo de estimação de estado, a sua qualidade depende da capacidade de se conseguir detetar, identificar e corrigir as medidas afetadas com erros grosseiros, foram simulados em duas situações distintas a ocorrência de erros grosseiros, e procedeu-se ao processo de deteção, identificação e correção. Pela sua característica matemática do método WLS, é possível afirmar que a aplicação dos processos de deteção, identificação e correção tonaram-se de fácil execução.

Para a deteção de erros grosseiros foram utilizados dois métodos distintos, o que utiliza o teste do $J(\hat{x})$, e outro que utiliza o teste dos resíduos normalizados de medida. No processo de identificação e correção foi aplicado o método IBE com eliminação simples.

Na análise dos resultados verificou-se o bom desempenho dos métodos aplicados, sendo que na fase de detecção, foram evidenciados resultados mais precisos aquando da existência de uma redundância de medidas superior, e que na fase de identificação com erros múltiplos, indicaram sempre a média contaminada a eliminar, desde que os erros grosseiros não contaminassem medidas correlacionadas, bem como que o estimador necessita de tanto ciclos de detecção-identificação-eliminação-reestimação quanto o número de medidas afetadas com erros, o que provoca uma maior lentidão na conclusão do processo.

Foi também evidenciada uma maior precisão quando no processo de estimação se recorria a um conjunto com redundâncias superiores.

Globalmente, o algoritmo com recurso ao método WLS, mostrou-se robusto, apresentou um bom comportamento, e pelas suas capacidades matemáticas foi possível avaliar com precisão a existência de erros grosseiros e proceder à sua correção.

PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como um trabalho com esta dimensão, deixa sempre espaço para dúvidas, que por questões de diversa ordem, não foram possíveis responder, são apresentados de modo sucinto, possíveis futuros desenvolvimentos deste trabalho dos quais se destacam:

- O desenvolvimento de algoritmos que permitam, recorrendo a bases de dados anteriores, definir o peso das medidas recolhidas após uma avaliação prévia da qualidade da medida;
- Aplicação de metodologias que recorrendo à avaliação de observabilidade do sistema indiquem as medidas preponderantes no resultado de estimação;
- O desenvolvimento de um algoritmo que verificando o tamanho e complexidade da rede em estudo, a isolasse em “ilhas” à escolha do operador, e determinasse para esses locais o vetor de estado, adotando desta forma um processamento geograficamente distribuído de Estimação de Estado nos Sistemas Elétricos de Energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jun – 2017, Pearl Street Station. Available:
http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Pearl_Street_Station.
- [2] DyLiacco, T.E., “The Adaptative Reliability Control System”. IEEE Trans. On Pas, Vol. Pas-86, May 1967.
- [3] Fink, L. e Carlsen, K., “Operating Under Stress and Strain”. IEEE Spectrum, March 1978.
- [4] Pedro Zarco and António Gómez Expósito, “Power System Parameter Estimation: A Survey”. IEEE Trans. On Pas, Vol. 3, 13-17 July 2003.
- [5] I. M. M. A. F. Freitas, "A Estimacao de Estado de Sistemas Electricos de Energia," Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 1995.
- [6] W.-H. Edwin Liu, Swee-Lian Lim, “Parameter Error Identification and Estimation in Power System State Estimation”. IEEE Trans. On Power Systems, vol. 10, no. 1, Feb. 1995.
- [7] Schweppe, F.C.; Wildes J. e Rom, D.B., “Power System Static-State Estimation”, Parts I, II, III. IEEE Trans. On Pas, Vol. Pas-89, January 1970.
- [8] R. F. M. Brandão, "A Estimação de Estado em redes de transporte de energia com detecção e identificação de anomalias," Tese de Mestrado, FEUP, 2005.

- [9] José B. Carvalho, “Estimação de Estado de Sistemas Eléctricos de Energia, Detecção e Identificação de Erros Grosseiros”. Tese de Mestrado, FEUP, 1994.
- [10] W. J. Ackerman and W. R. Block, "Understanding supervisory systems", *Computer Applications in Power*, IEEE, vol. 5, pp. 37-40, 1992.
- [11] MONTICELLI, A., “State Estimation in Electric Power Systems, A Generalized Approach”, 1999. ISBN 978-1-4615-4999-4.
- [12] S. RAGHURAMAN and R. Jegatheesan, "A survey on state estimation techniques in electrical power system", in *Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE)*, 2011 International Conference on, 2011, pp. 199-205.
- [13] SCHWEPPE, F. C. e WILDES, J. (1970), “Power System Static State Estimation, part I: Exact Model”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 120-125, 1970.
- [14] SCHWEPPE, F. C. e ROM, D. B. (1970) “Power System Static State Estimation, part II: Approximate Model”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS- 89, pp. 125-130, 1970.
- [15] SCHWEPPE, F. C. (1970) “Power System Static State Estimation, part III: Implementation”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-89, pp. 130-135, 1970.
- [16] J. F. Dopazo, O. A. Klitin and L. S. VanSlyck, "State Calculation of Power Systems from Line Flow Measurements, Part II," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-91, no. 1, pp. 145-151, Jan. 1972.

- [17] J. F. Dopazo, O. A. Klitin, G. W. Stagg and L. S. Van Slyck, "State Calculation of Power Systems From Line Flow Measurements," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 7, pp. 1698-1708, Sept. 1970.
- [18] R. E. Larson, W. F. Tinney and J. Peschon, "State Estimation in Power Systems Part I: Theory and Feasibility," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, no. 3, pp. 345-352, March 1970.
- [19] R. E. Larson, W. F. Tinney and J. Peschon, "State Estimation on Power Systems", Parts I, II. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, March 1970.
- [20] J. J. Allemong, L. Radu and A. M. Sasson, "A Fast and Reliable State Estimation Algorithm for AEP's New Control Center," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 4, pp. 933-944, April 1982.
- [21] R. E. Larson, W. F. Tinney, L. P. Hajdu and D. S. Piercy, "State Estimation in Power Systems Part II: Implementatiton and applications," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, pp. 355-363, 1970.
- [22] K. Nishiya, J. Hasegawa and T. Koike, "Dynamic state estimation including anomaly detection and identification for power systems," in IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution, vol. 129, no. 5, pp. 192-198, September 1982.
- [23] M. Assadian, R. J. Goddard, H. W. Hong and D. French, "Field operational experiences with on line state estimator," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 50-58, Feb 1994.
- [24] Clements, K.A.; Woodzel e Burchett, R.C., "A New Method for Solving Equality-Constrained Power System Static State Estimation" in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.5, n°3, August 1990.

