

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ELLEN MARA MEDEIROS NOGUEIRA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ABORDAGEM DESACOPLADA

CURITIBA

2019

ELLEN MARA MEDEIROS NOGUEIRA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ABORDAGEM DESACOPLADA

Tese aprovada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço
Coorientador: Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

N778e Nogueira, Ellen Mara Medeiros
Estimação de estados para sistemas de transmissão e distribuição
de energia elétrica via abordagem desacoplada [recurso eletrônico] /
Ellen Mara Medeiros Nogueira – Curitiba, 2019.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica.
Orientadora: Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço
Coorientador: Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli

1. Sistemas de energia elétrica – Estimação de estado. 2. Energia
elétrica – Distribuição. I. Universidade Federal do Paraná. II.
Lourenço, Elizete Maria. III. Tortelli, Odilon Luis. IV. Título.

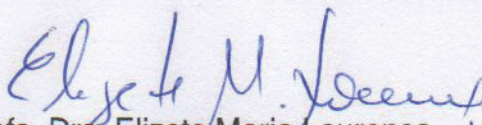
CDD: 621.3191

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585

TERMO DE APROVAÇÃO

ELLEN MARA MEDEIROS NOGUEIRA

ESTIMAÇÃO DE ESTADOS PARA SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA ABORDAGEM DESACOPLADA

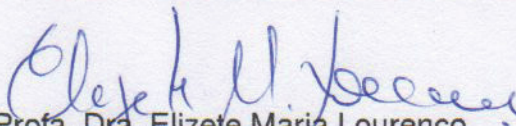


Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço
Orientadora

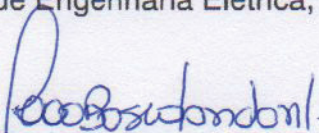


Prof. Dr. Odilon Luis Tortelli
Coorientador

Tese aprovada como requisito para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



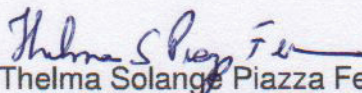
Profa. Dra. Elizete Maria Lourenço
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR



Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior
Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, USP



Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida
Departamento de Sistemas e Energia, UNICAMP



Profa. Dra. Thelma Solange Piazza Fernandes
Departamento de Engenharia Elétrica, UFPR

Curitiba, 30 de Agosto de 2019.

Aos professores e pesquisadores do nosso país.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais à minha orientadora e "mãe acadêmica", professora Elizete, pelo tratamento sempre cordial, positivo e sincero. Agradeço também por todas as conversas, dicas, sugestões, risadas, preocupações, troca de experiências, e principalmente, por ser o espelho de profissional que um dia eu gostaria de ser. Por me auxiliar e incentivar com grande empenho no meu crescimento profissional e pessoal ao longo desses 7 anos de parceria.

Agradeço também com grande satisfação ao professor Odilon pelo olhar cuidadoso e crítico quanto à pesquisa desenvolvida. Suas ideias e sugestões nos deu, por diversas vezes, a luz necessária para poder seguir.

Ao meu marido, Gilson, por ter sido fundamental nesse processo, sendo meu apoio e força em todos os momentos, mesmo com a distância durante grande parte do processo. Agradeço por sempre me fazer acreditar em meu potencial e me dar a energia para continuar.

Aos meus pais, Antonio e Mara, por não medirem esforços para me fazer chegar até aqui, e por acreditarem e confiarem nas minhas escolhas. Agradeço a Deus todos os dias por ter me colocado na vida de vocês.

Aos meus amigos e futuros doutores, Renan e Rodrigo. Vocês foram aqueles que mais entenderam minhas angústias e vitórias ao longo de tudo isso, e sei que eu também fui parte do processo de vocês. Agradeço pelas palavras amigas e experiências compartilhadas.

À minha amiga Karina pelos momentos de descontração e pelo "último gás" para concluir a pesquisa.

Aos meus amigos pesquisadores e companheiros de laboratório, Eduardo, Elis, Gabriel, Jefferson, João Paulo, Juciely, Leonel, Márcio, Tiago, Theoma e Thiago. Vocês foram as melhores companhias.

Aos professores João Bosco, Madson e Thelma, pelas importantes contribuições no processo de qualificação e conclusão do trabalho. Agradeço pela simplicidade, pelo cuidado com a leitura do trabalho, e por compartilharem as experiências e conhecimentos de vocês, os quais tomarei como exemplo.

Agradeço também a CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pelo auxílio financeiro durante o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe uma ferramenta para Estimação de Estados para Sistemas de Potência capaz de lidar com redes de distribuição e transmissão. A abordagem proposta combina técnicas desacopladas, normalização complexa por unidade, incorporação de medidas de fasor de corrente e uma representação de ramos de impedância nula para atender à crescente complexidade da Estimação de Estados quando associada aos sistemas elétricos emergentes. Propõe também a aplicação de técnicas de processamento de erros à Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (*EEG – DR*). Mesmo com o aumento da dimensão do problema, relacionado à modelagem detalhada da rede, a adoção de uma metodologia desacoplada permite uma redução no tempo computacional. Além disso, esse detalhamento permite uma metodologia com a capacidade de processar simultaneamente dados errôneos em medidas analógicas e erros de topologia. O resultado é uma ferramenta eficiente que pode lidar facilmente com a geração distribuída, circuito fechado ou operação em malha e manobras em sistemas de distribuição, mantendo a eficiência e a capacidade do Estimador de Estados Desacoplado Rápido para processar sistemas de transmissão.

Palavras-chaves: Estimação de Estados, Método Desacoplado Rápido, Sistemas de Distribuição, Sistemas de Transmissão, Normalização Complexa por Unidade, Medidas de Fasor de Corrente, Processamento de Erros.

ABSTRACT

This work proposes a Power System State Estimation capable to deal with distribution and transmission networks. The proposed approach combines decoupled techniques, complex per unit normalization, incorporation of current phasor measurements and a representation of null impedance branches to meet the increasing complexity of State Estimation when associated with emerging electrical systems. It also proposes the application of bad data processing techniques to the Fast Decoupled Generalized State Estimation (*FD – GSE*). Even with the increase in the size of the problem, related to detailed network modeling, the adoption of a decoupled methodology allows a reduction in computational time. In addition, this detail enables a methodology with the ability to simultaneously process bad data on analog measurements and topology errors. The result is an efficient tool that can easily handle distributed generation, closed loop or loop operation and maneuvering in distribution systems while maintaining the efficiency and ability of the Fast Decoupled State Estimator to process transmission systems.

Key-words: State Estimation, Fast Decoupled Method, Distribution Systems, Transmission Systems, Complex Per Unit Normalization, Current Phasor Measurements, Bad Data Processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – MODELO π PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	35
FIGURA 2 – MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE NOS RAMOS	65
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO TESTE DO χ^2	72
FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA FERRAMENTA	77
FIGURA 5 – SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO	82
FIGURA 6 – TEMPO COMPUTACIONAL PELO O NÚMERO DE SUBESTA- ÇÕES DETALHADAS	84
FIGURA 7 – INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS TESTE 14 BARRAS ESTENDIDO	85
FIGURA 8 – TEMPO COMPUTACIONAL DE SISTEMAS TESTE 14 BARRAS COMPOSTOS	86
FIGURA 9 – SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS	88
FIGURA 10 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO A1	89
FIGURA 11 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO A1	89
FIGURA 12 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO A2	90
FIGURA 13 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO A2	91
FIGURA 14 – SISTEMA TESTE DE 907 BARRAS	91
FIGURA 15 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO B	92
FIGURA 16 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO B	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CASOS SIMULADOS COM A EEG-DR	80
TABELA 2 – CASOS SIMULADOS COM EEG-DR COM <i>CPU</i>	81
TABELA 3 – CASOS SIMULADOS COM EEG-DR COM MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE	81
TABELA 4 – CASOS SIMULADOS PARA O PROCESSAMENTO DE ERROS NA EEG-DR	81
TABELA 5 – COMPARAÇÃO DAS MÉTRICAS PARA AS DIFERENTES FOR- MULAÇÕES ($X10^{-3}$)	84
TABELA 6 – RESUMO DA INTERCONEXÃO DOS SISTEMAS TESTE 14 BAR- RAS	86
TABELA 7 – PRECISÃO COM BASE EM MÉTRICAS DEFINIDAS ($X10^{-3}$) . .	93
TABELA 8 – IMPACTO DO ÂNGULO DE BASE NO NÚMERO DE ITERAÇÕES ATIVAS/REATIVAS	93
TABELA 9 – TEMPO COMPUTACIONAL (EM SEGUNDOS)	94
TABELA 10 – INFLUÊNCIA DAS MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE DESA- COPLADAS NOS ESTADOS ESTIMADOS (SEM ERRO ALEATÓ- RIO)	95
TABELA 11 – INFLUÊNCIA DAS MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE DESA- COPLADAS NOS ESTADOS ESTIMADOS (COM ERRO ALEATÓ- RIO)	97
TABELA 12 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^A . .	100
TABELA 13 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^A	100
TABELA 14 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^R . .	101
TABELA 15 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^R	101
TABELA 16 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO MÚLTIPLO EM Z_{7-50} .	102
TABELA 17 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO MÚLTIPLO EM Z_{7-50}	102
TABELA 18 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO DE EXCLUSÃO NO DISJUNTOR (13-64)	103
TABELA 19 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO DE EX- CLUSÃO NO DISJUNTOR (13-64)	103
TABELA 20 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO DE INCLUSÃO NO DIS- JUNTOR (52-55)	104

TABELA 21 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO DE INCLUSÃO NO DISJUNTOR (52-55)	104
TABELA 22 – ERROS GROSSEIROS SIMULADOS EM MEDIDAS CONVENCIONAIS	106
TABELA 23 – ERROS EM MEDIDAS: CONJUNTOS SUSPEITOS E VALORES DO COSSENO	106
TABELA 24 – ERROS EM TOPOLOGIA	108
TABELA 25 – ERROS EM TOPOLOGIA: CONJUNTOS SUSPEITOS E VALORES DO COSSENO	108
TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO	122
TABELA 27 – DADOS DE BARRA DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO	124
TABELA 28 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS . . .	128
TABELA 29 – DADOS DE BARRA DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS . . .	132

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

μ PMU Micro Unidade de Medida Fasorial

AMI Infraestrutura de Medição Avançada (do inglês, *Advanced Metering Infrastructure*)

EE Estimação de Estados

EEDR – *cpu* Estimação de Estados Desacoplada Rápida via *cpu*

EEG Estimação de Estados Generalizada

EEG – DR Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida

EEG – DRA Estimador de Estados Generalizada Desacoplada no Algoritmo

EEG – DRM Estimador de Estados Generalizada Desacoplada no Modelo

EESD Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição

EESP Estimação de Estados em Sistemas de Potência

GRL Grau de Redundância Global (do inglês, *Global Redundancy Level*)

IED Intelligent Electronic Devices

MMQP Métodos dos Mínimos Quadrados Ponderados

PMU Unidade de Medida Fasorial

SCADA Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (do inglês, *Supervisory Control and Data Acquisition*)

SD Sistema de Distribuição

cpu Normalização complexa por unidade

LISTA DE SÍMBOLOS

N_b	Número de barras
N_m	Número de medidas
z_m	vetor de quantidades medidas
z_0	vetor de "valores verdadeiros" das grandezas medidas
e_m	vetor de erros de medição
P_{fluxo}	Vetor das equações não lineares das medidas de fluxo de potência ativa
Q_{fluxo}	Vetor das equações não lineares das medidas de fluxo de potência reativa
P_{inj}	Vetor das equações não lineares das medidas de injeção de potência ativa
Q_{inj}	Vetor das equações não lineares das medidas de injeção de potência reativa
V_{mag}	Vetor das equações não lineares das medidas de magnitude de tensão
t_{op}	Vetor das equações não lineares das pseudomedidas de fluxo de potência ativa nula através dos ramos chaveáveis abertos
u_{op}	Vetor das equações não lineares das pseudomedidas de fluxo de potência reativa nula através dos ramos chaveáveis abertos
θ_{op}	Vetor das equações não lineares das pseudomedidas de diferença angular nula através dos ramos chaveáveis fechados
V_{op}	Vetor das equações não lineares das pseudomedidas de diferença de potencial nula através dos ramos chaveáveis fechados
X/R	Relação reatância sobre resistência
V	Vetor de magnitude de tensão nas barras e seções de barra
θ	Vetor de fase das tensões nas barras e seções de barra
t	Vetor de fluxo de potência ativa através dos ramos chaveáveis

u	Vetor de fluxo de potência reativa através dos ramos chaveáveis
\bar{z}	Vetor estendido de medidas na modelagem no nível de seção de barras
\bar{z}^A	Vetor estendido de medidas e pseudomedidas ativas
\bar{z}^R	Vetor estendido de medidas e pseudomedidas reativas
\bar{z}_m^A	Vetor estendido de medidas ativas
\bar{z}_m^R	Vetor estendido de medidas ativas
\bar{z}_{op}^A	Vetor de pseudomedidas operacionais ativas
\bar{z}_{op}^R	Vetor de pseudomedidas operacionais reativas
\bar{z}_{fluxo}^A	Vetor de medidas de fluxo de potência ativa
\bar{z}_{fluxo}^R	Vetor de medidas de fluxo de potência reativa
\bar{z}_{inj}^A	Vetor de medidas de injeção de potência ativa
\bar{z}_{inj}^R	Vetor de medidas de fluxo de potência reativa
$\bar{z}_{V_{mag}}$	Vetor de medidas de magnitude de tensão
$\bar{z}_{\theta_{op}}$	Vetor de pseudomedidas ativas de diferença angular nula através dos ramos chaveáveis fechados
$\bar{z}_{V_{op}}$	Vetor de pseudomedidas reativas de diferença de potencial nula através dos ramos chaveáveis fechados
$\bar{z}_{t_{op}}$	Vetor de pseudomedidas ativas de fluxo de potência nulo através dos ramos chaveáveis abertos
$\bar{z}_{u_{op}}$	Vetor de pseudomedidas reativas de fluxo de potência nulo através dos ramos chaveáveis abertos
P_k	Equação de injeção de potência ativa na barra k
Q_k	Equação de injeção de potência ativa (reativa) na barra k
t_{km}	Equação de fluxo de potência ativa nos ramos convencionais $k - m$
u_{km}	Equação de fluxo de potência reativa nos ramos convencionais $k - m$
t_{kl}	Equação de fluxo de potência ativa nos ramos chaveáveis $k - l$
t_{kl}	Equação de fluxo de potência ativa nos ramos chaveáveis $k - l$

Ω_k	Conjunto de barras adjacentes à barra k através de ramos convencionais
Γ_k	Conjunto de barras adjacentes à barra k através de ramos convencionais
$\bar{G}_{P\theta}$	Matriz ganho estendida $P\theta$
\bar{G}_{PV}	Matriz ganho estendida PV
$\bar{G}_{Q\theta}$	Matriz ganho estendida $Q\theta$
\bar{G}_{QV}	Matriz ganho estendida QV
ϕ_{base}	Ângulo de base
N_l	Número de linhas
α_{avg}	Relação X/R média, em <i>radianos</i>
γ_{avg}	Média entre a relação X/R máxima e mínima, em <i>radianos</i>
τ	Índice de fator de carregamento
X_i	Reatância da linha i
R_i	Resistência da linha i
Q_i	Injeção de potência reativa na barra i
P_i	Injeção de potência ativa na barra i
X_{cpu}	Reatância da linha, em <i>cpu</i>
R_{cpu}	Resistência da linha, em <i>cpu</i>
$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^A$	Vetor de medidas de fluxo de potência ativa em <i>cpu</i>
$\bar{z}_{inj[cpu]}^A$	Vetor de medidas de injeção de potência ativa em <i>cpu</i>
$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^R$	Vetor de medidas de fluxo de potência reativa em <i>cpu</i>
$\bar{z}_{inj[cpu]}^R$	Vetor de medidas de injeção de potência reativa em <i>cpu</i>
$\bar{z}_{Vmag[cpu]}$	Vetor de medidas de magnitude de tensão em <i>cpu</i>
\dot{I}_{km}	Fasor da corrente no ramo $k - m$
\dot{V}_k	Fasor da tensão na barra k
\dot{V}_m	Fasor da tensão na barra m

\tilde{I}_{km}	Fasor da corrente modificada no ramo $k - m$
$\tilde{h}_{\tilde{I}_{km}}^A$	Vetor estendido de equações da parte real que relacionam os estados às medidas do fasor da corrente modificada
$\tilde{h}_{\tilde{I}_{km}}^R$	Vetor estendido de equações da parte imaginária que relacionam os estados às medidas do fasor da corrente modificada
$\tilde{z}_{\tilde{I}_{km}}^A$	Vetor estendido de medidas da parte real do fasor da corrente modificada
$\tilde{z}_{\tilde{I}_{km}}^R$	Vetor estendido de medidas da parte imaginária do fasor da corrente modificada
\bar{r}^A	Vetor estendido de resíduos das medidas e pseudomedidas ativas
\bar{r}_m^A	Vetor estendido de resíduos das medidas ativas
\bar{r}_{op}^A	Vetor estendido de resíduos das pseudomedidas ativas
\bar{r}^R	Vetor estendido de resíduos das medidas e pseudomedidas reativas
\bar{r}_m^R	Vetor estendido de resíduos das medidas reativas
\bar{r}_{op}^R	Vetor estendido de resíduos das pseudomedidas reativas
$[\bar{r}^R$	$^N]$ Vetor de resíduos normalizados correspondente às medidas e pseudomedidas ativas
$[\bar{r}^R$	$^N]$ Vetor de resíduos normalizados correspondente às medidas e pseudomedidas reativas
$r_{m_i}^{AN}$	Resíduo normalizado da medida convencional ativa "i"
$r_{op_i}^{AN}$	Resíduo normalizado da pseudomedida operacional ativa i
$r_{m_i}^{RN}$	Resíduo normalizado da medida convencional reativa "i"
$r_{op_i}^{RN}$	Resíduo normalizado da pseudomedida operacional reativa i
$\Omega_{m_{ii}}^A$	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à medida ativa "i"
$\Omega_{op_{ii}}^A$	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à pseudomedida ativa "i"
$\Omega_{m_{ii}}^R$	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à medida reativa "i"

$\Omega_{op_{ii}}^R$	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à pseudomedida reativa "i"
Ω^A	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, o qual está associado às medida e pseudomedidas ativas "i"
Ω^R	Valor diagonal "ii" da matriz covariância, o qual está associado às medida e pseudomedidas reativas "i"
ε_k	Erro absoluto
$\bar{\varepsilon}$	Erro absoluto médio
σ	Desvio padrão
n_{SD}	Número de subestações detalhadas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	20
1.2	OBJETIVOS	22
1.2.1	Objetivo Geral	22
1.2.2	Objetivos Específicos	22
1.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
1.3.1	Estimação de Estados Desacoplada	23
1.3.2	Estimação de Estados Generalizada – Modelagem no Nível de Seção de Barras	24
1.3.3	Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição	25
1.3.4	Estimação de Estados Considerando Medidas de Corrente	28
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
1.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
2	ESTIMADOR DE ESTADOS PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	32
2.1	FORMULAÇÃO CLÁSSICA DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	32
2.1.1	Métodos Desacoplados	38
2.1.1.1	Estimador Desacoplado no Algoritmo	40
2.1.1.2	Estimador Desacoplado no Modelo	40
2.1.2	Processamento de Erros na Estimação Desacoplada	41
2.1.2.1	Teste do Máximo Resíduo Normalizado	42
2.1.2.2	Processamento de Erros via Método Desacoplado	43
2.2	MEDIDAS DE CORRENTE PARA O ESTIMADOR DE ESTADOS	44
2.3	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA	45
2.3.1	Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barras	45
2.3.2	Processamento de Erros pelo Teste Geométrico	48
2.3.2.1	Testes Geométricos	48
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
3	ESTIMADOR DE ESTADOS PROPOSTO	50
3.1	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA	51
3.1.1	EEG Desacoplado no Modelo	55
3.1.2	EEG Desacoplado no Algoritmo	57
3.2	NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA	59

3.2.1	Normalização Complexa por Unidade	59
3.2.2	Normalização Complexa por Unidade para Estimação de Estados	62
3.3	INCLUSÃO DE MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA	65
3.3.1	Medidas normalizadas de fasor de corrente modificada	67
3.4	PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA	69
3.4.1	Processamento de erros pelo teste do χ^2	71
3.4.2	Processamento de erros considerando os testes geométricos	73
3.5	FLUXOGRAMA DA FERRAMENTA	77
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	80
4.1	ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO	81
4.1.1	Sistema IEEE 14 barras com subestações detalhadas: 65 nós, 73 disjuntores	83
4.1.2	Impacto do número de SEs modeladas no esforço computacional	83
4.1.3	Impacto da dimensão do sistema no esforço computacional	85
4.2	ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO COM CPU	87
4.2.1	Caso A: Sistema teste 136 Barras	87
4.2.1.1	Caso A1: Configuração Radial	87
4.2.1.2	Caso A2: Configuração Malhada	88
4.2.2	Caso B: Sistema teste 907 barras	90
4.2.3	Análise do desempenho computacional	93
4.3	INCORPORAÇÃO DE MEDIDAS MODIFICADAS DE FASOR DE CORRENTE NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA	94
4.4	PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA	99
4.4.1	Processamento de erros na EEG-DR pelo teste do χ^2	99
4.4.1.1	Caso A: Erros Grosseiros em Medidas	100
4.4.1.2	Caso B: Erros de Topologia	102
4.4.2	Processamento de erros na EEG-DR pelo teste geométrico	104
4.4.2.1	Caso A: Erros Grosseiros em Medidas	105
4.4.2.2	Caso B: Erros de Topologia	107
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
5	CONCLUSÕES	110

		19
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
5.2	PUBLICAÇÕES	111
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS	113
	ANEXOS	120
ANEXO A	DADOS DO SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO	121
ANEXO B	DADOS DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS	127

1 INTRODUÇÃO

Em sistemas elétricos de potência, a avaliação da segurança é realizada através de duas funções básicas: a monitoração e a análise da segurança propriamente dita. Porém, para que essas duas tarefas sejam desempenhadas de forma satisfatória, é necessário que haja informações suficientes e confiáveis sobre o plano de medição do sistema visando encontrar o seu ponto atual de operação. Tal função é desempenhada pela Estimção de Estados em Sistemas de Potência (*EESP*).

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

O processo de estimção de estados constitui uma ferramenta computacional que tem como objetivo minimizar os erros provenientes das telemidas coletadas do sistema, fornecendo estimativas mais confiáveis para os estados da rede (usualmente, adota-se as tensões complexas em todas as barras do sistema), através de processamentos que levam em conta a redundância de informações.

A *EESP* foi proposta inicialmente em 1970 a partir da publicação de três artigos intitulados de Power System Static-State Estimation, partes I, II e III Schweppe (1970a), Schweppe e Rom (1970) e Schweppe (1970b). A estimção de estados processa um conjunto de medidas e, a partir da relação matemática entre os estados do sistema e as medidas disponíveis, gera um fluxo de carga em tempo real.

A formulação tradicional do problema de estimção de estados baseia-se na modelagem barra-ramo da rede elétrica, onde os arranjos das subestações são previamente determinados e seções de barras conectadas por chaves e disjuntores fechados são agrupadas formando uma única barra. Este procedimento evita a representação de chaves e disjuntores e, conseqüentemente, os problemas numéricos associados à utilização de valores atípicos de impedância para representar a posição fechada e aberta de tais dispositivos.

Em Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993b,a, 1999), soluções para modelagem exata de ramos chaveáveis (chaves e disjuntores) na formulação do problema de estimção de estados foram propostas, dando origem a Estimção de Estados Generalizada (*EEG*). Nessa nova abordagem chaves e disjuntores são explicitamente representados, mantendo a configuração da subestação na modelagem da rede e permitindo tanto a utilização das informações internas das subestações modeladas, tais como medidas de fluxo de potência através de disjuntores, como o processamento mais eficiente de erros na topologia da rede em estudo. Uma dificuldade associada a essa modelagem consiste no aumento expressivo da dimensão do problema, uma vez que para cada conjunto chave-disjuntor tem-se duas novas variáveis de estado, além de

um conjunto significativo de novas informações associadas aos status (aberto/fechado) desses dispositivos e às seções de barras internas das subestações modeladas.

O avanço constante da indústria de energia e as tecnologias associadas ao conceito de redes inteligentes têm impactado diretamente sobre a crescente complexidade da análise do sistema elétricos como um todo, e com especial ênfase nos sistemas de distribuição. Com isso, os setores relacionados aos sistemas de energia vêm sofrendo constantes mudanças, exigindo o desenvolvimento de novas ferramentas de suporte e processos de automação.

Os modelos clássicos dos sistemas de transmissão e distribuição apresentam diferentes características. Os sistemas de transmissão apresentam, em geral, balanceamento de cargas, topologia tipicamente malhada, alta tensão, alta relação reatância sobre resistência (X/R), além de uma grande quantidade de medidas disponíveis, o que justifica a consolidação da estimação de estados nesses setores. Já os sistemas de distribuição tradicionais são caracterizados por desbalanceamento de carga, topologia tipicamente radial, operação passiva (ausência de fontes geradoras), baixo nível de tensão (quando comparado aos níveis de transmissão), baixa relação X/R , e, até recentemente, baixa monitoração decorrente da escassez de unidades de medição.

Os avanços observados, motivados pelo advento das tecnologias *Smart Grid* e disseminação dos Geradores Distribuídos (*GD*), têm impactado de diversas formas na estrutura e operação dos sistemas elétricos como um todo. Se a concentração dos parques geradores nos sistemas de transmissão ditava uma operação passiva para os sistemas de distribuição, a disseminação de fontes de *GD* promove a transição para uma operação ativa das mesmas. Já o aumento constante das exigências por confiabilidade induz a busca por um melhor aproveitamento desses recursos distribuídos de geração, impactando na estrutura e operação desses sistemas, que tendem a se tornar menos radial, ou seja, mais malhada. Percebe-se, assim, o aumento da complexidade dos sistemas de distribuição e, conseqüentemente, a necessidade por ferramentas mais elaboradas de monitoração e controle. A nosso favor estão os avanços das tecnologias de medição digital e comunicação que culminaram no conceito de Infraestrutura de Medição Avançada (do inglês, *Advanced Metering Infrastructure*, *AMI*, que contemplam os sistemas de medição fasorial e as redes de comunicação por fibra ótica e internet, por exemplo.

Nesse novo cenário, o processo de estimação de estados para sistemas elétricos de potência se mantém como uma ferramenta fundamental para monitoração e controle dos mesmos. Também, a sua propriedade de detecção e identificação de erros é capaz de conferir robustez ao processo de modelagem em tempo real. A necessidade de desenvolvimento de algoritmos eficientes, capazes de contemplar as características desses sistemas e, ao mesmo tempo, os avanços estruturais e tecnológicos em andamento, são alguns dos motivadores desse trabalho de pesquisa.

Este trabalho aborda conjuntamente essas duas frentes de pesquisa, quais sejam:

- i)* estimação de estados para sistemas elétricos de transmissão e distribuição, que leve em conta as características de cada sistema e os avanços e tendências tecnológicas emergentes no setor;
- ii)* modelagem detalhada da rede numa abordagem desacoplada, visando a redução do esforço computacional e também sua aplicação para estimação de estados em sistemas de distribuição.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um estimador de estados para sistemas elétricos emergentes com capacidade de processar redes modeladas no nível de seção de barras, medidas de fasor de corrente, erros em medidas e de topologia, utilizando métodos desacoplados e normalização complexa por unidade.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Levantamento do estado da arte da *EESP* (Métodos desacoplados, modelagem no nível de seção de barras, incorporação de medidas de corrente, normalização complexa por unidade);
- Formulação e implementação do *EEG* Desacoplado Rápido (no modelo e no algoritmo);
- Formulação e implementação da normalização complexa por unidade (*cpu*) no estimador de estados desacoplado rápido (no modelo e no algoritmo);
- Formulação e implementação de rotinas de incorporação de medidas fasoriais de corrente;
- Formulação e implementação de rotinas de processamento de erros em medidas e de topologia;
- Simulações e testes para avaliação e validação das ferramentas propostas;
- Publicações dos resultados em congressos e periódicos científicos.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1 Estimação de Estados Desacoplada

Para auxiliar na eficiência computacional do processo de estimação de estados, faz-se necessária a fatoração da matriz ganho no algoritmo de solução através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. Porém, tal processo demanda muitas operações, e assim, sugeriu-se a exploração do desacoplamento $P\theta - QV$ e uso de matrizes constantes, tais como a matriz ganho G ou a matriz Jacobiana H . Observou-se a partir dessas considerações que os valores dos elementos presentes na matriz ganho obtida a partir da partida plana são relativamente próximos aos valores dos elementos da matriz obtidos na solução do problema, comprovando-se a efetividade dos métodos desacoplados.

Os primeiros esforços relacionados ao uso da ferramenta desacoplada se deram com Stott e Alsac (1974) para o fluxo de potência. O estudo aplica o princípio do desacoplamento relacionados ao uso da ferramenta desacoplada em métodos de fluxo de potência, aliviando o esforço computacional relacionado ao método através de aproximações nas matrizes do problema.

Em Horisberger, Richard e Rossier (1976) foi proposto o estimador de estados desacoplado rápido através do método dos mínimos quadrados para sistemas elétricos de grande porte. Levando em conta o desacoplamento $P\theta - QV$ dos sistemas de transmissão, o problema de estimação de estados foi subdividido em outros dois subproblemas, ativo e reativo, que consideram submatrizes fixas e simplificadas da matriz ganho. Já em Garcia, Monticelli e Abreu (1979), os autores propuseram uma nova abordagem da aplicação do desacoplamento $P\theta - QV$ ao estimador de estados desacoplado, com a apresentação de duas versões distintas, estimador desacoplado no modelo e no algoritmo, sendo considerado ainda o processamento de erros grosseiros.

Em Monticelli e Garcia (1990) propuseram uma alternativa aos estimadores desacoplados. Nessa abordagem, o desacoplamento não considera desprezar submatrizes como o método desacoplado tradicional e sim a adoção de um método em dois passos considerando as equações do método de Newton, sem maiores aproximações. Este método é mais robusto que a versão tradicional, com um comportamento melhor no processo de convergência, porém, as custas de um maior esforço computacional.

Em Lin e Teng (1996), um estimador de estados desacoplado é apresentado, utilizando restrições de igualdade e uma formulação baseada em equivalentes de medidas de corrente, convertidas a partir das medidas de fluxo de potência. Neste trabalho, são utilizadas coordenadas retangulares. O artigo ressalta que a formulação apresentada é robusta e não necessita grande armazenamento de memória já que adota matrizes constantes.

Um *EESD* baseado nos métodos desacoplados é relatado em Roy e Moham-

med (1997), onde uma transformação no modelo de medição é proposto. A aproximação é baseada na aplicação de uma transformação distinta para cada medida, tendo por resultado um problema transformado-desacoplado do *EESD*. A proposta fornece uma solução exata contanto que um modelo transformado distinto seja determinado a cada medida. No entanto, a aplicação de um modelo diferente para cada medição pode não ser prática e custosa computacionalmente como apontado pelos autores no artigo.

1.3.2 Estimação de Estados Generalizada – Modelagem no Nível de Seção de Barras

A modelagem para estimação de estados utilizada até o final da década de 80 era a barra-ramo. Buscando um avanço dos estudos desenvolvidos na estimação de estados para sistemas elétricos de potência iniciados por Schweppe (1970a), Schweppe e Rom (1970) e Schweppe (1970b), em Monticelli e Garcia (1991) e Monticelli (1993b,a) propôs-se a modelagem de ramos de impedância nula, tornando o processo de estimação de estados mais completo, capaz de representar informações de status de dispositivos de manobras, bem como aproveitar medidas internas disponíveis nas subestações. Nessa modelagem, os fluxos através dos ramos chaveáveis são tratados como novas variáveis de estado, eliminando os problemas advindos da adoção de valores atípicos de impedância para esses dispositivos.

Esses estudos abriram caminho para a Estimação de Estados Generalizada (*EEG*) proposto por Alsaç et al. (1998), permitindo uma modelagem mais detalhada da rede, no nível de subestação (ou no nível de seção de barras). Para a operação em tempo real, a principal dificuldade relacionada à modelagem da rede no nível de seção de barras é o aumento da dimensão do problema, já que os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis modelados e as tensões complexas nas seções de barra são incluídas como novas variáveis de estado.

Adicionalmente, as informações relacionadas aos status desses dispositivos são incluídas como novas equações no problema de *EEG*. Uma consequência direta desse aumento na dimensão do problema é o aumento expressivo do custo computacional quando da adoção dessa modelagem. Apesar do aumento da quantidade de variáveis de estado que essa modelagem ocasiona, obtém-se como vantagem a inclusão de novas informações (medidas de fluxo em disjuntores, injeção de potência nula em seções de barra, diferença angular e de potencial nulas em disjuntores fechados), além de permitirem um processamento mais eficiente de erros de modelagem na topologia de rede (LOURENÇO, 2001).

Também, a *EEG* permitiu o aprimoramento da sua capacidade de processar anomalias, como a nova geração de algoritmos de erros de topologia apresentadas na literatura tais como Clements e Simões Costa (1998), Lourenço (2001), Lourenço, Clements e Simões Costa (2002), Korres e Katsikas (2002), Gómez Expósito e Villa

Jaén (2001), Lourenco, Simões Costa e Clements (2004), Irving (2009) e Lourenço, Coelho e Pal (2015), uma vez que a modelagem de dispositivos de manobra (chaves e disjuntores) facilita a análise deste tipo de erro. A *EEG* permite a modelagem no nível de seção de barras de regiões de interesse, onde o status de chaves e disjuntores (ramos chaveáveis) são explicitamente representados.

A partir dos esforços aplicados para a evolução e consolidação da estimação de estados generalizada, em Clements e Simões Costa (1998) propôs-se uma formulação de um estimador de estados generalizado como um problema de otimização. Assim, as equações das medidas, as informações sobre os status dos disjuntores e as informações sobre barras de passagem e barras de referência são incluídas no problema como restrições de igualdade. Os multiplicadores de Lagrange associados aos status de chaves e disjuntores são normalizados e utilizados para processar erros de topologia.

Em Villa Jaén, Cruz Romero e Gómez Expósito (2005), o uso de um *EEG* trifásico local é proposto. Neste caso, o processamento da grande quantidade de informações ocasionada pela formulação trifásica é abordado, filtrando as informações das subestações antes que sejam transmitidas ao *EMS* (do inglês, *Energy Management System*). Dessa forma, é possível aproveitar a redundância da quantidade de informações de uma forma local.

Em Almeida (2007), uma formulação generalizada é proposta, apresentando o equacionamento para a extensão do problema considerando a modelagem trifásica. As simulações avaliam o desempenho da ferramenta em sistemas com cargas desbalanceadas e desequilíbrios na rede, e ressalta que essas características proporcionam uma maior precisão no estado estimado pois considera um maior detalhamento por fase. A formulação proposta aborda também a análise de observabilidade e o tratamentos de erros grosseiros.

Esses trabalhos ressaltam a relevância da modelagem detalhada da rede considerada na *EEG*.

1.3.3 Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição

O processo de Estimação de Estados foi inicialmente proposto para sistemas de transmissão, sendo assim a maior parte dos métodos formulados para esses sistemas. Além dos desafios relacionados às características inerentes às redes de distribuição, como a topologia radial típica, e menores proporções de X/R e níveis de tensão, a falta de medições foi apontada como o principal obstáculo para a aplicação de estimativa de estado do sistema de distribuição (*EESD*).

Os interesses na aplicação dessa ferramenta para sistemas de distribuição datam da década de 90 com Roytelman e Shahidehpour (1993), Baran e Kelley (1994),

Lu, Teng e Liu (1995) e Baran e Kelley (1995). Em Roytelman e Shahidehpour (1993), propõe-se uma abordagem por métodos estatísticos, utilizando um pequeno grupo de medidas remotas em “quase tempo real” através de informações sobre as subestações e a reconfiguração da rede. Em grande parte das formulações propostas, o Método dos Mínimos Quadrados é utilizada, sendo que em Baran e Kelley (1994) e Lu, Teng e Liu (1995) as tensões complexas nas barras compõem o vetor de variáveis de estados, e em Baran e Kelley (1995), as injeções de corrente.

Nas últimas duas décadas, no entanto, os Sistemas de Distribuição (*SD*) enfrentam mudanças significativas impulsionadas pela necessidade de integrar fontes de geração distribuída. O aumento da complexidade dos *SD* também se refletiu no desejo de estruturas mais confiáveis, que questionam a operação estritamente radial desses sistemas, como em Li, Yu e Bo (2009), Ren e Kezunovic (2010), Ruben et al. (2011) e Durce et al. (2012). Somadas às incertezas inerentes à produção da *GDs*, essas dificuldades demandam ferramentas complexas de computação de redes de distribuição, abrindo caminho para a *EESD*. Simultaneamente, o sistema de energia está enfrentando avanços significativos na infraestrutura de medição e controle, onde *PMU/μPMU* (Micro Unidade de Medida Fasorial) e uma nova geração de *IEDs* (do inglês, *Intelligent Electronic Devices*) estão se tornando disponíveis em níveis de tensão diferentes. Diversos trabalhos tem abordado a incorporação de *PMUs* nos estudos de estimação de estados e ferramentas associadas como em Phadke, Thorp e Karimi (1986), Phadke, Thorp, Nuqui et al. (2009), London Junior et al. (2009), Huang, Werner et al. (2012), Huang, Lu e Lo (2015), Meier et al. (2017) e Ni et al. (2018).

Além desses novos dispositivos, também os medidores inteligentes, associados à Infraestrutura de Medição Avançada, podem contribuir de forma significativa para o atendimento dos requisitos de observabilidade e dos níveis de redundância necessários para viabilizar a *EESD*, reforçando a importância de viabilizar-se o uso dessas fontes de informações na *EE*. Em Baran e McDermott (2009) os autores reforçam a relevância da inclusão do *AMI* no desempenho do *EESP* comparando-a com a formulação tradicional, onde o histórico de medição de carga (pseudomedidas) são praticamente as únicas fontes de informação. No entanto, a grande dimensão da rede de distribuição e o aumento da quantidade de dados/informação, tendem a sobrecarregar o processo *EESP* (HUANG; WERNER et al., 2012). Assim, conciliar a dimensão do problema com os requisitos de operação em tempo real está entre os desafios atuais dos pesquisadores e da indústria de energia para permitir a aplicação da *EESP* em diferentes níveis de tensão.

Em Singh, Pal e Jabr (2009) uma análise das abordagens existentes para a aplicação da *EESP* em sistemas de distribuição foi realizada. Diferentes abordagens têm sido propostas na literatura para possibilitar a estimativa do estado para sistemas de distribuição. Uma extensa revisão pode ser encontrada em Primadianto e Lu (2017),

onde os autores apontam que os algoritmos *EESD* baseados no Métodos dos Mínimos Quadrados Ponderados (*MMQP*) podem ser divididos em duas categorias principais, dependendo da escolha da variável de estado: tensões nas barras ou correntes nos ramos. O uso de coordenadas polares ou retangulares, a forma de inclusão de injeção nula nas barras, entre outras questões, gera um grande número de métodos em ambas as categorias. Também, os trabalhos que consideram a identificação e detecção de dados errôneos são comentados.

Para levar em consideração os desbalanceamentos de carga nos sistemas de distribuição, algumas abordagens adotam a representação trifásica no problema de estimação de estados. Na sequência são resgatadas algumas referências relevantes nesse tema.

Hansen e Debs (1995) propuseram uma modelagem de estimação de estados considerando o modelo trifásico da rede. Utilizou-se o método dos mínimos quadrados ponderados e as simulações foram realizadas em sistemas de transmissão e distribuição. Observou-se que para um desbalanceamento muito crítico, a metodologia apresenta grande melhora no desempenho do estimador através da obtenção de um ponto de operação mais próximo do real, sendo capaz de detectar se o desbalanceamento é crítico para o sistema em questão. O artigo ressalta que desbalanceamentos podem gerar um impacto negativo no desempenho do estimador de estados tradicionais que se utilizam apenas do modelo de sequência positiva do sistema.

Em Meliopoulos, Cokkinides e Stefopoulos (2005) afirma-se que o mau desempenho dos estimadores de estados em algumas situações se dá devido a simplificações na implementação, tal como medidas monofásicas e modelo de sequência positiva do sistema. O método apresentado demonstra que estes problemas podem ser corrigidos utilizando-se uma modelagem trifásica assimétrica do sistema, modelando também as medidas trifásicas e monofásicas. Combina também medidas do SCADA com medidas fasoriais trifásicas.

Em Almeida, Asada e Garcia (2006), além dos efeitos do desbalanceamento, apresentam-se também estudos considerando ilhas observáveis. Neste trabalho, mostra-se que o método dos mínimos quadrados ponderados falha na convergência, e em muitos casos, converge para o ponto de operação errado. Além disso, ao utilizar-se uma modelagem monofásica para um sistema originalmente trifásico, o condicionamento da matriz Jacobiana é afetado.

Em Fantin (2016), uma metodologia trifásica para a *EE* é apresentada, visando abordar as características atuais e futuras dos Sistemas de Distribuição. As simulações consideram particularidades dos *SD* normalmente encontradas na prática tais como sistemas desbalanceados e desequilibrados, e o tratamento de medidas obtidas pelo sistema SCADA, medidas virtuais, dados históricos e pseudo-medidas de carga dentre outras características.

As técnicas tradicionais que exploram o desacoplamento $P\theta - QV$ não são efetivas para sistemas de distribuição, devido baixa relação X/R desses sistemas. Para isso, os desenvolvimentos de Tortelli et al. (2015) para a aplicação na ferramenta de fluxo de potência, relacionados ao conceito de normalização complexa por unidade (*cpu*), permitem adequar os níveis de relação X/R de um sistema, tornando viável a aplicação de técnicas de desacoplamento. Os primeiros esforços associados à incorporação da *cpu* à estimação de estados foram propostos em Nogueira (2014) e Nogueira, Lourenço e Tortelli (2014) e mais tarde em Nogueira, Lourenço, Silva et al. (2016). Nestes trabalhos, o método desacoplado rápido é utilizado na estimação de estados para sistemas de distribuição e os resultados obtidos demonstraram a eficiência da técnica proposta. No entanto, esses se restringem à formulação do estimador de estados desacoplado no modelo.

Em Coelho et al. (2016), um simulador de medidas trifásico baseado em um fluxo de potência trifásico desacoplado é proposto. No algoritmo proposto, verifica-se inicialmente a necessidade ou não da aplicação da *cpu* para o sistema em estudo, permitindo, assim, processar redes de transmissão e distribuição indistintamente. Erros aleatórios são simulados e adicionados às medidas, de forma a auxiliar na preparação de planos de medição distintos que subsidiem estudos relacionados à estimação de estado trifásica.

Em Wu et al. (2018) o problema de incertezas e baixa redundância na *EE* em sistemas de distribuição foi estudado. O algoritmo adota o uso de medidas do SCADA e PMUs, aproveitando o uso total da maior quantidade de medidas possíveis. OS autores ressaltam também que estão trabalhando na ferramenta para considerar os desequilíbrios observados em sistemas de distribuição e no aprimoramento da ferramenta, visando a operação em tempo real.

Em Zamzam, Fu e Sidiropoulos (2019), o uso de dados históricos ou derivados de simulação são utilizados para treinar uma rede neural para "aprender a inicializar". Também é mostrado que o design criterioso da função de custo da rede neural ajuda a melhorar o desempenho geral do *EESD*.

1.3.4 Estimação de Estados Considerando Medidas de Corrente

Além dos pontos até aqui apresentados, a inclusão de medidas de corrente no processo de *EE* também apresenta dificuldades. Em Marinho, Machado e Bongers (1979), resalta-se que as medidas de correntes estão presentes nos sistemas elétricos em grande quantidade. Porém, devido aos problemas relacionados a inclusão dessas medidas no problema de estimação de estados, nem sempre essas são devidamente aproveitadas. Este estudo investiga a influência da inclusão dessas medidas na observabilidade e a possibilidade de detecção das medidas errôneas no conjunto.

Já em Teng, Liu e Lin (1999), propôs-se um estimador de estados desacoplado

utilizando medidas de corrente em coordenadas retangulares. Neste trabalho, obtém-se uma matriz ganho constante simétrica, o que posteriormente é separada em duas sub-matrizes ganho. O método dos mínimos quadrados ponderados é utilizado e os testes mostram que a metodologia tem grande potencial para operação on-line pois consegue lidar com valores iniciais nulos de medidas de corrente. O uso do desacoplamento permite ainda que a fatoração da matriz ganho seja realizada uma única vez.

Também, Abur e Gómez-Expósito (2004) dedica um capítulo do livro para apontar as dificuldades da incorporação de medidas de correntes na estimação de estados. Uma das principais dificuldades é que a medida de corrente não pode ser naturalmente desacoplada e associada às medidas de natureza ativa ou reativa, como acontece quando o desacoplamento $P\theta - QV$ é explorado.

Villa Jaén e Gómez-Expósito (2005) apresentaram uma abordagem implícita do estimador de estados generalizado utilizando medidas de corrente, e ainda, ressaltam as dificuldades relacionadas à incorporação dessas medidas em um estimador convencional. Como contribuição, as expressões para a matriz jacobiana são apresentadas. O estudo comprova que o uso de medidas de corrente auxilia na melhoria do resultado e na detecção de erros comparado ao estimador de estados quando essas medidas não são utilizadas.

Em Chakrabarti et al. (2010), três diferentes métodos de inclusão de medidas de corrente provindas de $PMUs$ no estimador de estados são investigadas. Uma formulação híbrida, isto é, que incorpora medidas convencionais e de $PMUs$ são apresentadas para os três métodos. Os autores investigam o problema de condicionamento numérico na matriz Jacobina do estimador decorrente da inserção de medidas de corrente, assim como o comportamento das matrizes ganho frente a essa inserção. As propriedades do resultado convergido e a variância dos estados estimados são tomados como parâmetros para avaliação do desempenho da metodologia apresentada.

Um novo algoritmo de $EESD$ que compreende medidas de magnitude de corrente incluídos como perdas foi proposto em Ju et al. (2017). A formulação é baseada na definição dos fluxos de potência ativo e reativo através de cada elemento do sistema de distribuição como novas variáveis de estado, além das tensões complexas em todas as barras. A Normalização Complexa por Unidade (cpu) e cálculo do ângulo de base, proposto em Tortelli et al. (2015), são aplicados para permitir uma solução desacoplada do problema ampliado. Considerando a dimensão dos SD , onde um único alimentador pode incluir milhares de linhas, a aplicação em tempo real da proposta pode ser comprometida, uma vez que um aumento significativo no tamanho do problema é percebido quando comparado com a Estimador de Estado Desacoplado Rápido tradicional.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 uma revisão da formulação do Estimador de Estados para Sistemas Elétricos de Potência realizada é apresentada. A formulação clássica através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados utilizando a modelagem barra-ramo da rede é contemplada, e, na sequência, o método desacoplado, considerando a formulação do estimador de estados desacoplado no modelo e no algoritmo. Em seguida, a *EEG* que considera a modelagem no nível de seção de barras é apresentada e, na sequência, fundamentos e alguns métodos para o processamento de erros que embasam o presente trabalho.

A partir da revisão dos tópicos relacionados ao desenvolvimento do trabalho no Capítulo 2, a formulação proposta é descrita no Capítulo 3. Nessa seção apresenta-se a formulação desacoplada da *EEG*, a aplicação da ferramenta para também para Sistemas de Distribuição, além do uso de medidas de fasores de corrente no plano de medição e o processamento de erros grosseiros em medida e de topologia.

No Capítulo 4, as principais simulações realizadas e resultados obtidos a partir da implementação das diferentes técnicas e abordagens propostas são apresentados e analisados. Sistemas de transmissão e distribuição, modelados no nível de seção de barras e barra-ramo são empregados para a avaliação da formulação proposta, além do processamento de erros grosseiros em medidas e de topologia.

O Capítulo 5 contém as considerações observadas através da conclusão da pesquisa.

1.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção buscou apresentar as dificuldades e também o interesse dos temas abordados nesse trabalho de doutorado. Este trabalho se propõe a aliar as técnicas de desacoplamento às técnicas de normalização complexa para viabilizar a Estimação de Estados desacoplada para sistemas de transmissão e distribuição. Essa abordagem contribui para viabilizar o processamento dessas redes em tempos computacionais compatíveis com a operação em tempo real, uma vez que alivia o alto custo computacional ocasionado pelo aumento da dimensão do problema, seja pelo elevado número de barras e variáveis de estado ocasionada pela modelagem no nível de seção de barras e/ou elevada quantidade de medidas/informações a serem processadas, provocadas pelo aumento da monitoração dos sistemas. Os desafios da representação de ramos de impedância nula aliados à técnica de normalização complexa e a incorporação das medidas de fasores de corrente, conforme proposto, vem claramente de encontro às necessidades do setor e participam das contribuições desse trabalho.

Além disso, os desenvolvimentos recentes no grupo de pesquisa em que o

trabalho está inserido em temas correlatos dão suporte e fundamentação ao trabalho proposto. Enquanto os problemas relacionados ao uso da metodologia desacoplada para sistemas com baixa relação X/R são contornados com a extensão do uso da normalização complexa por unidade para a abordagem trifásica, a proposta de representação da rede no nível de subestação, por exemplo, permite utilizar as informações correspondentes aos chaveamentos de ramos sem comprometer a precisão dos resultados obtidos. A adoção de medidas de fasores de corrente, por sua vez, aumenta a redundância do conjunto de medidas. Enquanto isso, o impacto das grandes dimensões do problema devido à maior quantidade de informações e dimensão dos sistemas de distribuição é aliviado pela eficiência e baixo custo da abordagem desacoplada.