- [25] J. U. Gu, K. A. Clements, G. R. Krmpholz and P. w: Davis, "The solution of ill-conditioned power system state estimation problems via the method of Peters and Wilkinson", , in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 3, pp. 3473-3480, 1983.
- [26] Lo, K.L., Ong, P.S.; McColl, Moffatt, e Sulley. – Development of a Static- State Estimatiior, Part I: Estimation and Bad Data Suppression. IEEE Trans. On Pas, Vol. Pas-102, August 1983.
- [27] Rao, N.R. e Muralikrishna G., "A New Robust Algorithm for Estimating the State of a Power System". Electric Machines and Power Systems, 16:6, 431-439, 1989.
- [28] Arafeh, S.A e Schinzinger, R., "Estimation Algorithms for Large-Scale Power Systems". IEEE Trans. On Pas, Vol. Pas-98, December 1979.
- [29] Wu, Felix F., "Power System State Estimation: A Survey. Electrical Power & Energy Systems". International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 12, Issue 2, Pages 80-87, April 1990.
- [30] Do Couto Filho, M.B.; Leite da Silva, A.M. e Falcão, D.M., "Bibliography on power system state estimation (1968-1989)," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 5, no. 3, pp. 950-961, Aug. 1990.
- [31] A. Monticelli, F. F. Wu and C. A. F. Murarl, "A Hybrid State Estimator: Solving Normal Equations by Orthogonal Transformations," in IEEE Power Engineering Review, vol. PER-5, no. 12, pp. 41-41, Dec. 1985.
- [32] A. Gjelsvik, S. Aam and L. Holten, "Hachtel's Augmented Matrix Method - A Rapid Method Improving Numerical Stability in Power System Static State Estimation," in IEEE Power Engineering Review, vol. PER-5, no. 11, pp. 22-23, Nov. 1985.

- [33] M. R. Irving, R. C. Owen, and M. J. H. Sterling, "Power-system state estimation using linear programming," *Electrical Engineers, Proceedings of the Institution of*, vol. 125, pp. 879-885, 1978.
- [34] W. W. Kotiuga and M. Vidyasagar, "Bad Data Rejection Properties of Weighted Least Absolute Value Techniques Applied to Static State Estimation," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-101, pp. 844-853, 1982.
- [35] M. K. Celik and A. Abur, "A robust WLAV state estimator using transformations", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, pp. 106-113, 1992.
- [36] A. Abur and M. K. Celik, "A fast algorithm for the weighted least absolute value state estimation [for power systems]," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, pp. 1-8, 1991.
- [37] Monticelli, A. e Garcia, A., "Fast Decoupled State Estimators". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 5, May 1990.
- [38] Stott, B. e Alsac, O., "Fast Decoupled Load Flow". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PAS-93, n°3, May /June, 1974.
- [39] Horisberger, H.P.; Richard, J. e Rossier, C., "Fast Decoupled Static State Estimator for Electric Power Systems". *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. PAS-98, n°1, January /February, 1976.
- [40] Ferreira, Isabel M. e Maciel Barbosa, F.P. - "Square Root Filtering"- Uma Abordagem à Estimação Dinâmica de Sistemas Eléctricos de Energia, 3ª Jornadas de Engenharia Eléctrica, Barcelona, 1993.

- [41] Do Couto Filho, M.B. e Leite da Silva, A.M., "Dynamic State Estimation for Large-Scale Electric Power Systems". Proceedings of the 1984 IEEE International Symposium on Circuits and Systems.
- [42] Bretas, N.G., "An Iterative Dynamic State Estimation and Bad Data Processing". Electrical Power & Energy Systems, Vol. 11, nº 1, January 1989.
- [43] José B. Carvalho, "O processamento Distribuído na Estimação de Estado de Sistemas Eléctricos de Energia". Tese de Doutoramento, FEUP, 1999.
- [44] G. N. Korres and G. C. Contaxis, "A tool for the evaluation and selection of state estimator measurement schemes", Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 9, pp.1110-1116, 1994.
- [45] T. A. Stuart and C. J. Herczet, "A Sensitivity Analysis of Weighted Least Squares State Estimation for Power Systems", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. PAS-92, pp. 1696-1701, 1973.
- [46] S. L. Johnson, "An Algorithm for State Estimation in Power Systems", PICA Proceedings, 1973.
- [47] Peter J. Katsikas, George N. Korres., "Unified Observability and Measurement Placement in Generalized State Estimation". IEEE Trans. Power Systems, Vol. 18, No.1, pp.324-333, Feb. 2003.
- [48] M.K. Celikand W-H. E Liu., "An Incremental Measurement Placement Algorithm for State estimation". IEEE trans. Power Systems, vol. 10(3), pp. 1698-1703, 1995.
- [49] Mafaakher, F., Brameller, A. e Bermudez, J.F., "Optimal Metering Design Using Fast Decoupled Estimator". Proceedings of IEE, Vol. 126, January 1979.

- [50] E. E. Fetzer and P. M. Anderson, "Observability in the state estimation of power systems", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 94, pp. 1981-1988, 1975.
- [51] K. A. Clements, et al., "State Estimator Measurement System Reliability Evaluation - An Efficient Algorithm Based on Topological Observability Theory", *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol. PAS-101, pp. 997-1004, 1982.
- [52] Y. M. Park, et al., "Design of reliable measurement system for state estimation", *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 830-836, 1988.
- [53] A. P. S. Meliopoulos, et al., "Power system state estimation: modeling error effects and impact on system operation", in *System Sciences, 2001. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on*, 2001, pp. 682-690.
- [54] Papoulis, A., "Probability, Random Variables and Stochastic Processes". McGraw-Hill Publishing Company Ltd, New York, 1969.
- [55] Dopazo, J.F.; Klitin, O. e Van Slyck, L.S., "Implementation of the AEP Real-Time Monitoring System". *Proc. of the IEEE /PES Winter Meeting and Tesla Symposium*, New York, January 1976.
- [56] Bischke, R.F., "Power System State Estimation: Pratical Considerations". *Proc. of the IEEE /PES Summer Meeting*, Portland, Oregon, July 1981.
- [57] Lars Holten, Anders Gjelsvik, Sverre Aam, Felix F. Wu, Wen-Hsiung E. Liu, "Comparison of Different Methods for State Estimation". vol. 3, No. 4, pp. 1798-1806, Nov. 1988.