2 ESTIMADOR DE ESTADOS PARA SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A Estimação de Estados (*EE*) desempenha papel fundamental na monitoração e controle dos sistemas. Desde o surgimento da ferramenta, o sistema elétrico tem sofrido constantes evoluções tais como o aumento da demanda, a mudança da topologia característica desses sistemas, além da busca pelo fornecimento de energia de forma eficiente e segura, priorizando a confiabilidade do sistema. Assim, os métodos de estimação de estados têm evoluído, buscando incorporar essas modificações e evoluções observadas desde que foi proposto, de forma a obter um ponto de operação fiel ao estado da rede.

Neste capítulo são apresentados os métodos e técnicas que servem como referência para este trabalho tais como a formulação clássica da *EE*, os métodos desacoplados, a modelagem de ramos chaveáveis, normalização complexa por unidade, a incorporação de medidas de corrente e o processamento de erros.

2.1 FORMULAÇÃO CLÁSSICA DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

A *EE* busca obter as tensões complexas em todas as barras do sistema. Na formulação clássica, realiza-se a minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos visando encontrar as estimativas para o vetor de estados que melhor se ajustam ao modelo de medição.

Considerando um sistema com N_b barras e N_m medidas e que os parâmetros do sistema são conhecidos, é possível determinar os fluxos de potência nas linhas e as injeções nas barras a partir das tensões complexas (variáveis de estado) em cada barra do sistema.

O conjunto de medidas e os erros de medição estão relacionados da seguinte forma:

$$z_m = z_0 + e_m \quad (2.1)$$

onde:

z_m é um vetor $N_m \times 1$ de quantidades medidas, que compõe o plano de medição (usualmente formado por magnitude de tensão nas barras, injeções de potência ativa e reativa, fluxos de potência ativa e reativa, corrente), sendo N_m o número de medidas ($N_m > (2N_b - 1) \times 1$);

z_0 é um vetor $N_m \times 1$ correspondente aos "valores verdadeiros" das grandezas medidas; e_m é um vetor $N_m \times 1$ que corresponde ao erro de medição (imprecisão dos medidores, erros de transformadores como instrumentos, erros de comunicação, efeitos de conversão analógico-digital).

Não é possível conhecer ou determinar de forma exata os valores verdadeiros dos estados do sistema, porém, faz-se possível sua estimação a partir de suposições referentes ao seu modelo de medição e a relação existente entre as quantidades medidas e os estados. Em geral, supõe-se que o erro de medição apresenta distribuição normal, com média zero ($E(e_m)=0$), sendo $E(\cdot)$ o valor esperado. A matriz de covariância R_m é usualmente uma matriz diagonal, dada por:

$$E(e_m e_m^t) = R_m \quad (2.2)$$

Sendo assim, o modelo de medição é descrito por (MONTICELLI, 1999):

$$z_0 = h_m(x) + e_m \quad (2.3)$$

onde:

x é um vetor $n \times 1$ de variáveis de estados, sendo $n = 2N_b - 1$ e N_b o número de barras do sistema;

$h_m(\cdot)$ é um vetor $N_m \times 1$ de funções não lineares que relaciona as quantidades medidas às variáveis de estado x .

O vetor dos valores verdadeiros das quantidades medidas pode ser representado através das funções não lineares, que tem como base as leis de Kirchhoff e a lei de Ohm, dada por:

$$z_0 = h_m(x) \quad (2.4)$$

Um fator importante para a estimação de estados é a redundância de medidas (ρ). Uma condição necessária, porém, não suficiente, é que a quantidade de medidas seja maior que a quantidade de estados, ou seja, $\rho > 1$. Esse fator propicia, além da estimação, a detecção e a identificação de medidas com erros grosseiros, isto é, medidas com grau de imprecisão muito maior do que é suportado no modelo de medição. A redundância global é definida por:

$$\rho \equiv \frac{N_m}{n} = \frac{N_m}{2N_b - 1} \quad (2.5)$$

Dentre as telemidas que compõem o conjunto de medidas, algumas delas podem ser pseudomedidas, ou seja, informações provenientes de estudos de previsão de carga ou resultadas de estimações anteriores. Porém, essas medidas apresentam um alto grau de incerteza, e por isso, é usual que as variâncias atribuídas às pseudomedidas sejam maiores que as das telemidas obtidas via *SCADA*. Para resolução do problema de estimação de estados para sistemas de transmissão uma das formulações possíveis de ser usada é a do método dos mínimos quadrados ponderados. Dessa forma, é possível determinar estimativas para o vetor de estados que melhor se ajustem ao modelo de medição.

O estimador pelo Método do Mínimos Quadrados Ponderados (*MMQP*) irá minimizar a função objetivo dada por (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

$$\min J(x) = [z_m - h_m(x)]^T \cdot R_m^{-1} \cdot [z_m - h_m(x)] \quad (2.6)$$

No ponto mínimo, as condições de otimalidade de primeira ordem precisam ser satisfeitas. Assim, pode-se dizer que:

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H(x)^T \cdot R_m^{-1} \cdot [z_m - h_m(x)] = 0 \quad (2.7)$$

onde:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (2.8)$$

Expandindo a função $g(x)$ através de série de Taylor em torno do vetor de estados x^k , tem-se que:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0 \quad (2.9)$$

Ignorando os termos de alta ordem, uma esquema de solução iterativa conhecida como Método de Gauss-Newton é dado por:

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} \cdot g(x^k) \quad (2.10)$$

onde:

k é o índice da iteração;

x^k é o vetor de solução na iteração k .

Assim, definem-se a matriz ganho e o vetor do lado direito do processo de estimação de estados:

$$G = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} = H^T(x^k) \cdot R_m^{-1} \cdot H(x^k) \quad (2.11)$$

$$T = g(x^k) = -H^T(x^k) \cdot R_m^{-1} \cdot [z_m - h_m(x^k)] \quad (2.12)$$

A equação (2.11), conhecida como matriz ganho, é uma matriz esparsa, simétrica e definida positiva se o sistema é observável. Neste caso, não é interessante inverter a matriz $G(x)$, devido ao custo computacional agregado a este processo, e por isso, é recomendável a sua decomposição por fatoração triangular e o sistema de equações lineares é solucionado através de um processo iterativo dado por (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

$$G \Delta x^{k+1} = T \quad (2.13)$$

O processo iterativo se encerra quando o critério de parada é atingido, ou seja, quando Δx for desprezível segundo uma tolerância pré-determinada, ou seja:

$$\max(\Delta x^k) \leq \varepsilon \quad (2.14)$$

Assim, o processo iterativo a ser resolvido através da equação (2.13) determina o incremento do vetor de estado Δx . A atualização do vetor de estados é dada através da equação (2.15):

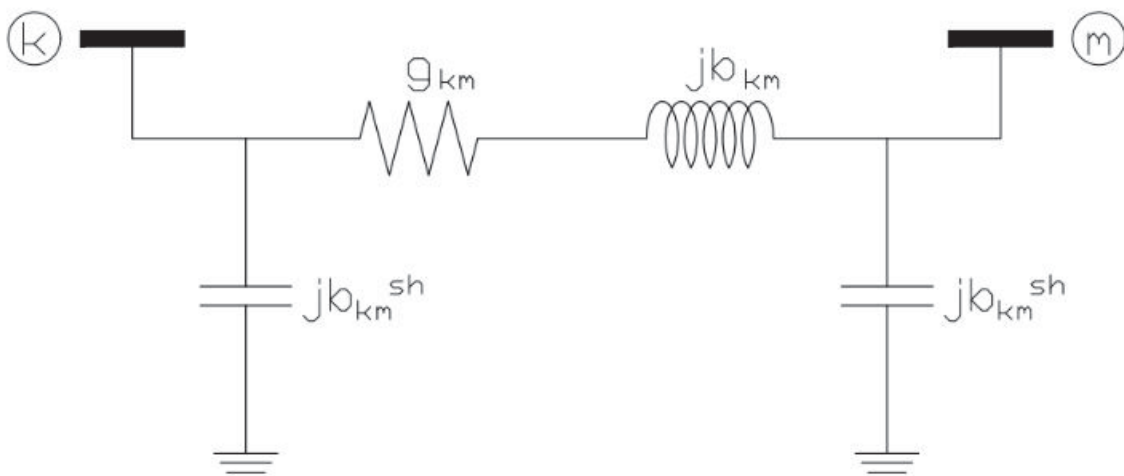
$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^{k+1} \quad (2.15)$$

O plano de medição utilizado deve ser tal que a configuração das quantidades medidas assegure a não singularidade da matriz H .

Na modelagem barra-ramo, assume-se que os status de chaves e disjuntores tenham sido processado previamente, de forma que a rede pode ser representada através de barras (agrupamento de nós e seções de barras eletricamente conectados) e ramos (linhas de transmissão e transformadores).

Na FIGURA 1 o modelo π da rede elétrica é representado:

FIGURA 1 – MODELO π PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO



Fonte: – O autor (2019)

A estimação de estados clássica adota a modelagem barra-ramo para a rede elétrica. Nesse caso, o vetor de estados é definido por:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

sendo:

θ e V vetores de dimensão $(N_b - 1) \times 1$ e $N_b \times 1$, respectivamente, correspondentes aos ângulos e magnitudes das tensões complexas nas barras.

Já o vetor de medidas z_m é definido por:

$$z_m = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^A \\ z_{inj}^A \\ z_{fluxo}^R \\ z_{inj}^R \\ z_{Vmag} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

sendo que:

z_{fluxo}^A e z_{fluxo}^R são os vetores de medidas ativas e reativas de fluxo de potência, respectivamente;

z_{inj}^A e z_{inj}^R são os vetores de medidas ativas e reativas de injeção de potência, respectivamente;

z_{Vmag} é o vetor de medidas de magnitude de tensão.

Eventualmente podem ser consideradas também medidas de magnitude da corrente através dos elementos da rede. No entanto, a inclusão dessas medidas exige cuidados especiais devido as dificuldades numéricas associadas as mesmas (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004). Assim, as funções não-lineares que relacionam os estados às medidas são dadas pelas equações (2.18) a (2.22) (MONTICELLI, 1999; ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004).

- Fluxo de potência ativa e reativa nos ramos convencionais:

$$P_{km} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.18)$$

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_{km}^{sh}) V_k^2 - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.19)$$

- Injeção de potência ativa e reativa nas barras:

$$P_k = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.20)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in \Omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.21)$$

- Magnitude de tensão nas barras

$$V_k = V_k \quad (2.22)$$

sendo:

P_{km} e Q_{km} são as equações não lineares de fluxo de potência ativa e reativa no ramo $k - m$, respectivamente;

P_k e Q_k são as equações não lineares de injeção de potência ativa e reativa na barra k , respectivamente;

V_k é a magnitude de tensão na barra k .

onde:

V_k e θ_k são a magnitude e o ângulo da tensão na barra k ;

$\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$ é a diferença angular entre as barras k e m ;

$g_{km} + jb_{km}$ é a admitância série do ramo que conecta as barras k e m ;

b_{km}^{sh} é a susceptância shunt conectada a barra k ;

$G_{km} + jB_{km}$ é o km -ésimo elemento da matriz admitância;

Ω_k são as barras diretamente conectadas a barra k .

As equações relativas às quantidades medidas são agrupadas de acordo com sua natureza, formando o vetor $h_m(x^k)$, dado por:

$$h_m(x^k) = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ Q_{fluxo} \\ P_{inj} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Assim, a matriz Jacobiana (H) é dada por (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

$$H(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} \\ 0 & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Conhecendo os vetores $h_m(\cdot)$ e z_m , montam-se as equações (2.11), (2.12) e (2.13) e o processo iterativo em busca do ponto de operação é iniciado (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

1. Início das iterações, com $k = 0$;
2. Inicializar o vetor x^k (flat start);
3. Calcular a matriz ganho $G(x^k)$ e o vetor do lado direito $T(x^k)$ da Equação Normal;
4. Resolver a equação (2.13) para a obtenção de Δx^k ;
5. Testar o critério de convergência através da equação (2.14), $\max(\Delta x^k) \leq \varepsilon$;
6. Se o critério for atendido, x^k é a solução. Se não, atualizar x^k pela equação (2.15) e voltar ao passo 3.

A partir da formulação clássica da EE , outras formulações surgiram, visando melhorar o desempenho, a robustez e/ou reduzir o tempo de processamento. Entre esses, estão os métodos desacoplados, descritos brevemente na próxima seção.

2.1.1 Métodos Desacoplados

Para auxiliar na eficiência computacional do processo de estimação de estados, sugere-se a fatoração da matriz ganho no algoritmo de solução através do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados. Porém, tal processo demanda muitas operações, e assim, sugeriu-se a exploração do desacoplamento $P\theta - QV$ e uso de matrizes constantes, tais como a matriz ganho G ou a matriz Jacobiana H . Observou-se a partir dessas considerações que os elementos presentes na matriz ganho obtida a partir da partida plana (*flat start*) são aproximados aos elementos da matriz com a solução convergida, indicando a possibilidade de uso de matriz ganho constante e, conseqüentemente, a possibilidade do uso de métodos desacoplados. Na formulação desacoplada rápida do problema de estimação de estados, as equações das medidas são divididas em dois grupos (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979):

- Medidas ativas (denotadas pelo sobrescrito A): medidas de injeção de potência ativa nas barras e medidas de fluxo de potência ativo nos ramos.
- Medidas reativas (denotadas pelo sobrescrito R): medidas de injeção de potência reativa nas barras, medidas de fluxo de potência reativo nos ramos e medidas de magnitude de tensão nas barras.

Conseqüentemente, o vetor de quantidades medidas é particionado, de forma que (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979):

$$z_m = \begin{bmatrix} z_m^A \\ z_m^R \end{bmatrix}; \quad (2.25)$$

Os vetores de medidas podem ser ainda expressos por:

$$z_m^A = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^A \\ z_{inj}^A \end{bmatrix}; z_m^R = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^R \\ z_{inj}^R \\ z_{Vmag} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

O vetor $h_m(x^k)$ é igualmente particionado e dado por:

$$h_m(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} h_m^A \\ h_m^R \end{bmatrix}; \quad (2.27)$$

onde:

$$h_m^A = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ P_{inj} \end{bmatrix}; h_m^R = \begin{bmatrix} Q_{fluxo} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Assim, o vetor de estados para o problema desacoplado é dado por:

$$x^A = [\theta]; x^R = [V]; \quad (2.29)$$

Representa-se então a matriz de covariância:

$$R_m = \begin{bmatrix} R_m^A & 0 \\ 0 & R_m^R \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Já a matriz Jacobiana das funções não lineares $h_m^A(x)$ e $h_m^R(x)$ correspondente a este modelo de medição é descrito conforme a equação (2.31):

$$H = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & H_{PV} \\ H_{Q\theta} & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

onde:

$H_{P\theta}$ e H_{PV} são as submatrizes da matriz de Jacobiana de medição relacionadas às equações de medição ativas ($h_m^A(x)$) com respeito aos ângulos e à magnitude de tensão nas barras, respectivamente, isto é:

$$H_{P\theta} = \frac{\partial h_m^A(x)}{\partial \theta} \quad (2.32)$$

$$H_{PV} = \frac{\partial h_m^A(x)}{\partial V} \quad (2.33)$$

$H_{Q\theta}$ e H_{QV} são as submatrizes da matriz de Jacobiana de medição relacionadas às equações de medição reativas ($h_m^R(x)$) com respeito aos ângulos e à magnitude de tensão nas barras, respectivamente, ou seja:

$$H_{Q\theta} = \frac{\partial h_m^R(x)}{\partial \theta} \quad (2.34)$$

$$H_{QV} = \frac{\partial h_m^R(x)}{\partial V} \quad (2.35)$$

O particionamento descrita impacta igualmente na matriz ganho, que pode ser descrita por:

$$G = \begin{bmatrix} G_{P\theta} & G_{PV} \\ G_{Q\theta} & G_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

onde:

$$G_{P\theta} = H_{P\theta}^T R_m^{-1} H_{P\theta} + H_{Q\theta}^T R_m^{R-1} H_{Q\theta} \quad (2.37)$$

$$G_{PV} = H_{P\theta}^T R_m^{A-1} H_{P\theta} + H_{Q\theta}^T R_m^{R-1} H_{Q\theta} \quad (2.38)$$

$$G_{Q\theta} = H_{PV}^T R_m^{A-1} H_{PV} + H_{QV}^T R_m^{R-1} H_{QV} \quad (2.39)$$

$$G_{QV} = H_{PV}^T R_m^{A-1} H_{PV} + H_{QV}^T R_m^{R-1} H_{QV} \quad (2.40)$$

É importante mencionar que em sistemas de transmissão, com nível de tensão maior ou igual a 230 kV, pode-se garantir que a relação X/R das linhas de transmissão é alta. Nessa situação, observa-se uma predominância das submatrizes $H_{P\theta}$ e H_{QV} sobre H_{PV} e $H_{Q\theta}$, e conseqüentemente, de $G_{P\theta}$ e G_{QV} sobre G_{PV} e $G_{Q\theta}$.

Explorando tais características, é possível obter dois tipos de estimadores: estimadores desacoplados no algoritmo e estimadores desacoplados no modelo (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979).

2.1.1.1 Estimador Desacoplado no Algoritmo

Nesse estimador considera-se um perfil plano de tensões ($V_k = 1\text{pu}$ e $\theta_k = 0^\circ$ para todas as barras) no cálculo das submatrizes $G_{P\theta}$ e G_{QV} e desprezam-se as submatrizes G_{PV} e $G_{Q\theta}$.

$$G_{P\theta}^{da} = H_{P\theta}^T R_m^{A^{-1}} H_{P\theta}^T + H_{Q\theta}^T R_m^{R^{-1}} H_{Q\theta}^T \quad (2.41)$$

$$G_{QV}^{da} = H_{PV}^T R_m^{A^{-1}} H_{PV}^T + H_{QV}^T R_m^{R^{-1}} H_{QV}^T \quad (2.42)$$

Dessa forma, as iterações do algoritmo são executadas conforme as equações (2.43) a (2.46).

$$G_{P\theta}^{da} \Delta \hat{x}_P^{k+1} = T_{P\theta}^{da}(\theta^k, V^k) \quad (2.43)$$

$$\hat{x}_P^{k+1} = \hat{x}_P^k + \Delta \hat{x}_P^{k+1} \quad (2.44)$$

$$G_{QV}^{da} \Delta \hat{x}_Q^{k+1} = T_{QV}^{da}(\theta^k, V^k) \quad (2.45)$$

$$\hat{x}_Q^{k+1} = \hat{x}_Q^k + \Delta \hat{x}_Q^{k+1} \quad (2.46)$$

sendo a equação (2.43) a $\frac{1}{2}$ iteração correspondente ao cálculo do incremento $\Delta\theta$ e a equação (2.45) a $\frac{1}{2}$ iteração correspondente ao cálculo do incremento ΔV .

Nessa versão, nenhuma aproximação é introduzida no vetor do lado direito, uma vez que:

$$T_{P\theta}^{da} = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^T \\ H_{Q\theta}^T \end{bmatrix} R_m^{-1} [z_m - h_m] \quad (2.47)$$

$$T_{QV}^{da} = \begin{bmatrix} H_{PV}^T \\ H_{QV}^T \end{bmatrix} R_m^{-1} [z_m - h_m] \quad (2.48)$$

Dessa forma, nessa abordagem as aproximações afetam apenas o processo de convergência do problema, preservando a precisão dos resultados obtidos.

2.1.1.2 Estimador Desacoplado no Modelo

Nesse modelo consideram-se aproximações no cálculo da matriz Jacobiana H , calculada para um perfil plano de tensões ($V_k = 1\text{pu}$ e $\theta_k = 0^\circ$ para todas as barras),

desprezam-se as submatrizes H_{PV} e $H_{Q\theta}$ e as resistências das linhas de transmissão são desprezadas na submatriz $H_{P\theta}$. Dessa forma, as iterações do algoritmo são executadas conforme as equações (2.49) a (2.52).

$$G_{P\theta}^{dm} \Delta \hat{x}_P^{k+1} = T_{P\theta}^{dm} \quad (2.49)$$

$$\hat{x}_P^{k+1} = \hat{x}_P^k + \Delta \hat{x}_P^{k+1} \quad (2.50)$$

$$G_{QV}^{dm} \Delta \hat{x}_Q^{k+1} = T_{QV}^{dm} \quad (2.51)$$

$$\hat{x}_Q^{k+1} = \hat{x}_Q^k + \Delta \hat{x}_Q^{k+1} \quad (2.52)$$

onde:

$$G_{P\theta}^{dm} = H_{P\theta}^T R_m^{A^{-1}} H_{P\theta}^T \quad (2.53)$$

$$G_{QV}^{dm} = H_{QV}^T R_m^{R^{-1}} H_{QV}^T \quad (2.54)$$

$$T_{P\theta}^{dm} = H_{P\theta}^T R_m^{A^{-1}} [z_m^A - h_m^A] \quad (2.55)$$

$$T_{QV}^{dm} = H_{QV}^T R_m^{R^{-1}} [z_m^R - h_m^R] \quad (2.56)$$

sendo a equação (2.49) a $\frac{1}{2}$ iteração correspondente ao cálculo do incremento $\Delta\theta$ e a equação (2.51) a $\frac{1}{2}$ iteração correspondente ao cálculo do incremento ΔV .

Ao contrário do modelo anterior, essa abordagem pode afetar a eficácia do processo de estimação. No entanto, diversos estudos e testes indicam que em sistemas de transmissão (Extra Alta Tensão ou Ultra Alta Tensão), essas modificações não comprometem os resultados obtidos (MONTICELLI; GARCIA, 1990).

O processo iterativo para solução do problema desacoplado no algoritmo ou no modelo se dá a partir da solução iterativa dos sistemas lineares apresentados em 2.1.1.1 ou 2.1.1.2, respectivamente, até que o critério de convergência seja atingido, ou seja, $\max(\Delta\theta) \leq \varepsilon$ e $\max(\Delta V) \leq \varepsilon$.

Existem formulações que desconsideram as resistências série nas matrizes H_{PV} e $H_{Q\theta}$, o que fornece as versões do método conhecidos como BX e XB, tal como as formulações apresentadas em (MONTICELLI; GARCIA, 1990).

Cabe ressaltar que as formulações desacopladas e suas versões apresentadas na literatura consideram a modelagem barra-ramo da rede.

2.1.2 Processamento de Erros na Estimação Desacoplada

Nesta seção, os fundamentos apresentados em (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979) para o processamento de erros grosseiros em medidas através dos índices $J(x)$ desacoplados e dos resíduos normalizados ligados à uma medida e/ou pseudomedida errônea são apresentados. Cabe ressaltar que na abordagem apresentada em (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979) o modelo barra-ramo da rede é adotado e, no que se refere ao processamento de erros, a topologia e os parâme-

tros são considerados corretos e apenas erros grosseiros em medidas são investigados.

2.1.2.1 Teste do Máximo Resíduo Normalizado

O teste do resíduo normalizado é comumente utilizado para detecção de erros grosseiros na EE de forma geral, sendo o resíduo normalizado definido por:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (2.57)$$

onde:

r é o resíduo da i -ésima medida;

Ω_{ii} é o i -ésimo elemento diagonal da matriz de covariância residual Ω , que por sua vez é definida por (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

$$\Omega = S \cdot R \quad (2.58)$$

sendo que:

$$S = 1 - H^T \cdot G^{-1} \cdot H \cdot R^{-1} \quad (2.59)$$

onde:

S é a matriz de sensibilidade;

Assim como a análise de observabilidade, a qual indica se a quantidade e posicionamento das medidas/informações disponíveis permitem (sistema observável) ou não (sistema não observável) dar prosseguimento ao processo de estimação de estados, a análise de criticidade do plano de medição é uma etapa fundamental e crucial para o processamento de erros. Nessa análise dois conceitos são fundamentais: medida crítica e conjunto crítico de medidas. Medida crítica é aquela que quando é eliminada do conjunto de medidas torna o sistema não-observável. Já o conjunto crítico de medidas é aquele composto por n medidas redundantes e que quando reduzido (perda de uma ou mais medidas) torna o conjunto crítico.

A matriz de covariância, Ω , contém informações fundamentais sobre a criticidade das medidas e pseudomedidas. Todos os elementos da coluna da matriz Ω correspondente a uma medida crítica serão nulos. Se duas medidas j e k formam um par crítico, as colunas da matriz Ω correspondentes à essas medidas serão linearmente dependentes. E ainda, os resíduos normalizados referentes à essas medidas serão iguais. Nesta situação, o erro associado poderá ser detectado, porém, não identificado (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004).

É possível demonstrar que, se todas as medidas e pseudomedidas no problema de EEG tiverem sido modeladas corretamente, exceto por um dado errôneo

(desde que este não esteja associado a uma medida crítica ou faça parte de um conjunto crítico), o resíduo normalizado associado à informação incorreta será maior ou igual ao de qualquer outra medida ou pseudomedida (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004). No entanto, não é possível garantir o mesmo comportamento para os resíduos normalizados quando há vários dados incorretos, o que indica a necessidade de um processamento mais elaborado para identificação dos erros grosseiros.

O teste de máximo resíduo normalizado verifica todas as medidas/pseudomedidas com $r^N < c$, sendo c uma tolerância escolhida (geralmente, adota-se 3,0), de forma que essas informações são adicionadas ao conjunto suspeito. A partir disso, uma medida com o maior resíduo normalizado é removida e o processo de EE é refeito. O mesmo processo é repetido até que não haja nenhuma medida/pseudomedida com $r^N < c$.