- [58] H. Singh and F. L. Alvarado, "Weighted Least Absolute Value state estimation using interior point methods," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 1478-1484, Aug 1994.
- [59] J.M.Ramírez, E.E. Barocio., "Solving State Estimation in Power Systems by an Interior Point method". *ELSEVIER- International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, no. 22, pp. 355-365, Jun 2000.
- [60] Faridoon Shababi, Nadipuran R. Prasad, Howard A.Smolleck, "A fuzzy-logicsupported weighted least squares state estimation". *ELSEVIER- Electric Power Systems Research* (39), pp. 55-60, 1996.
- [61] V. Miranda, Jorge Pereira, J. Tomé Saraiva, "Load Allocation in DMS with a Fuzzy State Estimator". *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 529-534, May 2000.
- [62] V. Miranda, J. Pereira, J. T. Saraiva, "Experiences in State Estimation Models for Distribution Systems Including Fuzzy Systems", *Proceedings of StockholmPower Tech*, Stockholm, Sweden, June 1995.
- [63] V. Miranda, M. Matos, J. T. Saraiva, "Fuzzy Load Flow - New Algorithms Incorporating Uncertain Generation and Load Representation". *10th PSCC*, Graz, August 1990; *Proceedings of the 10th PSCC*, Butterworths, London, 1990.
- [64] P. S. P. S. C. Vide, "Estimação de Estado de um Sistema Elétrico de Energia, usando medidas Fasoriais Sincronizadas", *Tese de Doutorado*, FEUP, 2013.
- [65] L. Wu and L. Xia, "Research on PMU/SCADA mixed measurements state estimation algorithm with multi-constraints," in *Electrical & Electronics Engineering (EEESYM)*, 2012 IEEE Symposium on, 2012, pp. 32-35.

- [66] M. Gol and A. Abur, "Observability analysis and critical measurement detection for power systems measured by PMUs," in Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012 IEEE PES, 2012, pp. 1-6.
- [67] X. Bei and A. Abur, "Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs," in Power Systems Conference and Exposition, 2004. IEEE PES, 2004, pp. 943-946 vol.2.
- [68] C. Rakpenthai, S. Premrudeepreechacharn, S. Uatrongjit, and N. R. Watson, "An Optimal PMU Placement Method Against Measurement Loss and Branch Outage," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 22, pp. 101-107, 2007.
- [69] S. Skok, et al., "Applications Based on PMU Technology for Improved Power System Utilization," in Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007, pp. 1-8.
- [70] S. Y. Fujii, "Impactos de PMU e Avanços Tecnológicos sobre Sistemas SEM (Estimador de Estado e Outras Aplicações)," XI Simpósio de especialistas em planejamento da operação e expansão elétrica, 2009.
- [71] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," Computer Applications in Power, IEEE, vol. 6, pp. 10-15, 1993.
- [72] D. G. Hart, et al., "PMUs - A New Approach to Power Network Monitoring," ABB Review, vol. 1/2001, pp. 58-61, 2001.
- [73] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Ledwich, and A. Ghosh, "A comparative study of the methods of inclusion of PMU current phasor measurements in a hybrid state estimator," in Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, 2010, pp. 1-7.

- [74] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, G. Ledwich, and A. Ghosh, "Inclusion of PMU current phasor measurements in a power system state estimator," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 4, pp. 1104-1115, 2010.
- [75] P. S. P. S. C. Vide, "A Estimação de Estado em sistemas electricos de energia", Tese de Mestrado, FEUP, 2005.
- [76] N. D. Rao and S. C. Tripathy, "A Variable Step Size Decoupled State Estimator," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 2, pp. 436-443, March 1979.
- [77] A. Monticelli and A. Garcia, "Reliable Bad Data Processing for Real-Time State Estimation," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 5, pp. 1126-1139, May 1983.
- [78] A. Garcia, A. Monticelli and P. Abreu, "Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing," in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 5, pp. 1645-1652, Sept. 1979.
- [79] G. H. Couch, "Improved power system state estimation with constant gain matrices," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 64, no. 11, pp. 1641-1643, Nov. 1976.
- [80] Reichart, K e Sullivan, A., "A Sistematic Study of State Estimation in Eléctric Power Systems". IFAC Symposium, Melbourn, February 1977.
- [81] I. M. M. A. F. d. Freitas, Prova de aptidão pedagógica e capacidade científica. Porto, 1986.
- [82] I.M. Ferreira, F.M. Barbosa. "Uma Visão Global da Estimação de Estado de S.E.E.", Proc. of 'Jornadas Luso-Espanholas de Engenharia Electrotécnica, July 7-9, 1999. Lisboa, Portugal.

- [83] C. Madtharad, S. Premrudeepreechacharn, N.R. Watson, D. Saenrak., "Measurement Placement Method for Power System State Estimation: Part I". IEEE, Vol. 3, 13-17 July 2003.
- [84] A. Ferreira; F. M. Barbosa, " DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM ESTIMADORES DE ESTADO", Sebenta do DEEC, FEUP, 2006.
- [85] Prewett, J.N.; Farmer, E.D.; Jervis, P. e Laing, W.D., "Studies in the Performance of State Estimation Techniques for Power Systems". Proceedings of the 5th PSCC Conference, Cambridge, September 1975.
- [86] Theil, G. e Muller, H., "Experiences from Performing State Estimation Tests Using Measurements of a Real Power System". Proceedings of the 6th PSCC Conference, Darmstad, August 1978.
- [87] Handschin, E.; Schweppe, F.C. e Fietcher, A., "Bad Data Analysis For Power System State Estimation". IEEE Trans. on PWRS, Vol. PAS-94, March / April 1975.
- [88] Muller, H., "An Approach to Supression of Unexpected Large Measurements Errors in Power Systems State Estimation". Proceedings of the 5th PSCC 1975.
- [89] Berenson, M.L. e Levine, D.M., "Basic Business Statitics". Prentice-Hall, New Jersey, 1992.
- [90] Dougherty, E.R., "Probability and Statitics for the Engineering, Computing and Phisical Sciences". Prentice-Hall, New Jersey, 1990.
- [91] Neter, J., Wasserman, W. e Whitmore, G. A., "Applied Statistics". Allyn and Bacon, Needham Heights, 1993.