2.1.2.2 Processamento de Erros via Método Desacoplado

Assim como para a formulação tradicional, o processamento de dados errôneos na $EEDR$ foi apresentado em (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979). Neste artigo, os autores ressaltam que da mesma forma que para a formulação tradicional, o processamento de dados errôneos pode ser estendido para a formulação desacoplada, propiciando um aumento na eficiência computacional do problema.

O índice $J(x)$ pode ser representado de forma desacoplado, de modo que:

$$J(\hat{x}) = J^A(\hat{x}) + J^R(\hat{x}) \quad (2.60)$$

onde:

$J^A(x)$ e $J^R(x)$ representam os índices referentes ao conjunto de medidas ativas e reativas, respectivamente.

Na ausência de erros, os índices $J^A(x)$ e $J^R(x)$, representados pela parte ativa e reativa, respectivamente, devem ser menores que a distribuição χ^2 com $(m_A - n_\theta)$ graus de liberdade para a partição ativa sendo m_A a quantidade de medidas ativas e n_θ a quantidade de variáveis de estados a serem estimados para a partição ativa, ou seja, os ângulos para as $(N_b - 1)$ barras da rede, e $(m_R - n_V)$, sendo m_R a quantidade de medidas reativas e n_V a quantidade de variáveis de estados a serem estimados para a partição reativa, ou seja, os V para as N_b barras da rede.

Ainda como demonstrado em (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979), na presença de um erro grosseiro, o valor do índice correspondente à tal medida (ativa ou reativa) será muito maior quando comparado com o valor associado a outra parte. Da mesma forma, quando houver erros grosseiros tanto em medida ativa quanto em medida reativa, os dois índices apresentarão valores semelhantes. É importante ressaltar que os pontos observados neste estudo foram feitos considerando a modelagem barra-ramo da rede e, por consequência, apenas erros em medidas analógicas foram processados.

2.2 MEDIDAS DE CORRENTE PARA O ESTIMADOR DE ESTADOS

A busca por superar as dificuldades decorrentes da inclusão de medidas de corrente na formulação de medidas de corrente é antiga (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004), pois estas auxiliam a estender a observabilidade. Mas esses esforços foram renovados pela disponibilidade de medidas de fasores de corrente proveniente de unidades de medição fasorial e também por estarem disponíveis em maior quantidade nos sistemas de distribuição.

A inclusão dessas medidas e dificuldades associadas está bem discutida em Abur e Gómez-Expósito (2004), brevemente reportada nessa seção, devido ao interesse do tema para o presente trabalho.

Para um ramo que conecta os nós k e m , a equação (2.61) define a magnitude de corrente que flui nesse ramo:

$$I_{km} = [AV_k^2 + BV_m^2 - 2V_kV_m(C\cos\theta_{km} - D\sin\theta_{km})]^{1/2} \quad (2.61)$$

onde:

$$A = g_{km}^2 + (b_{km}^2 + b_{sh}^2)^2 \quad (2.62)$$

$$B = g_{km}^2 + b_{km}^2 \quad (2.63)$$

$$C = g_{km}^2 + b_{km}(b_{km} + b_{km}) \quad (2.64)$$

$$D = g_{km}b_{sh} \quad (2.65)$$

θ_{km} é a diferença entre o ângulo de tensão da barra k (θ_k) e o ângulo de tensão da barra m (θ_m);

g_{km} e $-b_{km}$ é a condutância e a susceptância série;

b_{sh} é $1/2$ susceptância shunt.

Quando a susceptância shunt de linha é desprezada, a equação passa a ser:

$$I_{km} = \sqrt{(g_{km}^2 + b_{km}^2)(V_k^2 + V_m^2 - 2V_kV_m\cos\theta_{km})} \quad (2.66)$$

Comparando com a equação (2.61), essa aproximação elimina o termo *seno*, sendo este o maior responsável por problemas quando se utilizam as medidas de corrente (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004). Quando o termo é desprezado a não linearidade da equação é reduzida. Assim, os termos da Jacobiana associados às medidas de magnitude de corrente são definidos por:

$$\frac{\partial I_{km}}{\partial V_k} = \frac{(g_{km}^2 + b_{km}^2)}{I_{km}}(V_k - V_m\cos\theta_{km}) \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial I_{km}}{\partial \theta_k} = \frac{(g_{km}^2 + b_{km}^2)}{I_{km}}(V_kV_m\sin\theta_{km}) \quad (2.68)$$

Uma outra alternativa apresentada na literatura é incluir no modelo do estimador de estados o quadrado da medida de magnitude de corrente, I_{km}^2 . Utilizando o quadrado da corrente, os termos da Jacobiana passam a ser definidos por:

$$\frac{\partial I_{km}^2}{\partial V_k} = 2(g_{km}^2 + b_{km}^2)(V_k - V_m \cos \theta_{km}) \quad (2.69)$$

$$\frac{\partial I_{km}^2}{\partial \theta_k} = 2(g_{km}^2 + b_{km}^2)(V_k V_m \sin \theta_{km}) \quad (2.70)$$

Considerando que as tensões são próximas de 1, 0pu e as aberturas angulares são pequenas, as equações (2.69) e (2.70) podem ser ainda aproximadas por (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004):

$$\frac{\partial I_{km}^2}{\partial V_k} \approx 2(g_{km}^2 + b_{km}^2)(V_k - V_m) \quad (2.71)$$

$$\frac{\partial I_{km}^2}{\partial \theta_k} \approx 2(g_{km}^2 + b_{km}^2)\theta_{km} \quad (2.72)$$

É possível observar que em caso de partida plana as equações (2.71) e (2.72) tendem à zero, exigindo medidas que contornem essa dificuldade.

Ainda, de acordo com as equações (2.71) e (2.72), medidas de corrente não podem ser acopladas ao subproblema ativo ou reativo (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004).

2.3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA

Na análise clássica em regime permanente em sistemas de potência utiliza-se a modelagem barra-ramo, onde os arranjos de subestações representados por chaves e disjuntores fechados são agrupados, formando uma única barra. Visando o aproveitamento de medidas no interior das subestações, bem como a obtenção de informações acerca dos status de dispositivos de manobras e, assim, melhorar a capacidade de processamento de erros inerentes à topologia da rede, surgiu a modelagem de ramos com impedância nula (MONTICELLI; GARCIA, 1990, 1991; MONTICELLI, 1993b,a), culminando, no final da década de 90, na Estimação de Estados Generalizada (*EEG*) (ALSAÇ et al., 1998).

2.3.1 Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barras

Em relação à formulação barra-ramo apresentada na Seção 2.1, a formulação para a *EEG* apresenta algumas modificações e extensões nos vetores do problema.

Assim, o vetor de estados da formulação generalizada é dado por (MONTI-

CELLI, 1999):

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_m \\ \bar{x}_{op} \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

sendo:

$$\bar{x}_m = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}; \quad \bar{x}_{op} = \begin{bmatrix} t \\ u \end{bmatrix}$$

sendo:

t e u são os vetores dos fluxos de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis modelados.

Observa-se na equação (2.73) que o vetor de estados para a formulação generalizada é aumentado para incluir os fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis como variáveis de estado.

A partir da inclusão dos fluxos de potência como novas variáveis de estado, medidas de fluxo de potência nos ramos chaveáveis também são adicionados ao problema e são funções dessas novas variáveis de estados, portanto definidas por:

$$\bar{z}_{t_{kl}} = t_{kl} + \epsilon_{t_{kl}} \quad (2.74)$$

$$\bar{z}_{u_{kl}} = u_{kl} + \epsilon_{u_{kl}} \quad (2.75)$$

Nesta formulação, tais medidas bem como pseudomedidas relativas ao status de chaves e disjuntores são adicionadas ao problema, de forma que (MONTICELLI, 1999):

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} \bar{z}_m \\ \bar{z}_{op} \end{bmatrix}; \quad (2.76)$$

onde:

z_{op} é o vetor das pseudomedidas referentes aos status dos disjuntores, correspondentes às condições de operação do sistema:

$$\bar{z}_{op} = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\theta_{op}} \\ \bar{z}_{t_{op}} \\ \bar{z}_{V_{op}} \\ \bar{z}_{u_{op}} \end{bmatrix} \quad (2.77)$$

sendo:

$\bar{z}_{t_{op}}$ e $\bar{z}_{u_{op}}$ são os vetores de pseudomedidas ativas e reativas de fluxo de potência nulo através dos ramos chaveáveis abertos;

$\bar{z}_{\theta_{op}}$ e $\bar{z}_{V_{op}}$ são os vetores de diferença angular nula e diferença de potencial nula através dos ramos chaveáveis fechados.

As equações que relacionam os estados às pseudomedidas operacionais são dadas pelas equações (2.78) a (2.81).

- Fluxo de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis aberto:

$$t_{km} = 0 \quad (2.78)$$

$$u_{km} = 0 \quad (2.79)$$

- Diferença de potencial nos ramos chaveáveis fechados:

$$V_{km} = V_k - V_m = 0 \quad (2.80)$$

- Diferença angular nos ramos chaveáveis fechados:

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_m = 0 \quad (2.81)$$

- As equações de medidas de injeção potência nas barras incidentes à ramos chaveáveis devem também se adequar à nova abordagem, de forma que:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} t_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (2.82)$$

$$Q_k = -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} u_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (2.83)$$

onde:

Ω_k é o conjunto de barras convencionais conectadas a barra k ;

Γ_k é o conjunto de seções de barras conectadas a barra k através de ramos chaveáveis.

Assim, o vetor $\bar{h}(x^k)$ que inclui a representação da rede no nível de seção de barras pode ser representado por:

$$\bar{h}(x^k) = \begin{bmatrix} \bar{h}_m(x^k) \\ \bar{h}_{op}(x^k) \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

Já a matriz Jacobiana correspondente, (\bar{H}) , é definida por:

$$\bar{H}(x^k) = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_m(x^k)}{\partial \theta} & \frac{\partial h_m(x^k)}{\partial V} & \frac{\partial h_m(x^k)}{\partial t} & \frac{\partial h_m(x^k)}{\partial u} \\ \frac{\partial h_{op}(x^k)}{\partial \theta} & \frac{\partial h_{op}(x^k)}{\partial V} & \frac{\partial h_{op}(x^k)}{\partial t} & \frac{\partial h_{op}(x^k)}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (2.85)$$

Numa representação mais detalhada, tem-se:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial t} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial t} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial u} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial t} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial t} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial t} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial u} \\ \frac{\partial \theta_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_{op}}{\partial t} & \frac{\partial \theta_{op}}{\partial V} & \frac{\partial \theta_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial V_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{op}}{\partial u} & \frac{\partial V_{op}}{\partial V} & \frac{\partial V_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial t_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial t_{op}}{\partial t} & \frac{\partial t_{op}}{\partial V} & \frac{\partial t_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial u_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial u_{op}}{\partial t} & \frac{\partial u_{op}}{\partial V} & \frac{\partial u_{op}}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (2.86)$$

sendo:

P_{fluxo} e Q_{fluxo} são os vetores das equações não lineares das medidas de fluxo de potência ativas e reativas, respectivamente;

P_{inj} e Q_{inj} são os vetores das equações não lineares das medidas de injeção de potência ativas e reativas, respectivamente;

V_{mag} é o vetor das equações não lineares das medidas de magnitude de tensão;

t_{op} e u_{op} são os vetores das equações não lineares das pseudomedidas de fluxo de potência ativa e reativa nula através dos ramos chaveáveis abertos, respectivamente;

θ_{op} e V_{op} são os vetores das equações não lineares das pseudomedidas de diferença angular nula e diferença de potencial nula, respectivamente, através dos ramos chaveáveis fechados.

Uma decorrência inevitável da representação explícita de ramos chaveáveis adotada na estimação de estados generalizada é o aumento da dimensão do problema e, conseqüentemente, do custo computacional associado à sua solução. Assim, é de extrema importância que se busquem alternativas que permitam que seu algoritmo seja eficiente e com rápido processamento para permitir sua aplicação à operação em tempo real.

2.3.2 Processamento de Erros pelo Teste Geométrico

Nesta seção, o teste geométrico, proposto em (LOURENÇO, 2001; LOURENÇO; CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 2002; LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004), é abordado. Essa formulação processa a rede no nível de seção de barras para a detecção e identificação de erros em medidas e na topologia.

2.3.2.1 Testes Geométricos

A estimação de estados generalizada foi formulada como um problema de otimização restrito permitindo determinar multiplicadores de Lagrange associados à medidas e restrições operacionais (CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 1998).

Uma interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange normalizados associados às medidas e às restrições operacionais foi proposta em Lourenço (2001), Lourenço, Clements e Simões Costa (2002), Lourenço, Simões Costa e Clements (2004) e Lourenço, Simões Costa et al. (2006) e amplamente explorada para o processamento de erros de topologia e de medidas na *EEG*.

Conforme demonstrado nessa interpretação geométrica, se um conjunto suspeito, S , for selecionado a partir do conjunto disponível de informações do sistema, é possível determinar se todas as informações errôneas foram incluídas neste conjunto suspeito. Isso se dá através verificação do cosseno do ângulo entre o vetor dos multiplicadores de Lagrange, λ , e sua projeção no espaço gerado pelas colunas de V correspondentes ao conjunto suspeito (onde V é a matriz de covariância dos

multiplicadores), conforme descrito a seguir.

O multiplicador de Lagrange, λ , está relacionado aos erros das medidas e pseudomedidas, ε , por (LOURENÇO; SIMÕES COSTA et al., 2006):

$$\lambda = V\varepsilon \quad (2.87)$$

A matriz V é particionada da seguinte forma (LOURENÇO; SIMÕES COSTA et al., 2006):

$$V = \begin{bmatrix} V_S & V_T & V_C \end{bmatrix} \quad (2.88)$$

onde:

V_S contém as colunas linearmente independentes de V em relação as informações suspeitas;

V_T corresponde a informação sem erro;

V_C corresponde as colunas com informações críticas.

Conforme mostrado em (LOURENÇO, 2001; LOURENÇO; SIMÕES COSTA; CLEMENTS, 2004; LOURENÇO; SIMÕES COSTA et al., 2006), se todas as informações errôneas estão no conjunto suspeito, o vetor de resíduos vai estar no mesmo espaço de V_S . É possível calcular o ângulo θ entre o vetor λ e as projeção ortogonal no espaço de V_S :

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{\lambda_S^T (V_S^T R V_S)^{-1} \lambda_S}{\lambda^T R^{-1} \lambda}} \quad (2.89)$$

O valor do cosseno de θ será próximo de 1,0 se todas as medidas/pseudomedidas errôneas estiverem no conjunto suspeito. Porém, se nenhuma medida/pseudomedida presente no conjunto suspeito for errônea, o valor do cosseno de θ será consideravelmente abaixo de 1,0.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do importante papel que a estimação de estados desempenha na operação de sistemas elétricos, exige-se a evolução da formulação clássica do problema, tornando-a capaz de incorporar as mudanças observadas no sistema elétrico ao longo dos anos. As técnicas desacopladas auxiliam na velocidade computacional do método e por isso, uma alternativa para a operação em tempo real.

Outra modelagem importante como a inclusão de ramos chaveáveis torna possível o uso de informações relevantes para a *EE*, principalmente para estudos de identificação de erros e observabilidade, facilitando a verificação de informações.

3 ESTIMADOR DE ESTADOS PROPOSTO

A evolução dos sistemas de distribuição ditada pelos avanços das tecnologias *Smart Grid* e, por consequência, o aumento da monitoração e mudanças na topologia dessas redes (com frequentes operações em anel (HUANG; WERNER et al., 2012)), tem tornado a *EE* uma ferramenta atrativa e necessária para operação e controle neste segmento do sistema elétrico.

A eficácia dos métodos desacoplados para *EE* está associada à baixa sensibilidade $P - V$ e $Q - \theta$ observada em sistema de transmissão. Isso se deve aos altos níveis da relação X/R característicos das linhas de transmissão. Já as linhas de distribuição apresentam, tipicamente, baixas relações X/R , dificultando o uso de métodos desacoplados. A Normalização Complexa por Unidade (*cpu*), proposta em Durce et al. (2012) e Tortelli et al. (2015), permite elevar artificialmente a relação X/R de sistemas de distribuição. Aliando a *cpu* à estimação de estados desacoplada rápida, apresenta-se neste trabalho a Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição Desacoplada Rápida via *cpu* (*EEDR - cpu*).

Conforme apresentado em detalhes nesse capítulo, a ferramenta proposta também alia o alto desempenho computacional de métodos desacoplados à modelagem da rede no nível de seção de barras, resultando na Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (*EEG - DR*). A adequação do método desacoplado à formulação da *EEG* reduz de forma significativa o custo computacional associado a modelagem detalhada da rede, tornando-a compatível com a operação em tempo real. Da mesma forma, a formulação permite que a maior quantidade de medidas em sistemas de transmissão seja processada, considerando que nesse nível de tensão, as subestações possuem arranjos mais complexos. Já nos sistemas de distribuição, onde os arranjos das subestações são mais simples, mas o uso da abordagem desacoplada permite lidar com a maior quantidade de nós que esses sistemas possuem, que podem chegar a milhares de barras.

Além disso, uma ferramenta para o processamento de erros na *EEG - DR* combinando o uso dos resíduos normalizados e o teste geométrico é proposto, visando um método capaz de processar erro de modelagem sem fazer suposições prévias sobre a topologia de rede ou sobre medições analógicas. Este capítulo apresenta a formulação detalhada da ferramenta proposta que engloba as principais contribuições desse trabalho.

3.1 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA

Esta seção apresenta uma nova formulação para o Estimador de Estados Generalizado (*EEG*), que explora plenamente as técnicas de desacoplamento disponíveis na literatura. A Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida proposta (*EEG – DR*), reduz significativamente a carga computacional elevada imposta pela modelagem no nível de seção de barras adotado na abordagem generalizada, carga essa ocasionada pelo aumento no número de variáveis de estado e à inclusão das equações que modelam os status dos ramos chaveáveis, conforme discutido na Seção 2 do Capítulo 2.

Como no *EEG* apresentado na literatura, o *EEG – DR* proposto é centrado na extensão do vetor de estado para incluir o fluxo de potência através de ramos chaveáveis como novas variáveis de estado, juntamente com a magnitude e a fase das tensões nas seções de barras internas das subestações (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993b, 1999; ALSAÇ et al., 1998). Na abordagem proposta, no entanto, o vetor estendido é particionado de acordo com a natureza ativa e reativa das variáveis de estado, tanto as convencionais quanto as novas variáveis de estado, isto é:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}^A \\ \bar{x}^R \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo:

$$\bar{x}^A = \begin{bmatrix} \theta \\ t \end{bmatrix}; \quad \bar{x}^R = \begin{bmatrix} V \\ u \end{bmatrix}$$

onde:

V e θ são os vetores de magnitude e fase das tensões nas barras e seções de barra, respectivamente;

t e u são os vetores de fluxo de potência ativa e reativa através dos ramos chaveáveis, respectivamente.

As informações a respeito dos status dos ramos chaveáveis são incluídas na formulação do problema como pseudomedidas. Portanto, se um ramo chaveável conectado entre os nós k e l está fechado, tanto a diferença de potencial quanto a diferença angular através deste dispositivo são nulas, ou seja, $\theta_k - \theta_l = 0$ e $V_k - V_l = 0$. Por outro lado, se o dispositivo estiver aberto, os fluxos de potência ativa e reativa através dele é que são nulos, ou seja, $t_{kl} = 0$ e $u_{kl} = 0$.

Enquanto a modelagem no nível de seção de barras estende o vetor de medidas z de forma a contemplar medidas convencionais e as pseudomedidas operacionais de disjuntores fechados e abertos, descritas acima, a abordagem desacoplada agrupa essas informações de acordo com sua natureza ativa ou reativa, de forma que o vetor

estendido de medidas na modelagem no nível de seção de barras, \bar{z} , é dado por:

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} \bar{z}^A \\ \bar{z}^R \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde:

\bar{z}^A (\bar{z}^R) é o vetor estendido de medidas e pseudomedidas ativas (reativas).

Como utilizado anteriormente, o sobrescrito A e R denotam as informações de natureza ativa e reativa. Além disso, nas equações que seguem, o subscrito m é correspondente às medidas convencionais e o subscrito op se refere às pseudomedidas operacionais. Assim, define-se \bar{z}_m^A (\bar{z}_m^R) como o vetor estendido de medidas ativas (reativas), e \bar{z}_{op}^A (\bar{z}_{op}^R) como o vetor de pseudomedidas operacionais ativas (reativas) - diferença de ângulo nulo (queda de tensão zero) de dispositivos fechados e fluxos de potência ativos (reativos) de dispositivos abertos. Dessa forma, os vetores estendidos de medidas que levam em conta as informações operacionais e o particionamento proposto, são definidos por:

$$\bar{z}^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_m^A \\ \bar{z}_{op}^A \end{bmatrix}; \bar{z}^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_m^R \\ \bar{z}_{op}^R \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Os vetores estendidos desacoplados de medidas podem ser ainda expressos por:

$$\bar{z}_m^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo}^A \\ \bar{z}_{inj}^A \end{bmatrix}; \bar{z}_m^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo}^R \\ \bar{z}_{inj}^R \\ \bar{z}_{V_{mag}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

sendo que:

\bar{z}_{fluxo}^A e \bar{z}_{fluxo}^R são os vetores de medidas ativas e reativas de fluxo de potência, respectivamente;

\bar{z}_{inj}^A e \bar{z}_{inj}^R são os vetores de medidas ativas e reativas de injeção de potência, respectivamente;

$\bar{z}_{V_{mag}}$ é o vetor de medidas de magnitude de tensão.

E os vetores estendidos desacoplados de pseudomedidas operacionais serão dados por:

$$\bar{z}_{op}^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\theta_{op}} \\ \bar{z}_{t_{op}} \end{bmatrix}; \bar{z}_{op}^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_{V_{op}} \\ \bar{z}_{u_{op}} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

sendo que:

$\bar{z}_{\theta_{op}}$ e $\bar{z}_{V_{op}}$ são os vetores de pseudomedidas ativas e reativas de diferença angular e de potencial nulo através dos ramos chaveáveis fechados, respectivamente;

$\bar{z}_{t_{op}}$ e $\bar{z}_{u_{op}}$ são os vetores de pseudomedidas ativas e reativas de fluxo de potência

nulo através dos ramos chaveáveis abertos, respectivamente.

É importante lembrar que a representação da rede no nível da seção de barras requer uma revisão das equações de injeção de potência, que ditaram a relação entre as medições de injeção de potência e os estados. A equação de injeção de potência em uma barra k é igual à soma dos fluxos de potência através dos ramos adjacentes a esta. Enquanto o fluxo de potência através de ramos convencionais (linhas de transmissão e transformadores) são expressos em termos de seus parâmetros e tensões complexas, os fluxos de potência através de ramos chaveáveis devem ser expressos diretamente em termos das novas variáveis de estado. Portanto, as funções não-lineares que relacionam as medições de injeção de potência ativa e reativa com os estados podem ser expressas por (LOURENÇO, 2001):

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} t_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} t_{kl} \quad (3.6)$$

$$Q_k = -Q_k^{sh}(V_k) + \sum_{m \in \Omega_k} u_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) + \sum_{l \in \Gamma_k} u_{kl} \quad (3.7)$$

onde:

P_k (Q_k) é a equação de injeção de potência ativa (reativa) na barra k ;

t_{km} (u_{km}) é a equação de fluxo de potência reativa nos ramos convencionais $k - m$;

t_{kl} (u_{kl}) é a equação de fluxo de potência ativa (reativa) nos ramos chaveáveis $k - l$;

Ω_k é o conjunto de barras adjacentes à barra k através de ramos convencionais;

Γ_k é o conjunto de barras conectadas à barra k através de ramos chaveáveis.

Lembrando que medidas de injeção de potência ativa estão contidas no conjunto de medidas “ativas” \bar{z}_m^A e medidas de injeção de potência reativa estão contidas no conjunto de medidas reativas \bar{z}_m^R . Representa-se a matriz de covariância:

$$R = \begin{bmatrix} R_A & 0 \\ 0 & R_R \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

A matriz Jacobiana (completa) do problema estendido, considerando as informações operacionais do problema de *EEG* e o particionamento $P - \theta$ e $Q - V$ proposto, pode ser expressa por:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & \bar{H}_{PV} \\ \bar{H}_{Q\theta} & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

onde:

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_{P\theta} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial t} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial t_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial t_{op}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_{op}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \theta} & \frac{\partial t}{\partial t} \end{bmatrix} & \bar{H}_{PV} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial u} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial t_{op}}{\partial V} & \frac{\partial t_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial \theta_{op}}{\partial V} & \frac{\partial \theta_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial V}{\partial V} & \frac{\partial u}{\partial u} \end{bmatrix} \\
 \bar{H}_{Q\theta} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial t} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial t} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial u_{op}}{\partial t} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \theta} & \frac{\partial t}{\partial t} \\ \frac{\partial V_{op}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{op}}{\partial t} \end{bmatrix} & \bar{H}_{QV} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial u} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial u} \\ \frac{\partial u_{op}}{\partial V} & \frac{\partial u_{op}}{\partial u} \\ \frac{\partial V}{\partial V} & \frac{\partial u}{\partial u} \\ \frac{\partial V_{op}}{\partial V} & \frac{\partial V_{op}}{\partial u} \end{bmatrix} \quad (3.10)
 \end{aligned}$$

Cabe ressaltar que as informações dos status dos disjuntores são equações lineares. Dessa forma, os blocos da matriz Jacobiana correspondentes à essas informações resultam em:

$$\begin{aligned}
 \bar{H}_{P\theta} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. \\ 0 & \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. & 0 \end{bmatrix} & \bar{H}_{PV} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11) \\
 \bar{H}_{Q\theta} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & \bar{H}_{QV} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & 0 \\ 0 & \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pm 1 \end{array} \right. & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Verifica-se claramente a partir da Equação (3.10) e (3.11) que a extensão do problema de estimação no nível de seção de barras contribui apenas (e de forma linear) com as submatrizes diagonais da matriz Jacobiana ($H_{P\theta}$ e H_{QV}), resultando em valores nulos nas submatrizes “fora-diagonal” (H_{PV} e $H_{Q\theta}$).