- [92] Spiegel, M.R., "Theory and Problems of Probability and Statistics". McGraw-Hill, New York, 1977.
- [93] Ferreira, Isabel M. e Maciel Barbosa, F. P., "Metodologias de Detecção e Identificação de Erros grosseiros em Sistemas Eléctricos de Energia", 2ª Jornadas de Engenharia Eléctrica, Coimbra 1991.
- [94] Merrill, H.; Schweppe, F.C., "Bad Data Supression in Power System Static State Estimation". IEEE Trans. on PWRS, Vol. PAS-90, November / December, 1971.
- [95] Mili, L.; Van Cutsem, e Pavella, R., "Hipothesis Testing Identification". IEEE Trans. on PWRS, Vol. 103, nº 11, November 1984.
- [96] Mili, L.; Van Cutsem, Th. e Ribbens-Pavella, M., "Bad Data Identification Methods in Power System State Estimation - A Comparative Study". IEEE Trans. on PWRS, Vol. PAS-104, November 1985.
- [97] X. Nian-de, W. Shi-ying and Y. Er-keng, "A New Approach for Detection and Identification of Multiple Bad Data in Power System State Estimation," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 2, pp. 454-462, Feb. 1982.
- [98] Zhuang, F. e Balasubramanian, R., "Bad Data Supression in Power System State Estimation with a Variable Quadratic-Constant Criterion". IEEE Trans. on PWRS, Vol. PAS-104, nº4, April, 1985.
- [99] Soham, C., "Power System State Estimation and Observability Analysis using Artificial Nerural Networks". International Journal of Computer Technology & Applications, vol. 8(6), 688-698, November 2017. ISSN:2229-6093.

ANEXOS

ANEXO A

Equações do Filtro de Kalman

- Modelos
 - Estado
 - $x(k + 1) = f(x(k), k) + d(x(k), k)w(k)$
 - $E[w(k)] = 0; E[w(k)w^T(k)] = Q(k)\delta_{kl}$
 - Medidas
 - $z(k) = h(x(k), k) + v(k)$
 - $E[v(k)] = 0; E[v(k)v^T(l)] = R(k)\delta_{kl}$
 - $E[v(k)w^T(l)] = 0 \quad \forall_{k,l}$
- Condições Finais
 - $\bar{x}_0 = \hat{x}(0|0)$
 - $\Sigma_0 = \Sigma(0|0)$
 - $E[v(k)x^T(l)] = 0$
 - $E[w(k)x^T(0)] = 0, \forall_k$

Tabela A.1 – Equações das etapas de previsão e filtragem do filtro de Kalman.

Previsão	$\hat{x}(k k-1)$ $\Sigma(k k-1)$	$= f\hat{x}(k-1 k-1), k-1)$ $= F(k-1) \Sigma(k-1 k-1) F^T(k-1) + D(k-1)Q(k-1)D^T(k-1)$ $F(k-1) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right _{x=\hat{x}(k-1 k-1)}$ $D(k-1) = d(\hat{x}(k-1 k-1), k-1)$
Filtragem	$K(k)$ $\hat{x}(k k)$ $\Sigma(k k)$	$= \Sigma(k k-1)H^T(k) [H(k) \Sigma(k k-1) H^T(k) + R(k)]^{-1}$ $= \hat{x}(k k-1) + K(k)[z(k) - H(k)\hat{x}(k k-1)]$ $= [I - K(k)H(k)] \Sigma(k k-1)$ $H(k) = \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right _{x=\hat{x}(k k-1)}$

ANEXO B

Dados da Rede de Teste IEEE de 14 Barramentos

No presente anexo serão apresentados os esquemas unifilares e os dados relativos à rede IEEE de 14 barramentos, bem como o trânsito de potência obtido no programa PowerWorld Simulator, que deu origem aos dados necessários para a criação dos conjuntos de medidas utilizados nas simulações. É considerada uma potência de base de 100MVA.

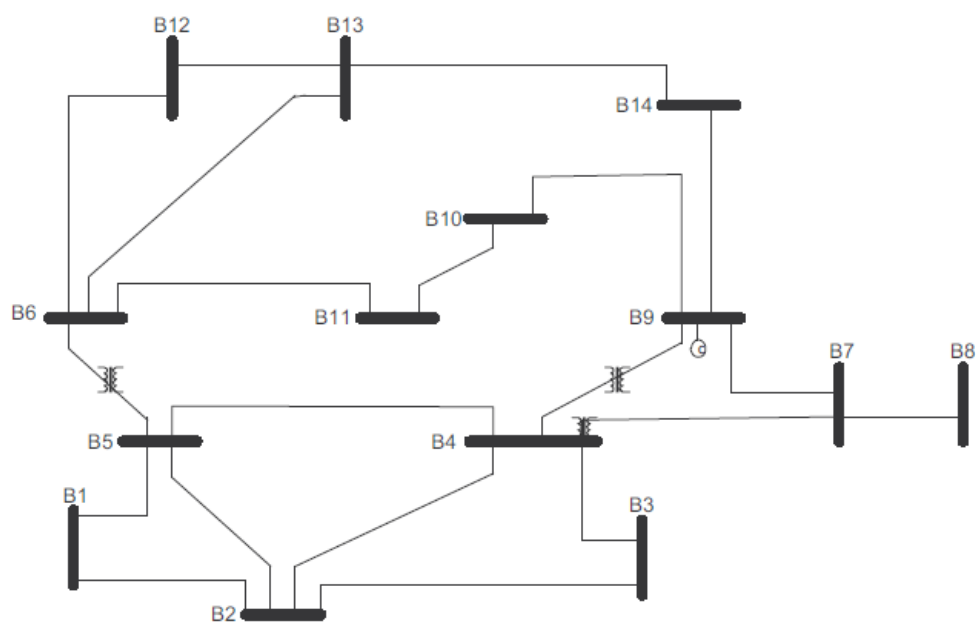


Figura B.1 – Esquema unifilar da rede de teste IEEE de 14 Barramentos.

Tabela B.1 – Dados e resultados do trânsito de potências – Rede IEEE de 14 Barramentos.