A matriz ganho estendida do estimador proposto pode ser determinada através da substituição da matriz Jacobiana convencional, discutida na Seção 2.1, pela sua versão estendida correspondente, ou seja:

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} \bar{G}_{P\theta} & \bar{G}_{PV} \\ \bar{G}_{Q\theta} & \bar{G}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde:

$$\bar{G}_{P\theta} = \bar{H}_{P\theta}^T R_P^{-1} \bar{H}_{P\theta} + \bar{H}_{Q\theta}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{Q\theta} \quad (3.13)$$

$$\bar{G}_{PV} = \bar{H}_{P\theta}^T R_P^{-1} \bar{H}_{PV} + \bar{H}_{Q\theta}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{QV} \quad (3.14)$$

$$\bar{G}_{Q\theta} = \bar{H}_{PV}^T R_P^{-1} \bar{H}_{P\theta} + \bar{H}_{QV}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{Q\theta} \quad (3.15)$$

$$\bar{G}_{QV} = \bar{H}_{PV}^T R_P^{-1} \bar{H}_{PV} + \bar{H}_{QV}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{QV} \quad (3.16)$$

sendo:

$\bar{G}_{P\theta}$ é a matriz ganho estendida $P\theta$;

\bar{G}_{PV} é a matriz ganho estendida PV ;

$\bar{G}_{Q\theta}$ é a matriz ganho estendida $Q\theta$;

\bar{G}_{QV} é a matriz ganho estendida QV .

Analisando a equação (3.11), observa-se que os blocos H_{PV} e $H_{Q\theta}$ são compostos por uma grande quantidade de valores nulos, em especial no que se refere às novas informações oriundas do status de chaves e disjuntores. Somados ao desacoplamento natural observado em sistemas de transmissão, pode-se garantir que as submatrizes da matriz Jacobiana que relacionam medidas/pseudomedidas ativas às variáveis de estado reativas (v e u), e as submatrizes que relacionam medidas/pseudomedidas reativas e variáveis de estado ativas (θ e t), são nulas (no caso das pseudomedidas) ou bem menos significativas que as matrizes diagonais.

Assim, garante-se que a condição básica para o desacoplamento $P - \theta$ e $Q - V$ se aplica ao problema estendido da estimação de estados generalizada de forma que as submatrizes fora da diagonal da matriz Jacobiana e, conseqüentemente, da matriz ganho estendida, são bem menos significativas do que as suas diagonais.

Em conclusão, a inclusão do novo conjunto de variáveis de estado e pseudomedidas operacionais não deteriora a natureza de desacoplamento da matriz Jacobiana e, conseqüentemente, não deteriora a natureza de desacoplamento da matriz ganho. Em vez disso, o nível de seção de barras reforça a natureza de desacoplamento de ambas as matrizes.

Considerando o exposto acima, este trabalho propõe a extensão dos dois modelos clássicos desacoplados de estimador de estado, desacoplado no modelo e desacoplado no algoritmo, previamente apresentados na literatura considerando a modelagem barra-ramo da rede (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; MONTICELLI; GARCIA, 1990), agora abordando a modelagem no nível de seção de barras proposta.

3.1.1 EEG Desacoplado no Modelo

Esta seção apresenta a versão desacoplada no modelo do $EEG - DR$ proposto ($EEGDR - modelo$), onde as submatrizes fora da diagonal da matriz Jacobiana estendida, ou seja, $\bar{H}_{Q\theta}$ e \bar{H}_{PV} são desprezadas, resultando na seguinte versão simplificada

da matriz Jacobiana, \tilde{H} :

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Considerando a formulação pelo método da equação normal apresentada na Seção 1 do Capítulo 2, verifica-se claramente que a simplificação proposta pela equação (3.17) afeta tanto a matriz ganho quanto o vetor do lado direito do processo de estimação, de tal forma que:

$$\tilde{G}_{P\theta}^{dm} = \bar{H}_{P\theta}^T R_{m_P}^{-1} \bar{H}_{P\theta}^T \quad (3.18)$$

$$\tilde{G}_{QV}^{dm} = \bar{H}_{QV}^T R_{m_Q}^{-1} \bar{H}_{QV}^T \quad (3.19)$$

$$\tilde{T}_{P\theta}^{dm} = \bar{H}_{P\theta}^T R_{m_P}^{-1} [\bar{z}_P - \bar{h}_P] \quad (3.20)$$

$$\tilde{T}_{QV}^{dm} = \bar{H}_{QV}^T R_{m_Q}^{-1} [\bar{z}_Q - \bar{h}_Q] \quad (3.21)$$

Nestas condições, o problema estendido pode ser iterativamente resolvido por dois sistemas lineares independentes até que a tolerância seja atingida, como se segue:

$$\tilde{G}_{P\theta}^{dm} \Delta \hat{x}_P^{k+1} = \tilde{T}_{P\theta}^{dm} \quad (3.22)$$

$$\hat{x}_P^{k+1} = \hat{x}_P^k + \Delta \hat{x}_P^{k+1} \quad (3.23)$$

$$\tilde{G}_{QV}^{dm} \Delta \hat{x}_Q^{k+1} = \tilde{T}_{QV}^{dm} \quad (3.24)$$

$$\hat{x}_Q^{k+1} = \hat{x}_Q^k + \Delta \hat{x}_Q^{k+1} \quad (3.25)$$

onde:

$$R_A = \begin{bmatrix} R_P^m & 0 \\ 0 & R_P^o \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$R_R = \begin{bmatrix} R_Q^m & 0 \\ 0 & R_Q^o \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$\Delta \hat{x}_P = \begin{bmatrix} \Delta \hat{\theta} \\ \Delta \hat{t} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\Delta \hat{x}_Q = \begin{bmatrix} \Delta \hat{V} \\ \Delta \hat{u} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Tal como na versão que considera a modelagem barra-ramo do estimador desacoplado (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979; MONTICELLI; GARCIA, 1990; MONTICELLI, 1999), as seguintes afirmações continuam claramente válidas quando a abordagem estendida proposta é aplicada:

- embora as aproximações sejam aplicadas em ambos os lados da equação normal, o que significa que o resultado não é exato, a diferença é aceitável para fins de

operação em tempo real, desde que o efeito de dissociação seja observável (altas relações X/R);

- as matrizes ganho e Jacobianas são mantidas constantes durante o processo iterativo;
- as versões conhecidas BX e XB podem ser utilizadas.

O algoritmo da ferramenta é apresentado a seguir:

ALGORITMO 1: EEG DESACOPLADO NO MODELO

Entrada: $\bar{z}^A, \bar{z}^R, \bar{h}^A, \bar{h}^R, R_A, R_R, H_{P\theta}, H_{QV}, \hat{x}^A, \hat{x}^R$

Saída: Estados estimados: \hat{x}^A, \hat{x}^R

1 **início**

2 Calcula $\bar{G}_{P\theta}^{dm}$ e \bar{G}_{QV}^{dm} pelas equações (3.18) e (3.19)

3 Calcula $\bar{T}_{P\theta}^{dm}, \bar{T}_{QV}^{dm}$ pelas equações (3.20) e (3.21)

4 **para** $k = k + 1$ **faça**

5 **ITERAÇÃO ATIVA**

 • Calcula $\Delta \hat{x}_A^{k+1}$ pela equação (3.22)

 • Atualiza \hat{x}^A pela equação (3.23)

ITERAÇÃO REATIVA

 • Calcula $\Delta \hat{x}_R^{k+1}$ pela equação (3.24)

 • Atualiza \hat{x}^R pela equação (3.25)

até que $\Delta \hat{x}_P^{k+1}$ e $\Delta \hat{x}_Q^{k+1}$ sejam menores que a tolerância

6 **fim**

7 **fim**

8 **retorna** \hat{x}^A, \hat{x}^R

3.1.2 EEG Desacoplado no Algoritmo

Na versão desacoplada no algoritmo do *EEG – DR (EEGDR – algoritmo)* as aproximações são realizadas diretamente na matriz ganho, desprezando as submatrizes diagonais G_{PV} e $G_{Q\theta}$, de forma que:

$$\bar{G}_{P\theta}^{da} = \bar{H}_{P\theta}^T R_P^{-1} \bar{H}_{P\theta}^T + \bar{H}_{Q\theta}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{Q\theta}^T \quad (3.30)$$

$$\bar{G}_{QV}^{da} = \bar{H}_{PV}^T R_P^{-1} \bar{H}_{PV}^T + \bar{H}_{QV}^T R_Q^{-1} \bar{H}_{QV}^T \quad (3.31)$$

Nessa versão, nenhuma aproximação é introduzida no vetor do lado direito, uma vez que:

$$\bar{T}_{P\theta}^{da} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta}^T \\ \bar{H}_{Q\theta}^T \end{bmatrix} R^{-1}[\bar{z} - \bar{h}] \quad (3.32)$$

$$\bar{T}_{QV}^{da} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{PV}^T \\ \bar{H}_{QV}^T \end{bmatrix} R^{-1}[\bar{z} - \bar{h}] \quad (3.33)$$

Isso significa que o resultado obtido é exato, uma vez que somente o processo iterativo é afetado. O processo de solução do sistema linear representado pelas equações (3.34-3.37) pode ser igualmente aplicado à versão desacoplada no algoritmo do *EEG* proposto.

$$\bar{G}_{P\theta}^{da} \Delta \hat{x}_P^{k+1} = \bar{T}_{P\theta}^{da}(\Theta^k, V^k) \quad (3.34)$$

$$\hat{x}_P^{k+1} = \hat{x}_P^k + \Delta \hat{x}_P^{k+1} \quad (3.35)$$

$$\bar{G}_{QV}^{da} \Delta \hat{x}_Q^{k+1} = \bar{T}_{QV}^{da}(\Theta^k, V^k) \quad (3.36)$$

$$\hat{x}_Q^{k+1} = \hat{x}_Q^k + \Delta \hat{x}_Q^{k+1} \quad (3.37)$$

O algoritmo da ferramenta é apresentado a seguir:

ALGORITMO 2: EEG DESACOPLADO NO ALGORITMO

Entrada: $\bar{z}^A, \bar{z}^R, \bar{h}^A, \bar{h}^R, R_A, R_R, H_{P\theta}, H_{Q\theta}, H_{PV}, H_{QV}, \hat{x}^A, \hat{x}^R$

Saída: Estados estimados: \hat{x}^A, \hat{x}^R

1 **início**

2 Calcula $\bar{G}_{P\theta}^{da}$ e \bar{G}_{QV}^{da} pelas equações (3.30) e (3.31)

3 Calcula $\bar{T}_{P\theta}^{da}$, \bar{T}_{QV}^{da} pelas equações (3.32) e (3.33)

4 **para** $k = k + 1$ **faça**

5 **ITERAÇÃO ATIVA**

 • Calcula $\Delta \hat{x}_A^{k+1}$ pela equação (3.34)

 • Atualiza \hat{x}^A pela equação (3.35)

ITERAÇÃO REATIVA

 • Calcula $\Delta \hat{x}_R^{k+1}$ pela equação (3.36)

 • Atualiza \hat{x}^R pela equação (3.37)

até que $\Delta \hat{x}_P^{k+1}$ e $\Delta \hat{x}_Q^{k+1}$ sejam menores que a tolerância

6 **fim**

7 **fim**

8 **retorna** \hat{x}^A, \hat{x}^R

3.2 NORMALIZAÇÃO COMPLEXA POR UNIDADE PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA

Esta seção apresenta os desenvolvimentos deste trabalho referente ao uso da normalização complexa na estimação de estados desacoplada com vistas à sua aplicação para sistemas de distribuição.

3.2.1 Normalização Complexa por Unidade

Dentre os avanços ocorridos nos sistemas de distribuição, é importante ressaltar que a baixa relação X/R será sempre uma característica desses sistemas, já que essa informação está diretamente ligada aos parâmetros da rede. Dessa forma, o desacoplamento $P\theta - QV$, e por consequência, os métodos desacoplados, não são naturalmente elegíveis para os sistemas de distribuição devido à sua baixa relação X/R .

Desenvolvimentos recentes, baseados na técnica de rotação automática dos eixos (GARCIA; MONTICELLI; ABREU, 1979), ajudaram a definir o conceito de normalização complexa por unidade (*cpu*) e sua aplicação para adequar o uso de técnicas de desacoplamento aos estudos de fluxo de potência para sistemas de distribuição (TORTELLI et al., 2015).

A técnica está baseada na adoção de uma base de potência complexa, ou seja:

$$\dot{S}_{base} = \left| \dot{S}_{base} \right| e^{-j\phi_{base}} \quad (3.38)$$

onde:

ϕ_{base} é o ângulo de base.

Através da utilização de uma base de potência complexa associada a um ângulo de base apropriado, é possível adequar as relações X/R dos sistemas de distribuição tornando os seus valores semelhantes à relação X/R dos sistemas de transmissão. A expressão para calcular o ϕ_{base} adequado leva em consideração a relação X_{cpu}/R_{cpu} do sistema estudado, considerando seus valores máximos e mínimos, assim como o fator de carga, dada por (TORTELLI et al., 2015):

$$\phi_{base} = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2} \right) (1 + \tau) \quad (3.39)$$

sendo:

$$\alpha_{avg} = \sum_{i=1}^{N_l} \frac{\tan^{-1} \frac{X_i}{R_i}}{N_l} \quad (3.40)$$

$$\gamma_{avg} = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{X_i}{R_i} \right)_{max} + \tan^{-1} \left(\frac{X_i}{R_i} \right)_{min}}{2} \quad (3.41)$$

$$\tau = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N_b} \cos \left(\tan^{-1} \frac{Q_i}{P_i} \right)}{N_b} \quad (3.42)$$

onde:

N_b é o número de barras do sistema;

N_l é o número de linhas do sistema;

α_{avg} é a relação X/R média, em *radianos*;

γ_{avg} é a média entre a relação X/R máxima e mínima, em *radianos*;

τ é o índice de fator de carregamento;

X_i é a reatância da linha i ;

R_i é a resistência da linha i ;

Q_i é a injeção de potência reativa na barra i ;

P_i é a injeção de potência ativa na barra i .

Já as bases de tensão do sistema seguem a normalização convencional e são mantidas reais:

$$\dot{V}_{base} = \left| \dot{V}_{base} \right| e^{-j0} = V_{base} \quad (3.43)$$

A partir de (3.38) e (3.43), obtém-se a impedância base:

$$\dot{Z}_{base} = \frac{\dot{V}_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = \left| \dot{Z}_{base} \right| e^{-\phi_{base}} \quad (3.44)$$

Em (3.44) verifica-se que a impedância de base na normalização complexa tem apenas a fase impactada pelo ângulo de fase quando comparada a normalização por unidade. convencional, ou seja:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{\left| \dot{Z}_{\Omega} \right| e^{j\theta}}{\left| \dot{Z}_{base} \right| e^{-j\phi_{base}}} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| e^{(\theta + \phi_{base})} \quad (3.45)$$

sendo θ o ângulo de fase original da impedância.

De (3.45), entende-se que:

$$R_{cpu} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (3.46)$$

$$X_{cpu} = \left| \dot{Z}_{pu} \right| \sen(\theta + \phi_{base}) \quad (3.47)$$

Isto significa que a relação X/R do sistema pode ser vista como uma função do ângulo de base escolhido, esta relação é dada por (TORTELLI et al., 2015):

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}) \quad (3.48)$$

onde:

X_{cpu} é a reatância da linha, em cpu ;

R_{cpu} é a resistência da linha, em cpu ; θ é o ângulo original da impedância da linha.

A partir da normalização complexa apresentada, obtêm-se novos valores de relação X_{cpu}/R_{cpu} e, conseqüentemente, novos parâmetros para a rede elétrica. Para que o estado original da rede seja mantido, as injeções de potência ativa e reativa também devem ser normalizadas com a base complexa de potência, ou seja (TORTELLI et al., 2015):

$$\dot{S}_{kcpu} = \frac{|\dot{S}_{kVA}| e^{j\theta}}{|\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{kpu}| e^{(\theta+\phi_{base})} \quad (3.49)$$

$$\dot{S}_{kcpu} = |P_{kcpu} + jQ_{kcpu}| e^{(\theta+\phi_{base})} \quad (3.50)$$

Conseqüentemente, as injeções de potência ativa e reativa são dadas por:

$$P_{kcpu} = |\dot{S}_{kpu}| \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (3.51)$$

$$Q_{kcpu} = |\dot{S}_{kpu}| \sen(\theta + \phi_{base}) \quad (3.52)$$

sendo θ o ângulo de fase original da potência complexa.

Para o fluxo de potência complexa a partir da normalização tem-se:

$$\dot{S}_{kmcpu} = \frac{|\dot{S}_{kmVA}| e^{j\theta}}{|\dot{S}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{kmpu}| e^{(\theta+\phi_{base})} \quad (3.53)$$

$$\dot{S}_{kmcpu} = |P_{kmcpu} + jQ_{kmcpu}| e^{(\theta+\phi_{base})} \quad (3.54)$$

Assim, os fluxos de potência ativa e reativa são dados por:

$$P_{kmcpu} = |\dot{S}_{kmpu}| \cos(\theta + \phi_{base}) \quad (3.55)$$

$$Q_{kmcpu} = |\dot{S}_{kmpu}| \sen(\theta + \phi_{base}) \quad (3.56)$$

sendo θ o ângulo de fase original da potência complexa.

Já a base de corrente complexa pode ser descrita por:

$$\dot{I}_{base} = \frac{V_{base}}{|\dot{Z}_{base}| e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{base}| e^{\phi_{base}} \quad (3.57)$$

Assim, obtém-se que:

$$\dot{I}_{cpu} = \frac{|\dot{I}_A| e^{j\beta}}{|\dot{I}_{base}| e^{j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{pu}| e^{j(\beta - \phi_{base})} \quad (3.58)$$

sendo:

β o ângulo de fase original da corrente.

A partir da equação (3.57), observa-se que como \dot{I}_{base} tem o mesmo ângulo de base de \dot{S}_{base} , porém de sentido oposto, garante-se um valor real para a base de tensão, mantendo o estado do sistema original. Isto pode ser verificado a partir da aplicação das equações (3.38) e (3.57) em $\dot{S} = \dot{V}\dot{I}^*$, resultando em:

$$\dot{S}_{base} = \dot{V}_{base} \dot{I}_{base}^* \quad (3.59)$$

$$|\dot{S}_{base}| e^{-\phi_{base}} = V_{base} \cdot |\dot{I}_{base}| e^{-\phi_{base}} \quad (3.60)$$

$$V_{base} = \frac{|\dot{I}_{base}| e^{-\phi_{base}}}{|\dot{S}_{base}| e^{-\phi_{base}}} \quad (3.61)$$

$$V_{base} = \frac{I_{base}}{S_{base}} \quad (3.62)$$

Então, conclui-se que a aplicação da *cpu* em um sistema implica em valores de tensões complexas das barras idênticos aos valores resultantes do emprego da normalização convencional (*pu*), ou seja, os estados do sistema encontrado por ambas as normalizações são equivalentes (TORTELLI et al., 2015):

$$V_{cpu} \equiv V_{pu} \quad (3.63)$$

$$\theta_{cpu} \equiv \theta_{pu} \quad (3.64)$$

Explorando o desacoplamento $P\theta - QV$ e utilizando matrizes constantes, o estimador de estados desacoplado rápido tem como característica a rapidez no seu desempenho. Tal característica valoriza o uso da formulação, pois além da necessidade de uma ferramenta que apresente a solução de forma rápida e eficaz para utilização na operação em tempo real, os sistemas de distribuição apresentam grande quantidade de nós, e a adoção de matrizes constantes evita que o algoritmo lide com matrizes de grande dimensão a cada iteração.

3.2.2 Normalização Complexa por Unidade para Estimação de Estados

Nessa seção, os avanços observados em (TORTELLI et al., 2015) para o fluxo de potência são propostos para a *EE*. Em (NOGUEIRA, 2014; NOGUEIRA; LOURENÇO; TORTELLI, 2014), a *cpu* foi aplicada pela primeira vez em estudos de

estimação de estados considerando a apenas a formulação desacoplada no modelo e a modelagem barra-ramo da rede.

Com essa proposta, através do ajuste das relações X/R dos sistemas de distribuição, torna o sistema capaz de ser processado por métodos consolidados para sistemas de transmissão, permitindo a aplicação com sucesso também nos sistemas de distribuição. É importante salientar que, diferentemente das aplicações em análise de fluxo de potência, a aplicação da *cpu* aos estudos e análises relacionados à estimação de estados em sistemas elétricos de potência, envolve a aplicação desses conceitos não apenas aos parâmetros da rede e injeções de potência nas barras, mas também ao conjunto de medidas recebidas pelo estimador.

Faz-se necessário então a conversão das medidas para *cpu*, obtendo assim um novo vetor de medidas. Sendo vetor de medidas dado nas grandezas kW , $kVar$ ou kV tem-se que:

$$z_m = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo}^A \\ \bar{z}_{inj}^A \\ \bar{z}_{fluxo}^R \\ \bar{z}_{inj}^R \\ \bar{z}_{Vmag} \end{bmatrix} \begin{array}{l} \rightarrow kW/MW \\ \rightarrow kVar/MVar \\ \rightarrow kW/MW \\ \rightarrow kVar/MVar \\ \rightarrow kV \end{array} \quad (3.65)$$

Assim, z_m em *cpu* é:

$$z_m^{cpu} = \frac{z_m}{z_{base}} \quad (3.66)$$

sendo:

z_{base} o vetor dos valores de base das grandezas medidas correspondentes;

z_m^{cpu} o vetor das grandezas medidas em *cpu*.

A conversão de medidas de potencia ativa e reativa para *cpu* pode ser obtido através do valor em *cpu* de base complexa que é dada por:

$$S_{cpu} = P_{cpu} + jQ_{cpu} = \frac{P_{MW} + jQ_{MVar}}{S_{base[MVA]} e^{-j\phi_{base}}} \quad (3.67)$$

Desenvolvendo as equações através das relações trigonométricas e considerando as medidas disponíveis, para realizar a conversão das medidas de injeção de potência na barra k de MW e de $MVar$ para *cpu* tem-se que:

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^A = \frac{z_{P_k[MW]}}{S_{base[MVA]}} \cos\phi_{base} - \frac{z_{Q_k[MVar]}}{S_{base[MVA]}} \sen\phi_{base} \quad (3.68)$$

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^R = \frac{z_{Q_k[MVar]}}{S_{base[MVA]}} \cos\phi_{base} + \frac{z_{P_k[MW]}}{S_{base[MVA]}} \sen\phi_{base} \quad (3.69)$$

Em casos onde os valores em *pu* estão disponíveis ao invés das medidas originais, as equações para a conversão das medidas de injeção de potência em *cpu*

são dadas, respectivamente.

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^A = z_{P_{k[pu]}} \cos\phi_{base} - z_{Q_{k[pu]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.70)$$

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^R = z_{Q_{k[pu]}} \cos\phi_{base} + z_{P_{k[pu]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.71)$$

Da mesma forma, para a realizar a conversão das medidas de fluxo de potência no ramo $k - m$ de MW e de $MVar$ para cpu tem-se que:

$$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^A = \frac{z_{P_{km[MW]}}}{S_{base[MVA]}} \cos\phi_{base} - \frac{z_{Q_{km[MVar]}}}{S_{base[MVA]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.72)$$

$$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^R = \frac{z_{Q_{km[MVar]}}}{S_{base[MVA]}} \cos\phi_{base} + \frac{z_{P_{km[MW]}}}{S_{base[MVA]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.73)$$

As equações para a conversão das medidas de injeção de pu para cpu são dadas, respectivamente.