Barramento		Tensão		Produção		Carga	
N.º	Tipo	(p.u.)	(graus)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	Ref.	1,0600	0	232,45	-22,5	0	0
2	PV	1,0450	-4,95	40,0	30,73	21,7	12,7
3	PV	1,0100	-12,63	0	20,04	94,2	19,0
4	PQ	1,0261	-10,36	0	0	47,8	-3,9
5	PQ	1,0326	-8,94	0	0	7,6	1,6
6	PV	1,0700	-14,87	0	49,11	11,2	7,5
7	PQ	1,0448	-13,44	0	0	0	0
8	PV	1,0900	-13,45	0	27,96	0	0
9*	PQ	1,0277	-15,06	0	0	29,5	16,6
10	PQ	1,0276	-15,31	0	0	9,0	5,8
11	PQ	1,0450	-15,21	0	0	3,5	1,8
12	PQ	1,0530	-15,71	0	0	6,1	1,6
13	PQ	1,0462	-15,73	0	0	13,5	5,8
14	PQ	1,0175	-16,39	0	0	14,9	5,0

* Este barramento apresenta um shunt capacitivo de 0,19 p.u. (potência base 100 MVA)

Tabela B.2 – Dados das linhas – Rede IEEE de 14 Barramentos.

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
1	2	0,0194	0,0592	0,0264
1	5	0,0540	0,2230	0,0246
2	3	0,0470	0,1980	0,0219
2	4	0,0581	0,1763	0,0170
2	5	0,0570	0,1739	0,0173
3	4	0,0670	0,1710	0,0064
4	5	0,0134	0,0421	0,0000
6	11	0,0950	0,1989	0,0000
6	12	0,1229	0,2558	0,0000
6	13	0,0662	0,1303	0,0000
7	8	0,0000	0,1762	0,0000
7	9	0,0000	0,1100	0,0000
9	10	0,0318	0,0845	0,0000
9	14	0,1271	0,2704	0,0000
10	11	0,0820	0,1921	0,0000
12	13	0,2209	0,1999	0,0000
13	14	0,1709	0,3480	0,0000

Tabela B.3 – Dados dos transformadores – Rede IEEE de 14 Barramentos.

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Razão de transformação
i	j			
4	7	0,0000	0,20912	0,9780
4	9	0,0000	0,55618	0,9690
5	6	0,0000	0,25202	0,9320

ANEXO C

Dados da Rede de Teste IEEE de 118 Barramentos

Os esquemas unifilares e os dados relativos à rede IEEE de 118 barramentos, bem como o trânsito de potência obtido no programa PowerWorld Simulator, que deu origem aos dados necessários para a criação dos conjuntos de medidas utilizados nas simulações, são apresentados abaixo. É considerada uma potência de base de 100MVA.

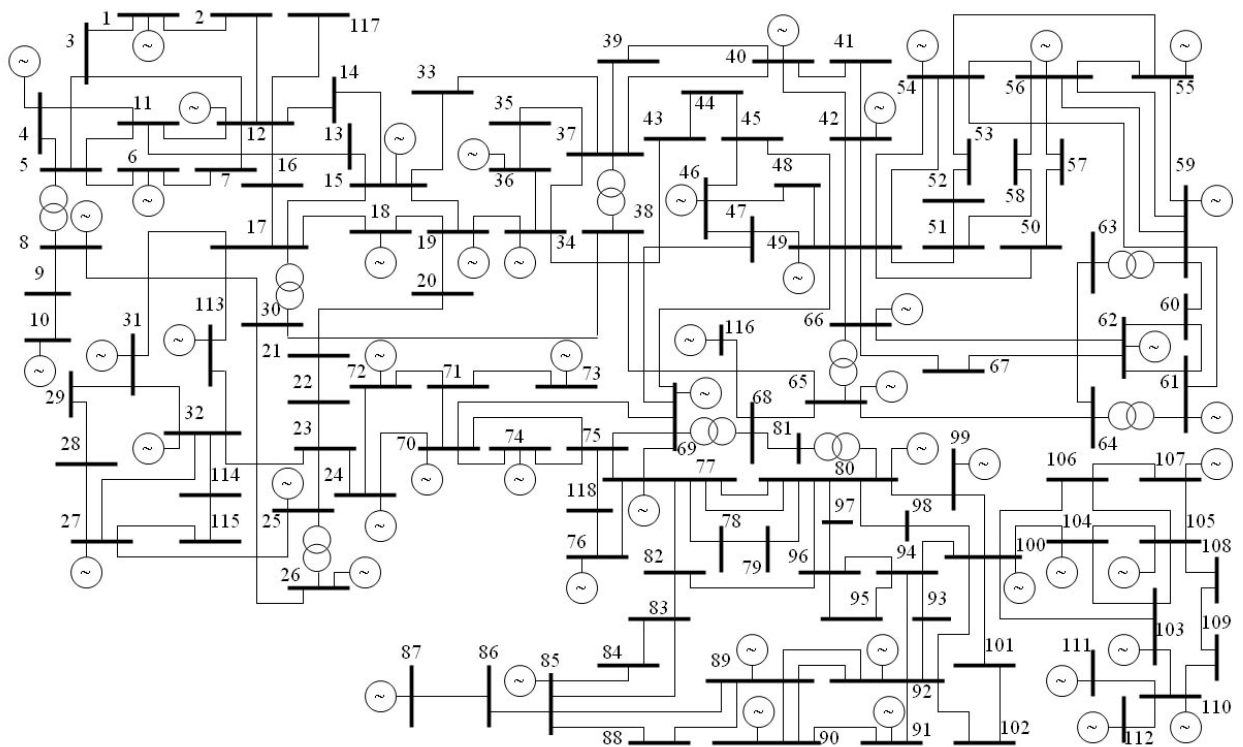


Figura C.1 – Esquema unifilar da rede de teste IEEE de 118 Barramentos.

Tabela C.1 – Dados e resultados do trânsito de potências – Rede IEEE de 118 Barramentos.

Barramento		Tensão barramento		Produção		Carga	
N.º	Tipo	(p.u.)	(graus)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	PQ	0,9572	-18,22	0,00	0,00	51,00	27,00
2	PQ	0,9722	-17,66	0,00	0,00	20,00	9,00
3	PQ	0,9690	-17,32	0,00	0,00	39,00	10,00
4	PV	0,9980	-13,59	-9,00	-15,51	30,00	12,00
5	PQ	1,0021	-13,15	0,00	0,00	0,00	0,00
6	PV	0,9900	-15,87	0,00	15,77	52,00	22,00
7	PQ	0,9893	-16,31	0,00	0,00	19,00	2,00
8	PV	1,0150	-8,13	-28,00	61,61	0,00	0,00
9	PQ	1,0428	-0,87	0,00	0,00	0,00	0,00
10	PV	1,0500	6,71	450,00	-50,88	0,00	0,00
11	PQ	0,9851	-16,15	0,00	0,00	70,00	23,00
12	PV	0,9900	-16,67	85,00	88,34	47,00	10,00
13	PQ	0,9682	-17,52	0,00	0,00	34,00	16,00
14	PQ	0,9836	-17,38	0,00	0,00	14,00	1,00
15	PV	0,9700	-17,65	0,00	2,71	90,00	30,00
16	PQ	0,9840	-16,98	0,00	0,00	25,00	10,00
17	PQ	0,9952	-15,19	0,00	0,00	11,00	3,00
18	PV	0,9730	-17,37	0,00	25,26	60,00	34,00
19	PV	0,9634	-17,82	0,00	-8,00	45,00	25,00
20	PQ	0,9581	-16,97	0,00	0,00	18,00	3,00
21	PQ	0,9587	-15,40	0,00	0,00	14,00	8,00
22	PQ	0,9698	-12,87	0,00	0,00	10,00	5,00
23	PQ	0,9997	-7,99	0,00	0,00	7,00	3,00
24	PV	0,9920	-8,23	-13,00	-13,87	0,00	0,00
25	PV	1,0500	-1,00	220,00	49,56	0,00	0,00
26	PV	1,0150	0,78	314,00	9,49	0,00	0,00
27	PV	0,9680	-13,45	-9,00	2,34	62,00	13,00
28	PQ	0,9616	-15,08	0,00	0,00	17,00	7,00
29	PQ	0,9632	-15,98	0,00	0,00	24,00	4,00
30	PQ	0,9859	-10,15	0,00	0,00	0,00	0,00
31	PV	0,9670	-15,82	7,00	3,96	43,00	27,00
32	PV	0,9637	-14,01	0,00	-14,00	59,00	23,00
33	PQ	0,9716	-18,13	0,00	0,00	23,00	9,00
34	PV	0,9859	-17,34	0,00	-8,00	59,00	26,00
35	PQ	0,9807	-17,75	0,00	0,00	33,00	9,00
36	PV	0,9800	-17,75	0,00	-1,73	31,00	17,00
37	PQ	0,9921	-16,86	0,00	0,00	0,00	0,00
38	PQ	0,9633	-12,09	0,00	0,00	0,00	0,00
39	PQ	0,9708	-19,47	0,00	0,00	27,00	11,00

Barramento		Tensão barramento		Produção		Carga	
N.º	Tipo	(p.u.)	(graus)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
40	PV	0,9700	-20,10	-46,00	25,29	20,00	23,00
41	PQ	0,9667	-20,20	0,00	0,00	37,00	10,00
42	PV	0,9850	-17,67	-59,00	21,91	37,00	23,00
43	PQ	0,9787	-17,51	0,00	0,00	18,00	7,00
44	PQ	0,9853	-15,22	0,00	0,00	16,00	8,00
45	PQ	0,9869	-13,46	0,00	0,00	53,00	22,00
46	PV	1,0050	-10,72	19,00	-5,68	28,00	10,00
47	PQ	1,0173	-8,58	0,00	0,00	34,00	0,00
48	PQ	1,0206	-9,26	0,00	0,00	20,00	11,00
49	PV	1,0250	-8,26	204,00	108,31	87,00	30,00
50	PQ	1,0015	-10,12	0,00	0,00	17,00	4,00
51	PQ	0,9676	-12,49	0,00	0,00	17,00	8,00
52	PQ	0,9576	-13,37	0,00	0,00	18,00	5,00
53	PQ	0,9463	-14,15	0,00	0,00	23,00	11,00
54	PV	0,9550	-13,09	48,00	-28,95	113,00	32,00
55	PV	0,9520	-13,51	0,00	1,11	63,00	22,00
56	PV	0,9546	-13,26	0,00	-8,00	84,00	18,00
57	PQ	0,9712	-12,31	0,00	0,00	12,00	3,00
58	PQ	0,9597	-13,12	0,00	0,00	12,00	3,00
59	PV	0,9850	-10,41	155,00	83,29	277,00	113,00
60	PQ	0,9932	-6,95	0,00	0,00	78,00	3,00
61	PV	0,9950	-6,06	160,00	-41,63	0,00	0,00
62	PV	0,9980	-6,79	0,00	0,60	77,00	14,00
63	PQ	0,9691	-7,22	0,00	0,00	0,00	0,00
64	PQ	0,9839	-5,56	0,00	0,00	0,00	0,00
65	PV	1,0050	-2,55	391,00	78,79	0,00	0,00
66	PV	1,0500	-3,30	392,00	16,80	39,00	18,00
67	PQ	1,0199	-5,69	0,00	0,00	28,00	7,00
68	PQ	1,0032	-2,62	0,00	0,00	0,00	0,00
69	REF	1,0350	0,00	503,24	-84,42	0,00	0,00
70	PV	0,9840	-7,11	0,00	6,60	66,00	20,00
71	PQ	0,9869	-7,49	0,00	0,00	0,00	0,00
72	PV	0,9800	-8,42	-12,00	-11,16	0,00	0,00
73	PV	0,9910	-7,70	-6,00	9,63	0,00	0,00
74	PV	0,9586	-8,08	0,00	-6,00	68,00	27,00
75	PQ	0,9682	-6,83	0,00	0,00	47,00	11,00
76	PV	0,9430	-7,86	0,00	0,78	68,00	36,00
77	PV	1,0117	-2,91	0,00	-20,00	61,00	28,00
78	PQ	1,0084	-3,29	0,00	0,00	71,00	26,00
79	PQ	1,0131	-3,16	0,00	0,00	39,00	32,00
80	PV	1,0400	-1,38	477,00	125,88	130,00	26,00
81	PQ	0,9967	-2,13	0,00	0,00	0,00	0,00