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^A = z_{P_{km[pu]}} \cos\phi_{base} - z_{Q_{km[pu]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.74)$$

$$\bar{z}_{inj[cpu]}^R = z_{Q_{km[pu]}} \cos\phi_{base} + z_{P_{km[pu]}} \text{sen}\phi_{base} \quad (3.75)$$

Considerando que a medida de magnitude de tensão na barra k em cpu é a mesma que a obtida com a normalização em pu , tem-se que:

$$z_{V_{mag[cpu]}} = \frac{z_{V_{k[kV]}}}{z_{V_{base[kV]}}} = z_{V_{k[pu]}} \quad (3.76)$$

Aplica-se o desacoplamento do vetor de medidas em ativa e reativa. Assim, o vetor de medidas desacoplado e normalizado via cpu pode ser representado por:

$$z_{m[cpu]} = \begin{bmatrix} z_{m[cpu]}^P \\ z_{m[cpu]}^Q \end{bmatrix} \quad (3.77)$$

onde:

$$z_{m[cpu]}^P = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo[cpu]}^A \\ \bar{z}_{inj[cpu]}^A \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

$$z_{m[cpu]}^Q = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo[cpu]}^R \\ \bar{z}_{inj[cpu]}^R \\ \bar{z}_{V_{mag[cpu]}} \end{bmatrix} \quad (3.79)$$

sendo:

$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^A$ é o vetor de medidas de fluxo de potência ativa em cpu ;

$\bar{z}_{inj[cpu]}^A$ é o vetor de medidas de injeção de potência ativa em cpu ;

$\bar{z}_{fluxo[cpu]}^R$ é o vetor de medidas de fluxo de potência reativa em cpu ;

$\bar{z}_{inj[cpu]}^R$ é o vetor de medidas de injeção de potência reativa em *cpu*;

$\bar{z}_{Vmag[cpu]}$ é o vetor de medidas de magnitude de tensão em *cpu*.

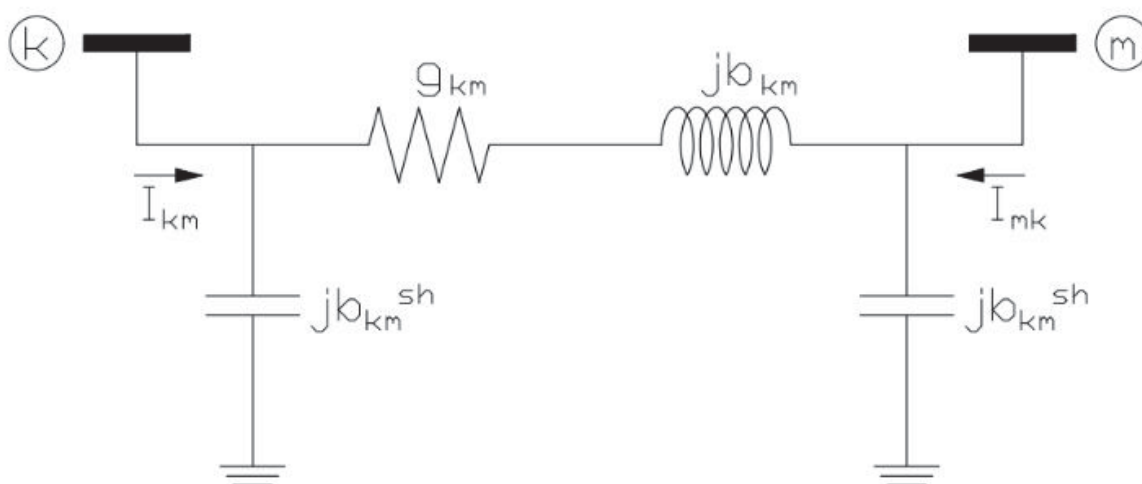
Assim como para a formulação apresentada na seção anterior, a *EEDR – cpu* também permite o uso da formulação desacoplada no algoritmo e desacoplada no modelo, apenas com a normalização das medidas e demais dados de entrada relacionados às matrizes do problema.

3.3 INCLUSÃO DE MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA

As mudanças observadas na filosofia de operação do setor elétrico mostram que é necessário superar as dificuldades existentes no uso de medidas de corrente, pois estas auxiliam a estender a observabilidade, além de estarem disponíveis em grande quantidade nos sistemas de distribuição. Conforme apontado no Capítulo 2, a inclusão de medidas de corrente na *EE – DR* apresenta problemas já que ela não pode ser acoplada naturalmente a nenhum dos subproblemas, ativo ou reativo (ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004).

Visando lidar com essas dificuldades, esta seção apresenta a metodologia proposta nesse trabalho para viabilizar medidas fasoriais de corrente na modelagem desacoplada na estimação de estados.

FIGURA 2 – MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE NOS RAMOS



Fonte: – O Autor (2019)

Considerando o modelo π da linha de transmissão, apresentado na FIGURA 2, pode-se definir a equação do fasor da corrente no ramo $k - m$ em função das tensões

complexas nas barras e dos parâmetros da linha, que é dada por:

$$\dot{I}_{km} = \frac{(\dot{V}_k - \dot{V}_m)}{z_{km}} + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot \dot{V}_k \quad (3.80)$$

sendo:

$$y_{km} = 1/z_{km} = g_{km} + j \cdot b_{km} \quad (3.81)$$

$$\dot{V}_k = V_k \angle \theta_k \quad (3.82)$$

$$\dot{V}_m = V_m \angle \theta_m \quad (3.83)$$

onde:

\dot{I}_{km} é o fasor da corrente no ramo $k - m$;

\dot{V}_k é o fasor da tensão na barra k ;

\dot{V}_m é o fasor da tensão na barra m ;

O fasor da corrente \dot{I}_{km} pode ser expresso na forma retangular, ou seja:

$$\dot{I}_{km} = Re \{ \dot{I}_{km} \} + j \cdot Im \{ \dot{I}_{km} \} \quad (3.84)$$

A partir da equação (3.84), tem-se ainda que:

$$Re \{ \dot{I}_{km} \} = g_{km} \cdot (V_k \cdot \cos \theta_k - V_m \cdot \cos \theta_m) - b_{km} \cdot (V_k \cdot \sin \theta_k - V_m \cdot \sin \theta_m) - b_{km}^{sh} \cdot (V_k \cdot \sin \theta_k) \quad (3.85)$$

$$Im \{ \dot{I}_{km} \} = g_{km} \cdot (V_k \cdot \sin \theta_k - V_m \cdot \sin \theta_m) + b_{km} \cdot (V_k \cdot \cos \theta_k - V_m \cdot \cos \theta_m) + b_{km}^{sh} \cdot (V_k \cdot \cos \theta_k) \quad (3.86)$$

Na forma polar, tem-se que:

$$|\dot{I}_{km}| = \sqrt{|Re \{ \dot{I}_{km} \}|^2 + |Im \{ \dot{I}_{km} \}|^2} \quad (3.87)$$

$$\theta_{I_{km}} = \arctan \left(\frac{Im \{ \dot{I}_{km} \}}{Re \{ \dot{I}_{km} \}} \right) \quad (3.88)$$

Este trabalho propõe a normalização do fasor da corrente com relação ao ângulo de fase da tensão na barra terminal do ramo correspondente ao fasor de corrente, ou seja:

$$\frac{\dot{I}_{km}}{1 \angle \theta_m} = \frac{(\dot{V}_k - \dot{V}_m) \cdot (g_{km} + j \cdot b_{km}) + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot \dot{V}_k}{1 \angle \theta_m} \quad (3.89)$$

onde:

$\frac{\dot{I}_{km}}{1 \angle \theta_m} = \tilde{\dot{I}}_{km}$, e é o fasor da corrente modificada no ramo $k - m$;

E por consequência, tem-se $\tilde{\dot{I}}_{km}$ como o fasor da corrente modificada:

$$\tilde{\dot{I}}_{km} = (V_k \angle \theta_{km} - V_m \angle 0) \cdot (g_{km} + j \cdot b_{km}) + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot V_k \angle \theta_{km} \quad (3.90)$$

Aplicando a Identidade de Euler, tem-se que:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{I}}_{km} = & (V_k \cdot (\cos\theta_{km} + j \cdot \text{sen}\theta_{km}) - V_m) \cdot (g_{km} + j \cdot b_{km}) \\ & + j \cdot b_{km}^{sh} \cdot V_k \cdot (\cos\theta_{km} + j \cdot \text{sen}\theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.91)$$

Na forma retangular, a parte real e imaginária do fasor da corrente modificada são identificadas por:

$$\dot{\tilde{I}}_{km} = \text{Re} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} + j \cdot \text{Im} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} \quad (3.92)$$

De (3.92), tem-se que:

$$\begin{aligned} \text{Re} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} = & g_{km} \cdot (V_k \cdot \cos\theta_{km} - V_m) \\ & - b_{km} \cdot (V_k \cdot \text{sen}\theta_{km}) - b_{km}^{sh} \cdot (V_k \cdot \text{sen}\theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} \text{Im} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} = & g_{km} \cdot (V_k \cdot \text{sen}\theta_{km}) \\ & + b_{km} \cdot (V_k \cdot \cos\theta_{km} - V_m) + b_{km}^{sh} \cdot (V_k \cdot \cos\theta_{km}) \end{aligned} \quad (3.94)$$

Retomando as aproximações e simplificações adotadas para abordagem desacoplada, seja do problema de fluxo de potência ou de estimação de estados, discutidas na Seção 2.1.1, ou seja, desprezando-se g_{km} e b_{km}^{sh} , e ainda, que para aberturas pequenas aberturas angulares, $\text{sen}\theta_{km} \approx \theta_{km}$ e $\cos\theta_{km} \approx 1$, aplicam-se as aproximações na parte real e imaginária, e obtém-se que:

$$\text{Re} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} = -b_{km} \cdot \theta_{km} \quad (3.95)$$

$$\text{Im} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} = b_{km} \cdot (V_k - V_m) \quad (3.96)$$

Observando as equações (3.95) e (3.96), pode-se dizer que a abertura angular no ramo $k - m$ afeta somente a parte real do fasor modificado da corrente, enquanto que a diferença magnitude de tensão entre as barras k e m impacta exclusivamente na parte imaginária do fasor modificado da corrente.

O módulo e o ângulo do fasor da corrente modificado são dados por:

$$\left| \dot{\tilde{I}}_{km} \right| = \sqrt{\left| \text{Re} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} \right|^2 + \left| \text{Im} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\} \right|^2} \quad (3.97)$$

$$\theta_{\dot{\tilde{I}}_{km}} = \arctan \left(\frac{\text{Im} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\}}{\text{Re} \left\{ \dot{\tilde{I}}_{km} \right\}} \right) \quad (3.98)$$

3.3.1 Medidas normalizadas de fasor de corrente modificada

A normalização proposta acima é aplicada às medidas fasoriais de corrente no estimador de estados desacoplado proposto.

Dessa forma, as equações que relacionam as medidas normalizadas são

adequadamente particionadas em parte ativa, que corresponde a parte real da medida normalizada, e parte reativa, correspondente a parte imaginária dessas quantidades, ou seja:

$$\tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^A = -b_{km} \cdot \theta_{km} \quad (3.99)$$

$$\tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^R = -b_{km} \cdot (V_k - V_m) \quad (3.100)$$

onde:

$\tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^A$ é o vetor estendido de equações da parte real que relacionam os estados às medidas do fasor da corrente modificada;

$\tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^R$ é o vetor estendido de equações da parte imaginária que relacionam os estados às medidas do fasor da corrente modificada.

A partir de (3.99) e (3.100), obtém-se as expressões dos elementos correspondentes na matriz Jacobiana, $H(\cdot)$, ou seja:

$$\frac{\partial \tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^A}{\partial \theta_k} = -b_{km} \quad (3.101)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^A}{\partial \theta_m} = b_{km} \quad (3.102)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^R}{\partial V_k} = b_{km} \quad (3.103)$$

$$\frac{\partial \tilde{h}_{\dot{I}_{km}}^R}{\partial V_m} = -b_{km} \quad (3.104)$$

A medida modificada do fasor da corrente deve ser atualizada a cada iteração, e suas equações são dadas por:

$$\tilde{z}_{\dot{I}_{km}}^A = |z_{\dot{I}_{km}}^i| \cdot \cos(\theta_{I_{km}} - \theta_m^{it}) \quad (3.105)$$

$$\tilde{z}_{\dot{I}_{km}}^R = |z_{\dot{I}_{km}}^i| \cdot \text{sen}(\theta_{I_{km}} - \theta_m^{it}) \quad (3.106)$$

onde:

$\tilde{z}_{\dot{I}_{km}}^A$ é o vetor estendido de medidas da parte real do fasor da corrente modificada;

$\tilde{z}_{\dot{I}_{km}}^R$ é o vetor estendido de medidas da parte imaginária do fasor da corrente modificada

As equações (3.105) a (3.106) indicam que a estratégia de normalização proposta é capaz de garantir de forma efetiva o desacoplamento das medidas de fasores de corrente no processo de estimação de estados.

A modificação da medida é feita no pré processamento das medidas, e atualizadas a cada iteração. Já as equações que relacionam os estados às medidas e os elementos da matriz Jacobiana são inseridos no processo, nas linhas e colunas respectivas às informações das medidas de corrente no problema ativo e reativo.

3.4 PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA RÁPIDA

A estimação de estados é reconhecida como uma ferramenta que permite a detecção e identificação de erros entre medições analógicas. Quando a *EEG* é adotada, o processamento de erros de topologia pode ser abordado de forma direta, uma vez que a modelagem explícita de chaves e disjuntores permite a detecção e identificação de erros nos status desses elementos.

Os algoritmos apresentados na literatura para análise de erros grosseiros geralmente assumem que a topologia de rede está correta, ou seja, que as informações referentes ao status do disjuntor estão livres de erros. Da mesma forma, muitos algoritmos de identificação de erros de topologia propostos na literatura recentemente assumem que as medições analógicas estão livres de erros grosseiros. Essas premissas podem não refletir a situação real da informação do sistema, comprometendo a análise dos dados e os resultados obtidos pelo estimador de estado.

Para as formulações apresentadas neste trabalho, definem-se então os vetores dos resíduos desacoplados particionados conforme a natureza da medida ou pseudo-medida a que este está associada, ou seja, ativa e reativa, denotados pelos subscritos *A* e *R*, e também as medidas convencionais e pseudomedidas operacionais, denotados pelos subscritos *m* e *op*, que são dados por:

$$\bar{r}^A = \begin{bmatrix} \bar{r}_m^A \\ \bar{r}_{op}^A \end{bmatrix}; \bar{r}^R = \begin{bmatrix} \bar{r}_m^R \\ \bar{r}_{op}^R \end{bmatrix} \quad (3.107)$$

onde:

\bar{r}^A é o vetor estendido de resíduos das medidas e pseudomedidas ativas;

\bar{r}_m^A é o vetor estendido de resíduos das medidas ativas;

\bar{r}_{op}^A é o vetor estendido de resíduos das pseudomedidas ativas;

\bar{r}^R é o vetor estendido de resíduos das medidas e pseudomedidas reativas;

\bar{r}_m^R é o vetor estendido de resíduos das medidas reativas;

\bar{r}_{op}^R é o vetor estendido de resíduos das pseudomedidas reativas.

Os vetores estendidos desacoplados dos resíduos das medidas e pseudomedi-

das podem ser ainda expressos por:

$$\bar{r}_m^A = \begin{bmatrix} \bar{r}_{fluxo}^A \\ \bar{r}_{inj}^A \end{bmatrix} \quad (3.108)$$

$$\bar{r}_m^R = \begin{bmatrix} \bar{r}_{fluxo}^R \\ \bar{r}_{inj}^R \\ \bar{r}_{Vmag}^R \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

$$\bar{r}_{op}^A = \begin{bmatrix} \bar{r}_{\theta op}^A \\ \bar{r}_{t op}^A \end{bmatrix} \quad (3.110)$$

$$\bar{r}_{op}^R = \begin{bmatrix} \bar{r}_{V op}^R \\ \bar{r}_{u op}^R \end{bmatrix} \quad (3.111)$$

sendo que:

$$\bar{r}_m^A = \bar{z}_m^A - \bar{h}_m^A \quad (3.112)$$

$$\bar{r}_{op}^A = \bar{z}_{op}^A - \bar{h}_{op}^A \quad (3.113)$$

$$\bar{r}_m^R = \bar{z}_m^R - \bar{h}_m^R \quad (3.114)$$

$$\bar{r}_{op}^R = \bar{z}_{op}^R - \bar{h}_{op}^R \quad (3.115)$$

Para o cálculo do resíduo normalizado das medidas convencionais e pseudomedidas operacionais, as informações são igualmente separadas conforme sua natureza (ativa e reativa):

$$[\bar{r}^A]^N = \begin{bmatrix} [\bar{r}_m^A]^N \\ [\bar{r}_{op}^A]^N \end{bmatrix} \quad (3.116)$$

$$[\bar{r}^R]^N = \begin{bmatrix} [\bar{r}_m^R]^N \\ [\bar{r}_{op}^R]^N \end{bmatrix} \quad (3.117)$$

onde

$$[\bar{r}_{m_i}^A]^N = \frac{|[\bar{r}_{m_i}^A]|}{\sqrt{\Omega_{m_{ii}}^A}} \quad (3.118)$$

$$[\bar{r}_{op_i}^A]^N = \frac{|[\bar{r}_{op_i}^A]|}{\sqrt{\Omega_{op_{ii}}^A}} \quad (3.119)$$

$$[\bar{r}_{m_i}^R]^N = \frac{|[\bar{r}_{m_i}^R]|}{\sqrt{\Omega_{m_{ii}}^R}} \quad (3.120)$$

$$[\bar{r}_{op_i}^R]^N = \frac{|[\bar{r}_{op_i}^R]|}{\sqrt{\Omega_{op_{ii}}^R}} \quad (3.121)$$

onde:

$[\bar{r}^R]^N$ é o vetor dos resíduos normalizados correspondentes às medidas e pseudomedidas ativas;

$[\bar{r}^R]^N$ é o vetor dos resíduos normalizados correspondentes às medidas e pseudomedidas reativa;

$r_{m_i}^{A^N}$ é o resíduo normalizado da medida convencional ativa "i";

$r_{op_i}^{A^N}$ é o resíduo normalizado da pseudomedida operacional ativa i;

$r_{m_i}^{R^N}$ é o resíduo normalizado da medida convencional reativa "i";

$r_{op_i}^{R^N}$ é o resíduo normalizado da pseudomedida operacional reativa i;

$\Omega_{m_{ii}}^A$ é valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à medida ativa "i";

$\Omega_{op_{ii}}^A$ é valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à pseudomedida ativa "i";

$\Omega_{m_{ii}}^R$ é valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à medida reativa "i";

$\Omega_{op_{ii}}^R$ é valor diagonal "ii" da matriz covariância, associado à pseudomedida reativa "i".

As matrizes de covariância dos resíduos Ω^A associados às medidas e pseudomedidas ativas, e Ω^R associados às medidas e pseudomedidas reativas, são definidas por:

$$\Omega^A = \begin{bmatrix} \Omega_m^A & \Omega_{op}^A \end{bmatrix} \quad (3.122)$$

$$\Omega^R = \begin{bmatrix} \Omega_m^R & \Omega_{op}^R \end{bmatrix} \quad (3.123)$$

onde:

$$\Omega^A = S_A \cdot R_A \quad (3.124)$$

$$\Omega^R = S_R \cdot R_R \quad (3.125)$$

sendo que as matrizes S_A e S_R de sensibilidade dos resíduos podem ser calculadas conforme apresentado em Abur e Gómez-Expósito (2004), mas aqui para a formulação desacoplada, por:

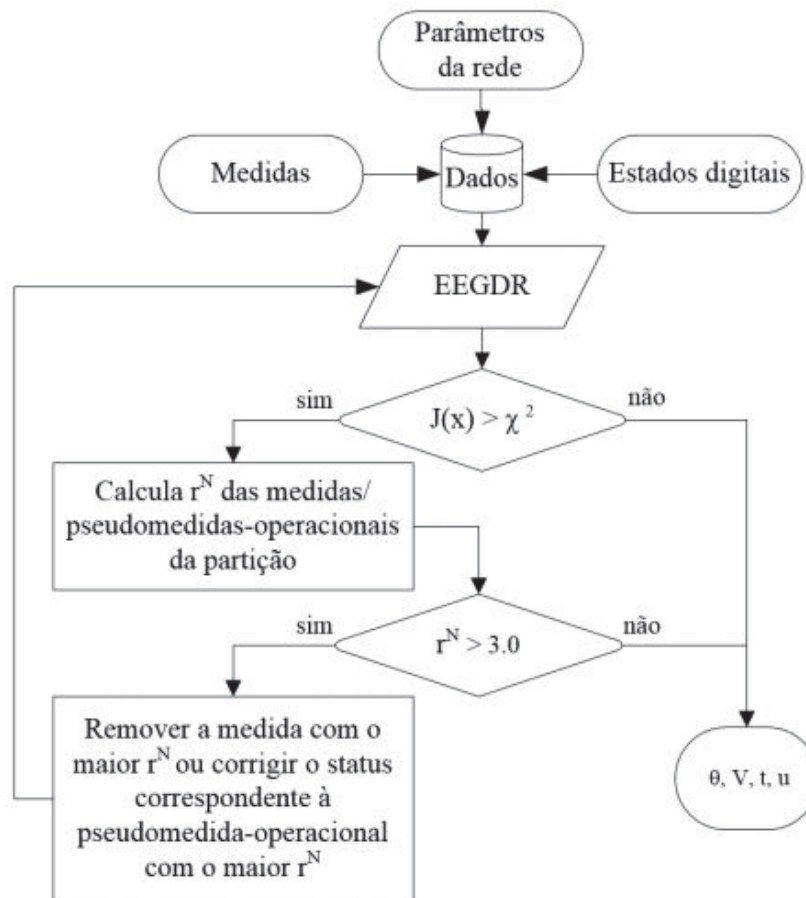
$$S_A = 1 - \bar{H}_{P\theta}^T \cdot \bar{G}_{P\theta}^{-1} \cdot \bar{H}_{P\theta} \cdot R_A^{-1} \quad (3.126)$$

$$S_R = 1 - \bar{H}_{QV}^T \cdot \bar{G}_{QV}^{-1} \cdot \bar{H}_{QV} \cdot R_R^{-1} \quad (3.127)$$

Este trabalho apresenta uma nova metodologia de análise simultânea de erros em medidas e erros em topologia para ser incorporada à *EEG - DR*.

3.4.1 Processamento de erros pelo teste do χ^2

A abordagem proposta consiste na extensão das análises da função $J(\hat{x})$ desacoplada e do teste do resíduo normalizado, mas diferentemente do que foi proposto por Garcia, Monticelli e Abreu (1979), a metodologia proposta neste trabalho é capaz de explorar a modelagem da rede no nível de seção de barras. Dessa forma, o algoritmo proposto não estabelece nenhuma suposição prévia sobre a topologia da rede ou as medições analógicas, cuja modelagem será investigada pelo processador de erros

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DO TESTE DO χ^2 

Fonte: – O Autor (2019)

proposto.

O fluxograma da ferramenta é apresentado na FIGURA 3.

Para a ferramenta proposta, os parâmetros da rede, as medidas e o estados digitais dos ramos chaveáveis são informados ao *EEG – DR*. Com os estados estimados, são calculados os índices, dados por:

$$J(\hat{x}) = J_m^A(\hat{x}) + J_{op}^A(\hat{x}) + J_m^R(\hat{x}) + J_{op}^R(\hat{x}) \quad (3.128)$$

onde:

$J_m^A(\hat{x})$ é o valor do índice para as medidas convencionais ativas;

$J_{op}^A(\hat{x})$ é o valor do índice para as pseudomedidas operacionais ativas;

$J_m^R(\hat{x})$ é o valor do índice para as medidas convencionais reativas;

$J_{op}^R(\hat{x})$ é o valor do índice para as pseudomedidas operacionais reativas.

E em seguida, comparados com o χ^2 correspondente à cada conjunto de medidas/pseudomedidas, assim como ativa/reactiva. Se o índice $J(x)$ for maior que o χ^2 , então o conjunto apresenta uma informação errônea. Os graus de liberdade serão

dados por:

$$\nu_m^A = m_A - n_\theta \quad (3.129)$$

$$\nu_m^R = m_R - n_V \quad (3.130)$$

$$\nu_{op}^A = m_{op} - n_t \quad (3.131)$$

$$\nu_{op}^R = m_{op} - n_u \quad (3.132)$$

onde:

ν_m^A é o grau de liberdade do conjunto de medidas convencionais ativas;

ν_{op}^A é o grau de liberdade do conjunto de pseudomedidas operacionais ativas;

ν_m^R é o grau de liberdade do conjunto de medidas convencionais reativas;

ν_{op}^R é o grau de liberdade do conjunto de pseudomedidas operacionais reativas;

m_{op} é a quantidade de pseudomedidas operacionais;

n_t é a quantidade de variáveis de estados a serem estimados para a partição operacional ativa, ou seja, os fluxos de potência ativa para os nd disjuntores da rede;

n_u a quantidade de variáveis de estados a serem estimados para a partição operacional reativa, ou seja, os fluxos de potência reativa para os nd disjuntores da rede.

Os resíduos normalizados de cada conjunto são calculados através das equações (3.116) a (3.121). Verifica-se se há resíduos com valores maiores que a tolerância (geralmente adota-se 3.0), e então, utiliza-se o Teste do Máximo Resíduo Normalizado para encontrar a informação errônea. A informação com o maior resíduo normalizado é removida e a $EEG - DR$ é executada novamente. É possível que haja mais de uma medida/pseudomedida errônea e ativa/reativa.