Barramento		Tensão barramento		Produção		Carga	
N.º	Tipo	(p.u.)	(graus)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
82	PV	1,0000	-3,00	0,00	21,86	54,00	27,00
83	PQ	0,9939	-2,06	0,00	0,00	20,00	10,00
84	PQ	0,9852	0,08	0,00	0,00	11,00	7,00
85	PV	0,9883	1,44	0,00	-8,00	24,00	15,00
86	PQ	0,9888	0,10	0,00	0,00	21,00	10,00
87	PV	1,0150	0,38	4,00	9,95	0,00	0,00
88	PQ	0,9891	4,20	0,00	0,00	48,00	10,00
89	PV	1,0050	8,00	607,00	-19,84	0,00	0,00
90	PV	0,9850	3,46	-85,00	44,42	78,00	42,00
91	PV	0,9800	3,70	-10,00	-19,06	0,00	0,00
92	PV	0,9978	4,44	0,00	-3,00	65,00	10,00
93	PQ	0,9912	1,21	0,00	0,00	12,00	7,00
94	PQ	0,9941	-1,14	0,00	0,00	30,00	16,00
95	PQ	0,9853	-2,23	0,00	0,00	42,00	31,00
96	PQ	0,9982	-2,55	0,00	0,00	38,00	15,00
97	PQ	1,0142	-2,31	0,00	0,00	15,00	9,00
98	PQ	1,0235	-2,72	0,00	0,00	34,00	8,00
99	PV	1,0100	-2,88	-42,00	-17,57	0,00	0,00
100	PV	1,0170	-1,72	252,00	75,46	37,00	18,00
101	PQ	0,9947	0,03	0,00	0,00	22,00	15,00
102	PQ	0,9954	2,87	0,00	0,00	5,00	3,00
103	PV	1,0063	-5,37	40,00	40,00	23,00	16,00
104	PV	0,9882	-8,25	0,00	23,00	38,00	25,00
105	PV	0,9824	-9,34	0,00	23,00	31,00	26,00
106	PQ	0,9726	-9,50	0,00	0,00	43,00	16,00
107	PV	0,9520	-12,06	-22,00	-8,68	28,00	12,00
108	PQ	0,9767	-10,39	0,00	0,00	2,00	1,00
109	PQ	0,9746	-10,79	0,00	0,00	8,00	3,00
110	PV	0,9729	-11,51	0,00	-8,00	39,00	30,00
111	PV	0,9800	-9,87	36,00	-1,66	0,00	0,00
112	PV	0,9750	-14,61	-43,00	41,74	25,00	13,00
113	PV	0,9930	-15,31	-6,00	34,41	0,00	0,00
114	PQ	0,9605	-14,34	0,00	0,00	8,00	3,00
115	PQ	0,9604	-14,34	0,00	0,00	22,00	7,00
116	PV	1,0050	-3,06	-184,00	50,34	0,00	0,00
117	PQ	0,9824	-16,71	0,00	0,00	20,00	8,00
118	PQ	0,9499	-7,77	0,00	0,00	33,00	15,00

Tabela C.2 – Dados das linhas – Rede IEEE de 118 Barramentos.

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
1	2	0,030000	0.099900	0,025400
1	3	0,012900	0,042400	0,010820
4	5	0,001760	0,007980	0,002100
3	5	0,024100	0,108000	0,028400
5	6	0,011900	0,054000	0,014260
6	7	0,004590	0,020800	0,005500
8	9	0,002440	0,030500	1,162000
8	5	0,000000	0,026700	0,000000
9	10	0,002580	0,032200	1,230000
4	11	0,020900	0,068800	0,017480
5	11	0,020300	0,068200	0,013800
11	12	0,005950	0,019600	0,005020
2	12	0,018700	0,061600	0,015720
3	12	0,048400	0,160000	0,040600
7	12	0,008620	0,034000	0,008740
11	13	0,022250	0,073100	0,018760
12	14	0,015000	0,070700	0,018160
13	15	0,074400	0,244400	0,062680
14	15	0,059000	0,195000	0,050200
12	16	0,022000	0,083400	0,021400
15	17	0,013200	0,043700	0,044400
16	17	0,045400	0,180100	0,046600
17	18	0,012300	0,050500	0,029800
18	19	0,011190	0,049300	0,011420
19	20	0,220000	0,170000	0,029800
15	19	0,012000	0,039400	0,010100
20	21	0,018300	0,084900	0,021600
21	22	0,020900	0,097000	0,024600
22	23	0,034200	0,159000	0,040400
23	24	0,013500	0,049200	0,049800
23	25	0,015600	0,080000	0,086400
26	25	0,000000	0,038200	0,000000
25	27	0,031800	0,163000	0,176400
29	31	0,010800	0,033100	0,008300
23	32	0,031700	0,115300	0,117300
31	32	0,029800	0,098500	0,025100
27	32	0,022900	0,075500	0,019260
15	33	0,038000	0,124400	0,319400
19	34	0,075200	0,247000	0,063200
35	36	0,002240	0,010200	0,002680
35	37	0,011000	0,049700	0,013180
33	37	0,041500	0,142000	0,036600
34	36	0,008710	0,026800	0,005680

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
34	37	0,002560	0,009400	0,009840
38	37	0,000000	0,037500	0,000000
37	39	0,032100	0,106000	0,027000
37	40	0,059300	0,168000	0,042000
30	38	0,004640	0,054000	0,422000
39	40	0,084000	0,060500	0,015520
40	41	0,014500	0,048700	0,012220
40	42	0,055500	0,183000	0,046600
41	42	0,041000	0,135000	0,034400
43	44	0,060800	0,245400	0,060680
34	43	0,041300	0,168100	0,042260
44	45	0,022400	0,090100	0,022400
45	46	0,040000	0,135600	0,033200
46	47	0,038000	0,127000	0,031600
46	48	0,060100	0,189000	0,047200
47	49	0,019100	0,062500	0,016040
42	49	0,071500	0,323000	0,086000
42	49	0,071500	0,323000	0,086000
45	49	0,068400	0,186000	0,044400
48	49	0,017900	0,050500	0,012580
49	50	0,026700	0,072000	0,018740
49	51	0,048600	0,137000	0,034200
51	52	0,020300	0,058800	0,013960
52	53	0,040500	0,163500	0,040580
53	54	0,026300	0,122000	0,031000
49	54	0,073000	0,289000	0,073800
49	54	0,086900	0,291000	0,073000
54	55	0,016900	0,070700	0,020200
54	56	0,002750	0,009550	0,007320
55	56	0,004880	0,015100	0,003740
56	57	0,034300	0,096600	0,024200
50	57	0,047400	0,134000	0,033200
56	58	0,034300	0,096600	0,024200
51	58	0,025500	0,071900	0,017880
54	59	0,050300	0,229300	0,059800
56	59	0,082500	0,251000	0,056900
56	59	0,080300	0,239000	0,053600
55	59	0,047390	0,215800	0,056460
59	60	0,031700	0,145000	0,037600
59	61	0,032800	0,500000	0,038800
60	61	0,002640	0,013500	0,014560
60	62	0,012300	0,056100	0,014680
61	62	0,008240	0,037600	0,009800
63	59	0,000000	0,036800	0,000000