Dessa forma, é importante ressaltar que a adoção de uma formulação generalizada e desacoplada para a EE , e conseqüentemente, para o processamento de erros, permite o processamento simulatâneo de erros em medidas e erros de topologia, ao mesmo tempo que a abordagem desacoplado alivia de forma significativa o custo computacional associado à representação explícita de ramos chaveáveis.

3.4.2 Processamento de erros considerando os testes geométricos

Nesta seção, a ferramenta para o processamento de erros combinando o uso dos resíduos normalizados e o teste geométrico é apresentado, visando um método capaz de processar erro de modelagem na $EEG - DR$ sem fazer suposições prévias sobre a topologia de rede ou sobre medições analógicas. A metodologia está baseada no algoritmo de processamento de erros proposto em (LOURENÇO; COELHO; PAL, 2015). Porém, é necessário ressaltar que, diferentemente de (LOURENÇO; COELHO; PAL, 2015), a formulação desacoplada é considerada, separando os problemas conforme sua natureza (ativa e reativa).

A proposta para o processamento de erros baseia-se na formulação do $EEG -$

DR e num primeiro momento, as informações, medidas e conjuntos críticos são verificados. É importante ressaltar que na presença de medidas críticas, não há como continuar o processo. Depois disso, os resíduos normalizados são calculados.

A primeira etapa do processamento de erros consiste em detectar a presença de erros, seja esse em medida, topologia ou ambos. Para tanto, verifica-se se há algum resíduo normalizado de medida e/ou pseudomedida com valor acima de de um limiar pré-estabelecido, r_l (em geral $r_l = 3.0$). Caso contrário, o sistema está livre de erros e o processo de estimação de estados é finalizado. Em caso afirmativo, uma anomalia é detectada, e portanto, o processamento de erros continua. No caso de uma anomalia detectada, ou seja, $r^{Nmax} \geq r_l$, as medidas convencionais e pseudomedidas operacionais, que tiveram resíduo normalizado maiores que o limiar r_l , são selecionadas como suspeitas, formando o conjunto S .

O conjunto S é particionado segundo o tipo da informação, medida convencional ou pseudomedida operacional, e ainda, segundo a natureza, ativa ou reativa, formando os conjuntos S_m^A , S_{op}^A , S_m^R ou S_{op}^R . Calcula-se então o valor do cosseno para cada um dos conjuntos, e a partir disso, explora-se adequadamente as suas características, verificadas na Seção 2.3, visando investigar se todas as informações errôneas estão contidas ou não no conjunto S .

Os valores do cosseno associados a cada conjunto são determinados por:

$$\cos\theta_m^A = \sqrt{\frac{(r_m^A T R_m^A \Omega_{m_S}^A)(\Omega_{m_S}^A R_m^A \Omega_{m_S}^A)^{-1}(\Omega_{m_S}^A T R_m^A r_m^A)}{r_m^A T R_m^A r_m^A}} \quad (3.133)$$

$$\cos\theta_{op}^A = \sqrt{\frac{(r_{op}^A T R_{op}^A \Omega_{op_S}^A)(\Omega_{op_S}^A R_{op}^A \Omega_{op_S}^A)^{-1}(\Omega_{op_S}^A T R_{op}^A r_{op}^A)}{r_{op}^A T R_{op}^A r_{op}^A}} \quad (3.134)$$

$$\cos\theta_m^R = \sqrt{\frac{(r_m^R T R_m^R \Omega_{m_S}^R)(\Omega_{m_S}^R R_m^R \Omega_{m_S}^R)^{-1}(\Omega_{m_S}^R T R_m^R r_m^R)}{r_m^R T R_m^R r_m^R}} \quad (3.135)$$

$$\cos\theta_{op}^R = \sqrt{\frac{(r_{op}^R T R_{op}^R \Omega_{op_S}^R)(\Omega_{op_S}^R R_{op}^R \Omega_{op_S}^R)^{-1}(\Omega_{op_S}^R T R_{op}^R r_{op}^R)}{r_{op}^R T R_{op}^R r_{op}^R}} \quad (3.136)$$

A partir do valor do cosseno, é possível verificar a fonte da anomalia, e assim, focar o processo de correção no provável conjunto em que o erro se encontra. Conforme demonstrado na Seção 2.3, na ausência de erro é possível garantir que:

$$\cos\theta \cong 1.0 \quad (3.137)$$

A estratégia de processamento proposto neste trabalho leva em conta o maior impacto causado por erros de topologia, a fim de verificar a presença, ou não, de erros no conjunto S_{op} .

Verifica-se a topologia da rede, e portanto, os conjuntos S_{op}^A e S_{op}^R , composto pelas pseudomedidas ativas e reativas. Se a topologia da rede está livre de erros, então,

segue-se para a verificação nas medidas convencionais. Se não, considera-se que um erro de topologia foi detectado, e portanto, todas as informações dos conjuntos S_{op}^A e S_{op}^R serão analisadas, de forma que a pseudomedida operacional i é removida temporariamente do conjunto e o valor do cosseno para o conjunto reduzido é recalculado. Se com a remoção da pseudomedida i o valor do cosseno permanecer próximo de 1, dentro de uma tolerância $\epsilon_{cos\theta}$ escolhida, a pseudomedida i é errônea. Caso contrário, a pseudomedida i não é errônea e portanto é retirada do conjunto. O processo segue até que todas as pseudomedidas sejam verificadas e retiradas dos conjuntos S_{op}^A e S_{op}^R .

Após a conclusão dos procedimentos acima, todos os disjuntores associados às pseudomedidas operacionais remanescentes no conjunto reduzido são identificados como errôneos. Então, corrige-se o *status* dos disjuntores errôneos alterando sua posição de status atual. Num segundo momento, os conjuntos suspeitos S_m^A e S_m^R das medidas convencionais são analisados. Todos os passos descritos para as pseudomedidas operacionais se aplicam também para as medidas convencionais.

O algoritmo para o processamento de erros através dos testes geométricos é apresentado na sequência:

ALGORITMO 3: TESTES GEOMÉTRICOS DESACOPLADOS**Entrada:** $\bar{r}^A, \bar{r}^R, R_A, R_R, \bar{H}_{P\theta}, \bar{H}_{QV}, \bar{G}_{P\theta}, \bar{G}_{QV}$ **Saída:** Conjunto de informações suspeitas de erro: $S_{op}^A, S_{op}^R, S_m^A, S_m^R$ 1 **início**2 | Calcula $\Omega_m^A, \Omega_{op}^A, \Omega_m^R$ e Ω_{op}^R pelas equações (3.122) e (3.125)3 | Calcula $[\bar{r}_{m_i}^A]^N, [\bar{r}_{op_i}^A]^N, [\bar{r}_{m_i}^R]^N$ e $[\bar{r}_{op_i}^R]^N$ pelas equações (3.116)-(3.121)4 | **Teste para detecção de origem da anomalia:**5 | **se** $r^{N_{max}} \geq r_l$ **então**

6 | | Realizar o teste geométrico desacoplado

7 | | **se** $\bar{z}_{op_i}^A$ e $\bar{z}_{op_i}^R$ com $[\bar{r}_{op_i}^A]^N$ e $[\bar{r}_{op_i}^R]^N \geq 3.0$ - *Erro em topologia!*8 | | *Pseudomedida "i" adicionada aos conjuntos S_{op}^A e S_{op}^R* 9 | | **então**10 | | | **Retira pseudomedida "i" do conjunto suspeito:**11 | | | **se** $\cos\theta_{op}^A \cong 1.0$ e $\cos\theta_{op}^R \cong 1.0$ **então**12 | | | | Pseudomedida i está livre de erro13 | | | | Sai do conjunto suspeito S_{op}^A e S_{op}^R 14 | | | **senão**15 | | | | Pseudomedida i é errônea16 | | | | Retorna ao conjunto suspeito S_{op}^A e S_{op}^R 17 | | | **fim**18 | | **até** que todas as pseudomedidas sejam testadas19 | | **fim**20 | **senão se** $\bar{z}_{m_i}^A$ e/ou $\bar{z}_{m_i}^R$ com $[\bar{r}_{m_i}^A]^N$ e/ou $[\bar{r}_{m_i}^R]^N \geq 3.0$ - *Erro em medida!*21 | | *Medida "i" adicionada aos conjuntos S_m^A e S_m^R* 22 | | **então**23 | | | **Retira medida "i" do conjunto suspeito:**24 | | | **se** $\cos\theta_m^A \cong 1.0$ e $\cos\theta_m^R \cong 1.0$ **então**25 | | | | Medida operacional i está livre de erro26 | | | | Sai do conjunto suspeito S_m^A e S_m^R 27 | | | **senão**28 | | | | Medida i é errônea29 | | | | Retorna ao conjunto suspeito S_m^A e S_m^R 30 | | | **fim**31 | | **até** que todas as medidas sejam testadas32 | | **fim**33 | **senão**

34 | | Não há erro

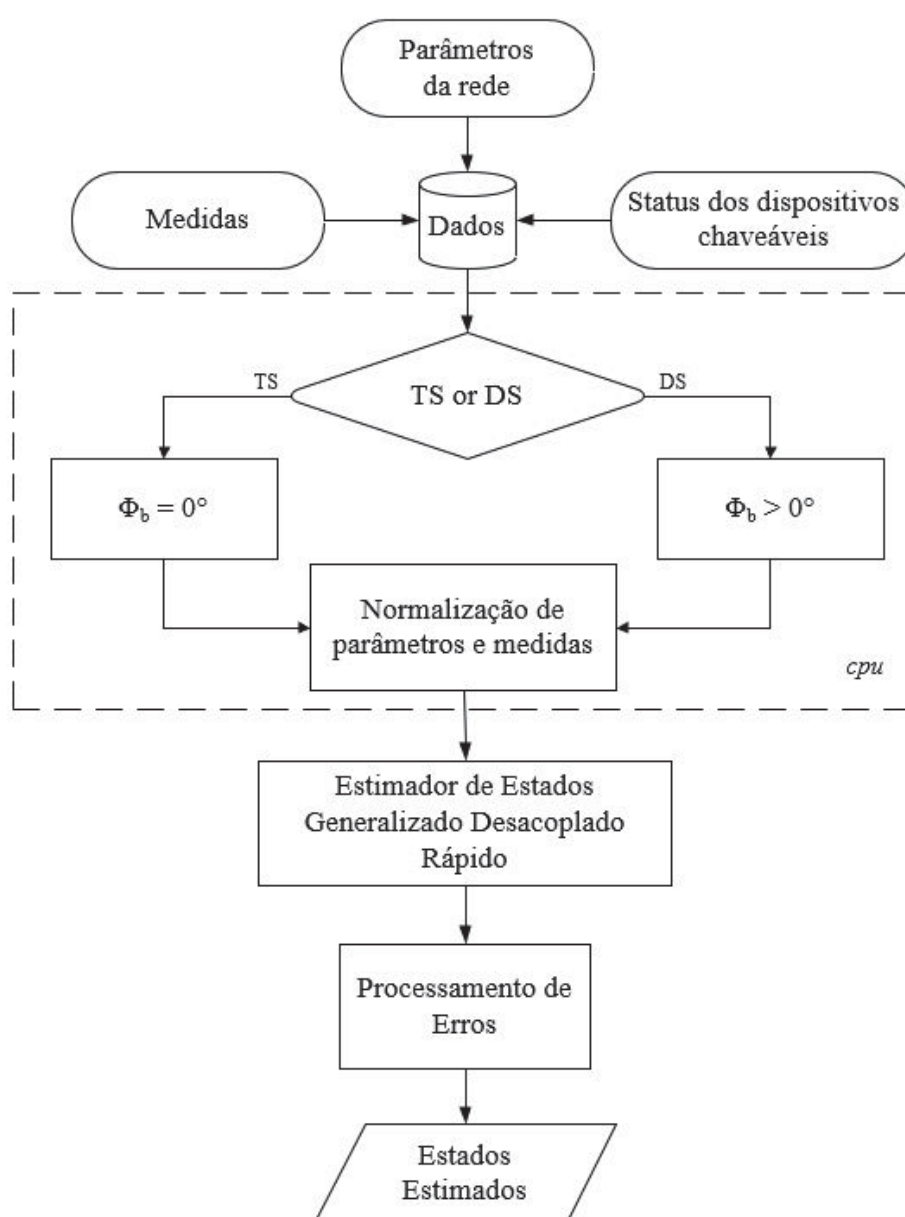
35 | **fim**36 **fim**37 **retorna** $S_{op}^A, S_{op}^R, S_m^A, S_m^R$

Os mesmos passos são considerados posteriormente para as medidas associadas no conjunto reduzido, sendo identificadas como errôneas. Dessa forma, corrige-se o valor das medidas, eliminando a informação ou utilizando um algoritmo de correção proposto pela literatura.

3.5 FLUXOGRAMA DA FERRAMENTA

A FIGURA 4 apresenta o fluxograma geral da ferramenta proposta.

FIGURA 4 – FLUXOGRAMA DA FERRAMENTA



Fonte: – O Autor (2019)

Inicialmente, as informações do sistema são informados à ferramenta tais como os parâmetros da rede, as medidas e os *status* dos dispositivos chaveáveis.

A partir daí, verifica-se a necessidade da normalização dos dados pela *cpu* de acordo com a natureza da rede: Sistemas de Transmissão (ST), com alta relação X/R , utilizam ângulo de base nulo, o que equivale a normalização por unidade convencional. Já os Sistemas de Distribuição (SD), exigem uma normalização complexa com ângulo de base diferente de zero (cujo valor é obtido a partir da equação (3.39)). Com os dados normalizados, o *EEG – DR* é utilizado, podendo assim contemplar tanto as medidas convencionais ou as pseudomedidas operacionais. A adoção da metodologia desacoplada permite a redução do tempo computacional, claramente impactado quando da adoção da modelagem no nível de seção de barras, tornando-a mais atrativa do que a formulação completa tradicional.

Numa etapa de pós processamento, pode-se verificar também se há erros nas medidas e/ou pseudomedidas, utilizando os testes geométricos desacoplados. A utilização dessa formulação permite o processamento simultâneo de erros em medida e erros de topologia sem que sejam feitas considerações iniciais a cerca da natureza da anomalia.

Após o processamento dos erros e eliminação de todas as fontes da anomalia detectada, encontra-se então o ponto de operação do sistema através dos estados estimados.

3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma formulação desacoplada para a estimação de estados generalizada, onde ramos chaveáveis são explicitamente representados, resultando em um conjunto expandido de variáveis de estado e equações operacionais.

A Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápido (*EEG – DR*) resultante explora o alto desempenho da abordagem de desacoplamento $P\theta - QV$, até aqui restrita ao nível barra-ramo, para lidar com a abordagem generalizada, ou seja, através da extensão do problema para a modelagem no nível de seção de barras.

Visando essas mudanças, este trabalho apresenta também o uso de Normalização Complexa por unidade, ou *cpu*, possibilitando o uso do Estimador de Estado de Desacoplamento Rápido em Sistemas de Distribuição. Assim, a partir da adequação dos dados, pode-se utilizar um método desacoplado auxiliando na eficiência computacional sem que o ponto de operação seja alterado.

Além disso, apresenta-se uma normalização inovadora para as medidas de fasores das correntes, provenientes das unidades de medição fasorial, de forma a permitir seu desacoplamento e inclusão no estimador desacoplado proposto.

Para o pós processamento, duas ferramentas de processamento de erros, os testes geométricos e o teste do χ^2 para a metodologia desacoplada da *EE* foram

apresentadas. Nas duas, não é necessário assumir que a topologia da rede e/ou as medidas disponíveis estão corretas, já que ambas as formulações permitem realizar um processamento simultâneo de erros considerando a formulação desacoplada.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Este capítulo apresenta a implementação e os resultados referentes aos desenvolvimentos da ferramenta proposta. Um programa computacional contemplando as formulações propostas que viabilizam o estimador de estados generalizado desacoplado rápido foi desenvolvido. Para possibilitar a avaliação da ferramenta proposta o programa conta com a possibilidade de escolha entre a formulação completa do estimador e as versões propostas de desacoplamento no modelo e no algoritmo descritas na Seção 1 do Capítulo 3. As simulações e testes envolvendo essa etapa são realizadas com o sistema teste IEEE 14 barras estendido (GÓMEZ-EXPÓSITO; VILLA-JAEN, 2001; ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004) e são descritos na TABELA 1.

TABELA 1 – CASOS SIMULADOS COM A EEG-DR

Seção	Sistema	EEG-DR	
		Caso	Descrição
4.1	IEEE 14 Barras estendido	A	Sistema com 20 ramos convencionais e 73 ramos chaveáveis
		B	Sistema com 42 ramos convencionais e 153 ramos chaveáveis
		C	Sistema com 88 ramos convencionais e 292 ramos chaveáveis
		D	Sistema com 134 ramos convencionais e 438 ramos chaveáveis

FONTE: O autor (2019)

Na sequência os desenvolvimentos e implementações se voltaram para viabilizar o uso das técnicas de normalização complexa por unidade na Estimação de Estados Desacoplada Rápida (*EEDR – cpu*), conforme descrito na Seção 3.2 do capítulo anterior. Dois sistemas de distribuição, um sistema de 136 barras e um sistema de 907 barras, foram utilizados para testar e validar essa etapa da proposta, e cada caso é apresentado na TABELA 2.

O desacoplamento das medidas do fasor de corrente também foram consideradas. Através da implementação da formulação apresentada no Capítulo 3, o sistema teste IEEE 14 barras estendido foi utilizado e o desempenho da ferramenta foi analisado, conforme os testes descritos na TABELA 3.

As ferramentas para o processamento de erros, apresentados no Capítulo 3, também foram implementadas e analisadas. Para as duas ferramentas, o processamento simultâneo de erros em medidas e pseudomedidas na formulação desacoplada foi considerado. Desta forma, não é necessário a adoção de suposições prévias sobre a existência de erros em medidas ou erro de topologia, já que a investigação sobre a natureza do erro precede a identificação dos erros. As simulações realizadas são detalhadas na TABELA 4.

TABELA 2 – CASOS SIMULADOS COM EEG-DR COM CPU

EEG-DR com <i>cpu</i>			
Seção	Sistema	Caso	Descrição
4.2	136 Barras	A1	Topologia Radial
		A2	Topologia Malhada
	907 Barras	B1	GRL = 2,5002
		B2	GRL = 1,0011
		B3	GRL = 3,4997

FONTE: O autor (2019)

TABELA 3 – CASOS SIMULADOS COM EEG-DR COM MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE

EEG-DR com medidas de fasor de corrente			
Seção	Sistema	Caso	Descrição
4.3	IEEE 14 Barras estendido	A1	Plano de medição PM1
		A2	Plano de medição PM2

FONTE: O autor (2019)

TABELA 4 – CASOS SIMULADOS PARA O PROCESSAMENTO DE ERROS NA EEG-DR

Processamento de erros na EEG-DR			
Seção	Sistema	Caso	Descrição
4.4.1	IEEE 14 Barras estendido	A	Erros grosseiros em medidas pelo teste do χ^2
		B	Erros em topologia pelo teste do χ^2
4.4.2		A	Erros grosseiros em medidas pelo teste geométrico
		B	Erros em topologia pelo teste geométrico

FONTE: O autor (2019)

4.1 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO

Para avaliar o desempenho da abordagem generalizada desacoplada proposta (*EEG-DR*), um programa computacional foi implementado usando a plataforma Matlab®:

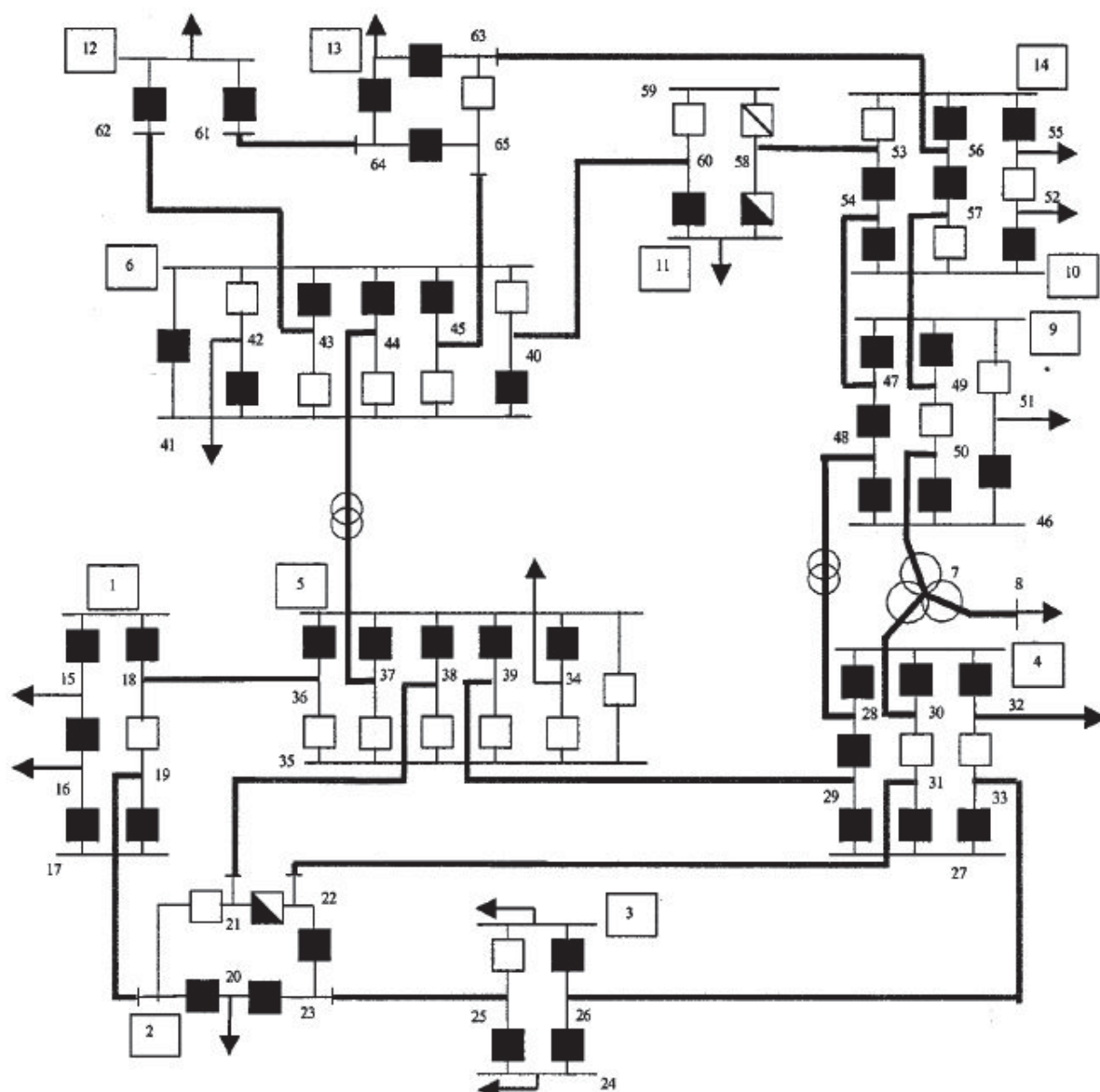
a) um *EEG* tradicional (*EEG – completo*), onde não é aplicada nenhuma técnica de desacoplamento;

b) a versão desacoplada no modelo da *EEG*, referido como *EEG – DRM* (*EEG – DRM*), em que as técnicas de desacoplamento descritas na Seção 3 são exploradas;

c) a versão desacoplada no algoritmo da EEG, denominada *EEG – DRA* (*EEG – DRA*), descrita na Seção 3.

O sistema teste IEEE 14 barras detalhado no nível de seção de barras em Gómez-Expósito e Villa-Jaen (2001) e Abur e Gómez-Expósito (2004) é usado para ilustrar a eficiência e o desempenho do *EEG – DR*. O diagrama unifilar é reproduzido na FIGURA 5, onde em branco são representados os disjuntores abertos e em preto, os fechados.

FIGURA 5 – SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO



Fonte: – (GÓMEZ-EXPÓSITO; VILLA-JAEN, 2001; ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004)

Em todos os casos simulados, assume-se que o sistema teste de 14 barras na FIGURA 5 contém medidas de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos, injeções de potência ativa e reativa, bem como magnitude de tensão em todas as barras. As simulações foram realizadas sem a inclusão de erros aleatórios nas medidas e considerando uma tolerância

de 10^{-3} . Desta forma, a redundância é assegurada e a importância do desempenho computacional é enfatizada, uma vez que um elevado número de medições deve ser processado.

Diferentemente de muitos trabalhos apresentados na literatura envolvendo *EEG*, onde apenas um conjunto bem restrito de subestações suspeitas é representado no nível da seção de barras, os resultados das simulações neste trabalho avaliam várias combinações, incluindo o caso extremo em que todas as SEs do sistema de 14 barras são representadas nesse nível de detalhe. São apresentadas e discutidas comparações sobre a eficiência e o desempenho das versões completa da *EEG* e das versões desacopladas *EEG – DM* e *EEG – DA*. Esta seção compara o desempenho do *EEG* completo com as versões desacoplada no modelo e no algoritmo do *EEG – DR* proposto.