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
63	64	0,001720	0,020000	0,216000
64	61	0,000000	0,002680	0,000000
38	65	0,009010	0,098600	1,046000
64	65	0,002690	0,030200	0,380000
49	66	0,018000	0,091900	0,024800
49	66	0,018000	0,091900	0,024800
62	66	0,048200	0,218000	0,057800
62	67	0,025800	0,117000	0,031000
63	59	0,000000	0,037000	0,000000
66	67	0,022400	0,015000	0,026820
65	68	0,001380	0,016000	0,638000
47	69	0,084400	0,277800	0,070920
49	69	0,098500	0,324000	0,082800
68	69	0,000000	0,037000	0,000000
69	70	0,030000	0,127000	0,122000
24	70	0,002210	0,411500	0,101980
70	71	0,008820	0,035500	0,008780
24	72	0,048800	0,196000	0,048800
71	72	0,044600	0,180000	0,044440
71	73	0,008660	0,045400	0,011780
70	74	0,040100	0,132300	0,033680
70	75	0,042800	0,141000	0,036000
69	75	0,040500	0,122000	0,124000
74	75	0,012300	0,040600	0,010340
76	77	0,044400	0,148000	0,036800
69	77	0,030900	0,101000	0,103800
75	77	0,060100	0,199900	0,049780
77	78	0,003760	0,012400	0,012640
78	79	0,005460	0,024400	0,006480
77	80	0,017000	0,048500	0,047200
77	80	0,029400	0,105000	0,022800
79	80	0,015600	0,070400	0,018700
68	81	0,001750	0,020200	0,808000
81	80	0,000000	0,037000	0,000000
77	82	0,029800	0,085300	0,081740
82	83	0,011200	0,366000	0,379600
83	84	0,063500	0,132000	0,025800
83	85	0,043000	0,148000	0,034800
84	85	0,030200	0,064100	0,012340
85	86	0,035000	0,123000	0,027600
86	87	0,028280	0,207400	0,044500
85	88	0,020000	0,102000	0,027600
85	89	0,023900	0,173000	0,047000
88	89	0,013900	0,071200	0,019340

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
89	90	0,051800	0,188000	0,052800
89	90	0,023800	0,099700	0,106000
90	91	0,025400	0,083600	0,021400
89	92	0,009900	0,050500	0,054800
89	92	0,039300	0,158100	0,041400
91	92	0,038700	0,127200	0,032680
92	93	0,025800	0,084800	0,021800
92	94	0,081000	0,158000	0,040600
93	94	0,022300	0,073200	0,018760
94	95	0,013200	0,034000	0,011100
80	96	0,035600	0,182000	0,049400
82	96	0,016200	0,053000	0,054400
94	96	0,026900	0,086900	0,023000
80	97	0,018300	0,093400	0,025400
80	98	0,023800	0,108000	0,028600
80	99	0,045400	0,206000	0,054600
92	100	0,064800	0,295000	0,077200
94	100	0,017800	0,058000	0,060400
95	96	0,017100	0,054700	0,014740
96	97	0,017300	0,088500	0,024000
98	100	0,039700	0,179000	0,047600
99	100	0,018000	0,081300	0,021600
100	101	0,027700	0,126200	0,032800
92	10	0,012300	0,055900	0,014640
101	102	0,024600	0,112000	0,029400
100	103	0,016000	0,052500	0,053600
100	104	0,045000	0,204000	0,054100
103	104	0,046600	0,158400	0,040700
103	105	0,053500	0,162500	0,040800
100	106	0,060500	0,229000	0,062000
104	105	0,009940	0,037800	0,009860
105	106	0,014000	0,054700	0,014340
105	107	0,053000	0,183000	0,047200
105	108	0,026100	0,070300	0,018440
106	107	0,053000	0,183000	0,047200
108	109	0,010500	0,028800	0,007600
103	110	0,039060	0,181300	0,046100
109	110	0,027800	0,076200	0,020200
110	111	0,022000	0,075500	0,020000
110	112	0,024700	0,064000	0,062000
17	113	0,009130	0,030100	0,007680
32	113	0,061500	0,203000	0,051800
32	114	0,013500	0,061200	0,016280
27	115	0,016400	0,074100	0,019720

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Susceptância / 2 (p.u.)
i	j			
114	115	0,002300	0,010400	0,002760
68	11	0,000340	0,004050	0,164000
12	117	0,032900	0,140000	0,035800
75	118	0,014500	0,048100	0,011980
76	118	0,016400	0,054400	0,013560

Tabela C.3 – Dados dos transformadores – Rede IEEE de 118 Barramentos.

Barramento		Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)	Razão de transformação
i	j			
5	8	0,0	0,0267	0,960
26	25	0,0	0,0820	1,110
30	17	0,0	0,0388	1,110
38	37	0,0	0,0375	1,110
63	59	0,0	0,0386	1,110
64	61	0,0	0,0268	0,910
65	66	0,0	0,0370	1,110
68	69	0,0	0,0370	0,900
81	80	0,0	0,0370	1,110

Tabela C.4 – Dados dos shunts do sistema – Rede IEEE de 118 Barramentos.

Barramento	Potência (MVar)	Susceptância (p.u.)
5	-40	-0,400
34	14	0,140
37	-25	-0,250
44	10	0,100
45	10	0,100
46	10	0,100
48	15	0,150
74	12	0,120
79	20	0,200
82	20	0,200
83	10	0,100
105	20	0,200
107	6	0,060
110	6	0,060

Tabela C.5 – Dados dos barramentos com regulação – Rede IEEE de 118 Barramentos.

Barramento	Tensão		Potência reativa produzida (MVar)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
a	0,90	1,10	-100	300
b	0,90	1,10	0	8
c	0,90	1,10	-5	15
d	0,90	1,10	-5	23
5	0,90	1,10	-5	30
12	0,90	1,10	-30	75
26	0,90	1,10	-300	600
55	0,90	1,10	-5	11
56	0,90	1,10	-5	11
69	0,90	1,10	-9999	9999
74	0,90	1,10	0	4
77	0,90	1,10	-10	38
105	0,90	1,10	-5	5
110	0,90	1,10	0	1
115	0,90	1,10	-250	525
PQ	0,95	1,10	0	0

Barramentos:

a = {4, 8, 10, 24, 25, 27, 31, 40, 42, 46, 54, 59, 61, 65, 66, 72, 73, 80, 87, 89, 90, 91, 99, 100, 107, 111, 112, 113} ;

b = {1, 62, 70, 76, 85, 92};

c = {19, 36, 103, 104};

d = {15, 18, 32, 34}