4.1.1 Sistema IEEE 14 barras com subestações detalhadas: 65 nós, 73 disjuntores

Os resultados nesta seção correspondem a simulações em que todo o sistema teste de 14 barras é modelado no nível da seção de barra, resultando em uma rede de 65 nós e 73 disjuntores, exatamente como ilustrado na FIGURA 5.

Para avaliar o impacto das aproximações impostas pela formulação desacoplada quando comparado com a abordagem completa (onde não é feita nenhuma aproximação), os valores estimados para a magnitude e o ângulo da tensão em cada barra obtido pelo estimador de estados são comparados com os valores "verdadeiros", ou seja, as tensões nas barras resultantes do cálculo exato do fluxo de potência, de onde todas as medições foram simuladas. O erro absoluto (ε_k), o erro absoluto médio ($\bar{\varepsilon}$), e o desvio padrão (σ), dado pelas equações a seguir, são as métricas usadas para avaliar os resultados:

$$\varepsilon_k = |\hat{x}_k - x_k| \quad (4.1)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n_b} \sum_{k=1}^{n_b} \varepsilon_k \quad (4.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_b} |\varepsilon_k - \bar{\varepsilon}|^2}{n_b - 1}} \quad (4.3)$$

onde:

\hat{x}_k é o valor da magnitude/ângulo de tensão estimada para a barra k ;

x_k é o valor verdadeiro da magnitude/ângulo de tensão para a barra k .

A TABELA 5 mostra os erros máximos e os médios para cada caso. Embora um nível diferente de erros seja encontrado para as formulações desacopladas, como esperado, não afeta a qualidade dos resultados.

4.1.2 Impacto do número de SEs modeladas no esforço computacional

O *EEG – DR* proposto pode ser aplicado da mesma maneira que a forma mais tradicional de *EEG*, onde a estimação de estados em dois estágios é adotada. Nesse caso, a

TABELA 5 – COMPARAÇÃO DAS MÉTRICAS PARA AS DIFERENTES FORMULAÇÕES ($\times 10^{-3}$)

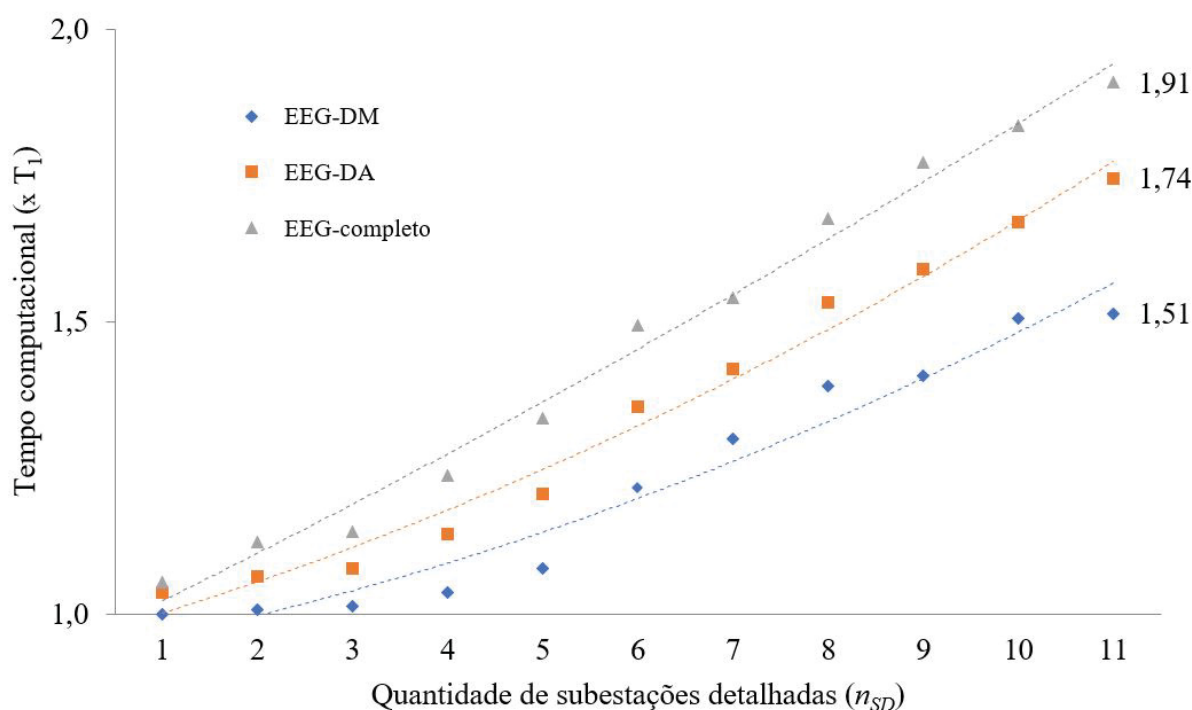
Item	Magnitude			Ângulo		
	ε_k^{max}	$\bar{\varepsilon}$	σ	ε_k^{max}	$\bar{\varepsilon}$	σ
EEG-completo	1.24	0.34	0.44	0.02	0.01	0.01
EEG-DA	1.25	0.34	0.44	0.21	0.02	0.01
EEG-DM	1.25	0.35	0.45	0.37	0.03	0.01

FONTE: O autor (2019)

modelagem barra-ramo é adotada no primeiro estágio e apenas uma área suspeita, com um número reduzido de barras, é processada no nível de seção de barras no segundo estágio. Alternativamente, considerando o alto desempenho reconhecido das abordagens desacopladas, a *EEG – DR* proposta pode ser explorada para permitir a representação de um maior número de subestações, ou mesmo toda a rede, no nível de seção de barras.

Para ilustrar o desempenho das versões do *EEG – DR* quanto ao número de subestações representadas no nível de seção de barras, o tempo computacional (T_c) requerido para o sistema teste de 14 barras em diversos casos foi observado, e apresentado na FIGURA 6.

FIGURA 6 – TEMPO COMPUTACIONAL PELO O NÚMERO DE SUBESTAÇÕES DETALHADAS



Fonte: – O autor (2019)

A primeira simulação refere-se a $n_{SD} = 1$ (sendo n_{SD} o número de subestações detalhadas), ou seja, apenas uma das 14 subestações é modelada no nível de seção de barras. A segunda simulação refere-se a $n_{SD} = 2$, ou seja, duas subestações são modeladas

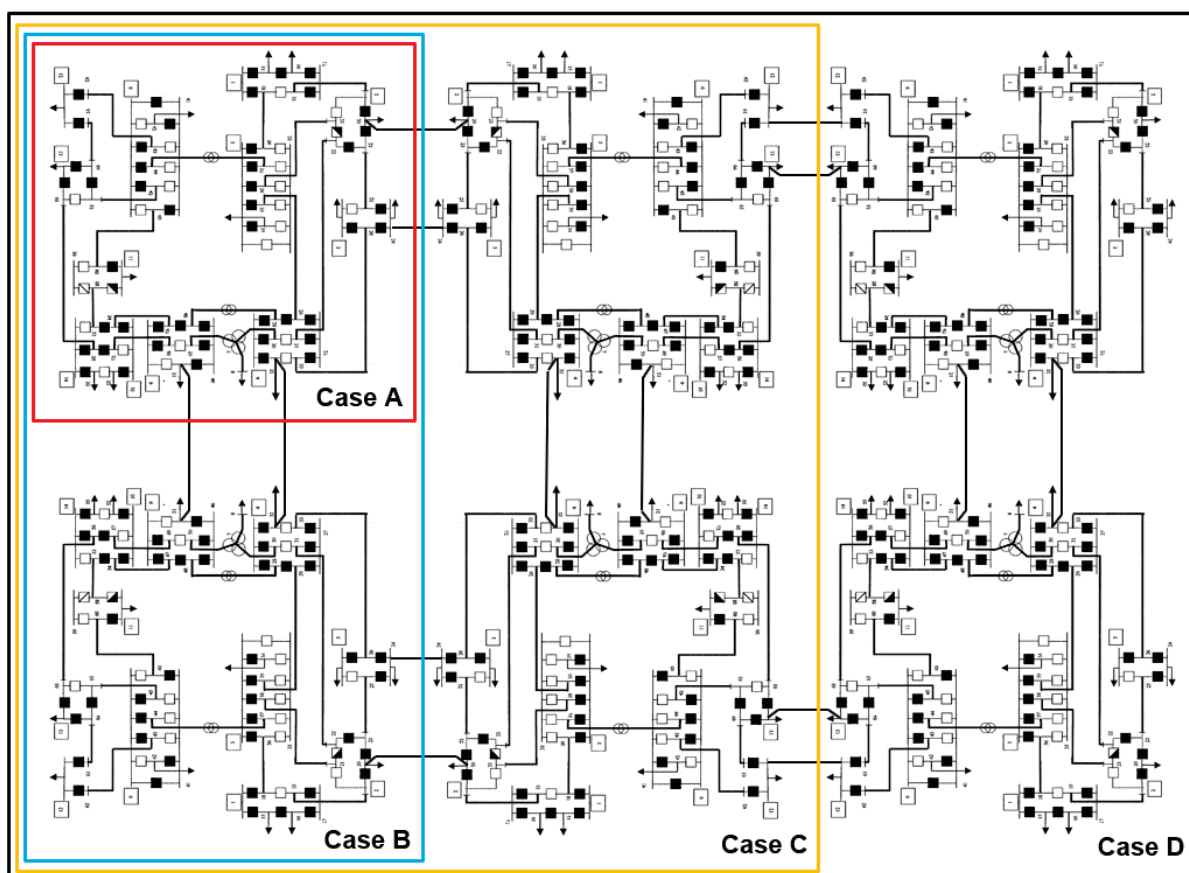
no nível da seção de barras, e assim por diante até que toda a rede seja representada de forma detalhada. O tempo T_1 é o tempo computacional quando nenhuma das subestações é representada detalhadamente.

A partir da FIGURA 6 verifica-se que a superioridade do *EEG – DR*, especialmente a abordagem desacoplada no modelo, já que o tempo computacional é tanto mais afetado quanto maior for o número de subestações modeladas, tornando sua aplicação ainda mais atraente do que o *EEG – completo* quando se trata de áreas suspeitas maiores ou com toda a rede modelada no nível de seção de barras.

4.1.3 Impacto da dimensão do sistema no esforço computacional

Para avaliar o impacto da dimensão da rede no desempenho de ambas as versões da abordagem proposta em relação ao *EEG – completo*, foi realizada uma nova sequência de simulações. A FIGURA 7 ilustra os casos simulados que contemplam n sistemas de 14 barras interligados (onde $n = 1, 2, 4, 6$). Toda as subestações são representadas no nível de seção de barras em todos os casos.

FIGURA 7 – INTERLIGAÇÃO DE SISTEMAS TESTE 14 BARRAS ESTENDIDO



Fonte: – O autor (2019)

A primeira simulação compreende um sistema-teste de 14 barras completamente

modelado no nível de seção de barras (como representado na FIGURA 7), denominado *Caso A*. A segunda simulação compreende um sistema-teste composto de 2 sistemas de 14 barras interligados completamente modelado no nível seção de barras (referido como *Caso B*). Nessa mesma linha são realizadas a terceira simulação, que compreende um sistema teste de 4x14 barras (*Caso C*), e por fim, um sistema teste de 6x14 barras (*Caso D*). O impacto das interconexões entre os sistemas é descrito na TABELA 6

A FIGURA 8 mostra o tempo computacional exigido pelas três abordagens de estima-

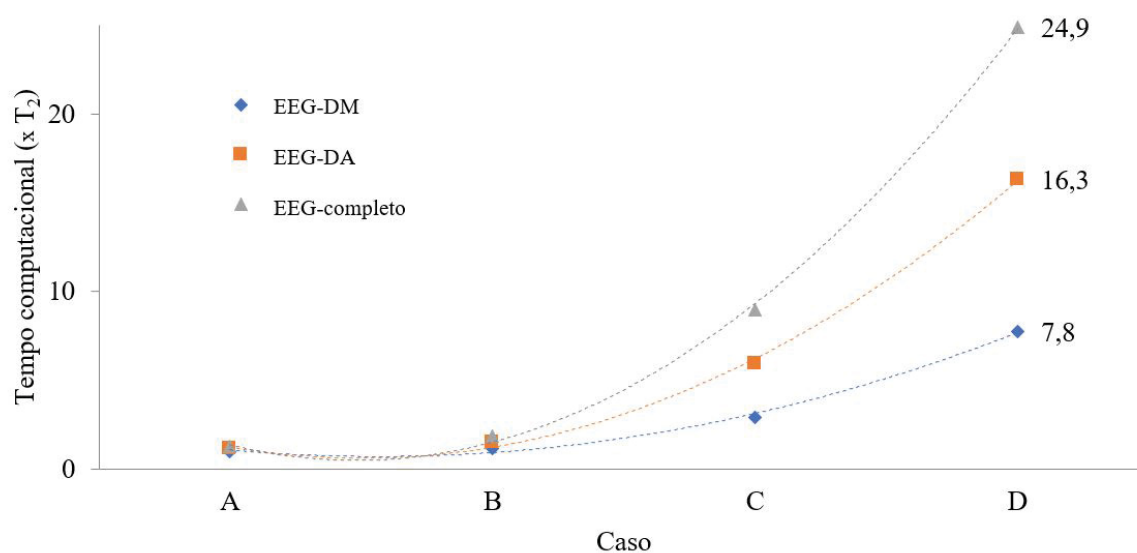
TABELA 6 – RESUMO DA INTERCONEXÃO DOS SISTEMAS TESTE 14 BARRAS

Caso	n_{14b}	N° de nós	N° de ramos convencionais	N° de ramos chaveáveis
A	1	65	20	73
B	2	130	42	153
C	4	260	88	292
D	6	390	134	438

FONTE: O autor (2019)

ção de estados consideradas para cada caso, onde T^2 é o tempo computacional exigido pelo *Caso A*.

FIGURA 8 – TEMPO COMPUTACIONAL DE SISTEMAS TESTE 14 BARRAS COMPOSTOS



Fonte: – O autor (2019)

Os resultados obtidos enfatizam que o uso das versões desacopladas reduz significativamente o impacto no tempo computacional causado pelo aumento do tamanho do sistema. Também é possível verificar a superioridade da versão do *EEG-DRM* em relação ao *EEG-DRA*. Isso era esperado, pois o primeiro considera simplificações adicionais, reduzindo o tempo computacional necessário para alcançar a convergência.

4.2 ESTIMADOR DE ESTADOS GENERALIZADO DESACOPLADO RÁPIDO COM CPU

Esta seção tem por objetivo avaliar o desempenho do estimador de estados para sistemas de elétricos de potência através do método desacoplado rápido aplicado a sistemas com baixa relação X/R ($EEDR - cpu$). Dois sistemas-teste são utilizados, conforme descrito nas próximas seções.

4.2.1 Caso A: Sistema teste 136 Barras

O sistema teste de distribuição de 136 barras, cujo diagrama unifilar está ilustrado na FIGURA 9. Os dados originais podem ser encontrados em Mantovani, Casari e Romero (2000), e a relação X/R média das linhas são 1,78. Para normalização dos dados em cpu , foi considerado 100 MVA para a potência de base, 13,8 kV para a tensão de base. Já o ângulo de base foi calculado pela equação (3.39), conforme os dados de cada sistema. Fontes de geração distribuída foram incluídas em 10 barras do sistema, como mostrado na FIGURA 9. Já as linhas tracejadas representam linhas de transmissão conectadas à rede através de duas chaves normalmente abertas, e são representadas explicitamente no modelo da rede, conforme descrito no Capítulo 3. Também, as $PMUs$ foram incluídas nas barras 1, 30, 61 e 72. Duas condições de operação foram consideradas:

- Caso A1 - Topologia Radial: todos as chaves estão abertas. A normalização cpu é conduzida através de um ângulo de base de $39,12^\circ$.
- Caso A2 - Topologia Malhada: todos as chaves estão fechadas. Um ângulo de base de $38,63^\circ$ é aplicado neste caso.

Com relação ao plano de medição, em todos os casos simulados, assume-se que o sistema teste contém medidas de fluxo de potência ativa e reativa em um único extremo de cada ramo, injeções de potência ativa e reativa, bem como magnitude de tensão em todas as barras.

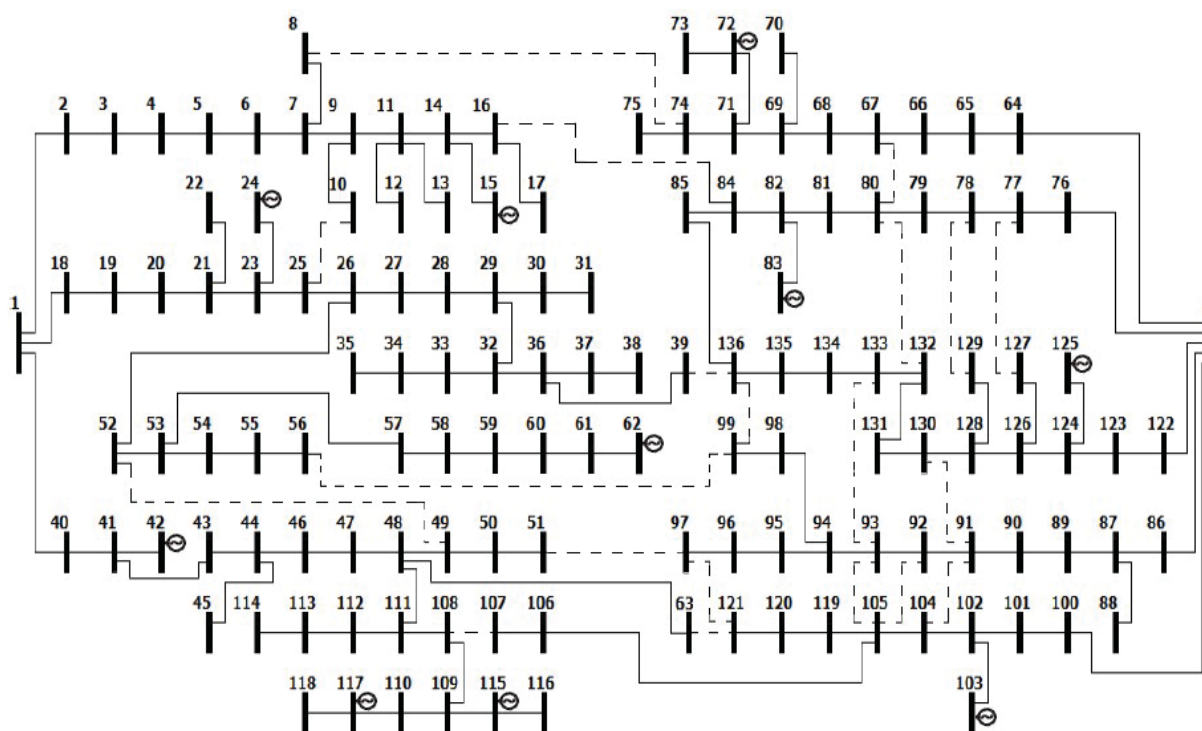
Neste caso, são comparados os valores verdadeiros dos estados, com aqueles obtidos com a versão completa do Estimador de Estados ($EE - completo$) e com a formulação proposta ($EEDR - cpu$), descrito na Seção 2 do Capítulo 3.

Além disso, a comparação avalia também o desempenho da ferramenta para diferentes valores de ϕ_{base} , calculados através da equação (3.39). O Erro Absoluto Máximo (ε^{max}), o Erro Médio Absoluto ($\bar{\varepsilon}$) e o Desvio Padrão (σ), dado pelas equações (4.1) (4.2) e (4.3), são as métricas usadas para avaliar os resultados referentes aos estados estimados.

4.2.1.1 Caso A1: Configuração Radial

No Caso A1, considera-se a configuração radial. O ângulo base ϕ_{base} utilizado para a normalização dos dados em cpu é de $39,12^\circ$, calculado através da equação (3.39). A FIGURA 10 mostra o Erro Médio Absoluto ($\bar{\varepsilon}$) para os diferentes ângulos de base. É importante ressaltar

FIGURA 9 – SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS



Fonte: – (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000)

que para ângulos menores de 30° e maiores que 60° , não há convergência.

O $\phi_{base} = 39,12^\circ$ é o ângulo que fornece o melhor resultado com menor ($\bar{\epsilon}$) para as magnitudes e ângulos de tensões, uma vez que leva em conta as informações das ramificações do sistema.

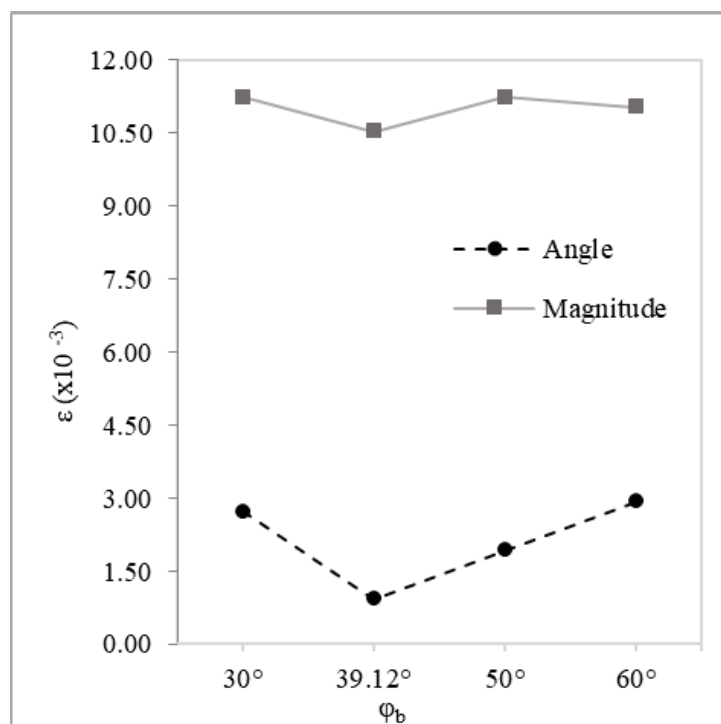
A FIGURA 11 apresenta um valor de desvio padrão menor para as magnitudes e os ângulos de tensão estimados para os ϕ_{base} possíveis. Observa-se que uma estimativa melhor é obtida com $\phi_{base} = 39,12^\circ$ em relação aos outros valores simulados, uma vez que as características intrínsecas do sistema conduzem ao valor obtido.

4.2.1.2 Caso A2: Configuração Malhada

Uma configuração malhada é testada no Caso A2, com o objetivo de avaliar o $EEDR_{cpu}$ considerando esse novo perfil de operação possível para sistemas de distribuição. O ϕ_{base} adotado é de $38,63^\circ$, calculado através da equação (3.39). O Erro Médio Absoluto ($\bar{\epsilon}$) para a magnitude e o ângulo da tensão com configuração malhada são apresentados na FIGURA 12.

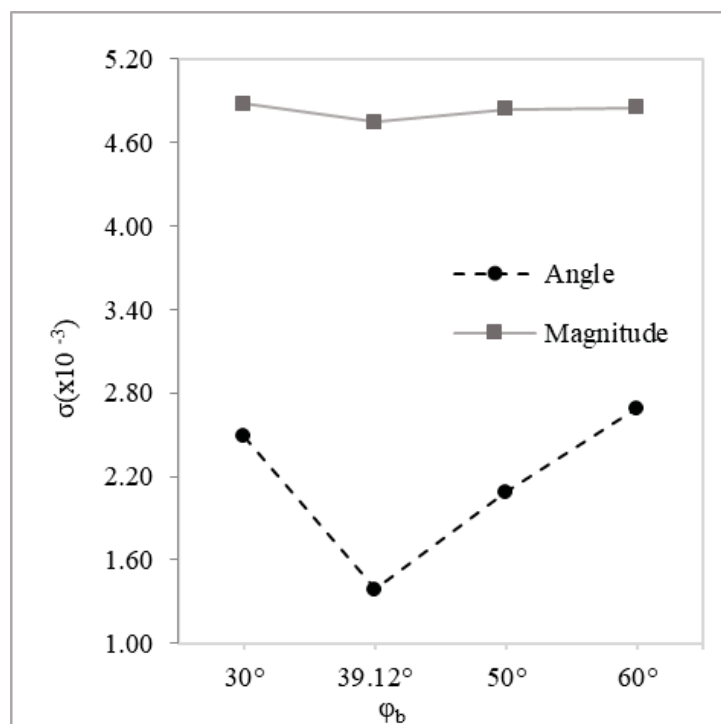
A simulação foi realizada considerando a mesma variação do ângulo base apresentada na FIGURA 10. Assim como no Caso A1, referente a configuração radial, vale ressaltar que as simulações realizadas com ângulos de base menores que 30° e maiores que 60° o método proposto não converge, reforçando a importância da cpu e da adoção de um ângulo de base adequado. De acordo com a FIGURA 12, o $\phi_{base} = 38,63^\circ$ é o ângulo que fornece o melhor

FIGURA 10 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO A1



Fonte: – O autor (2019)

FIGURA 11 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO A1

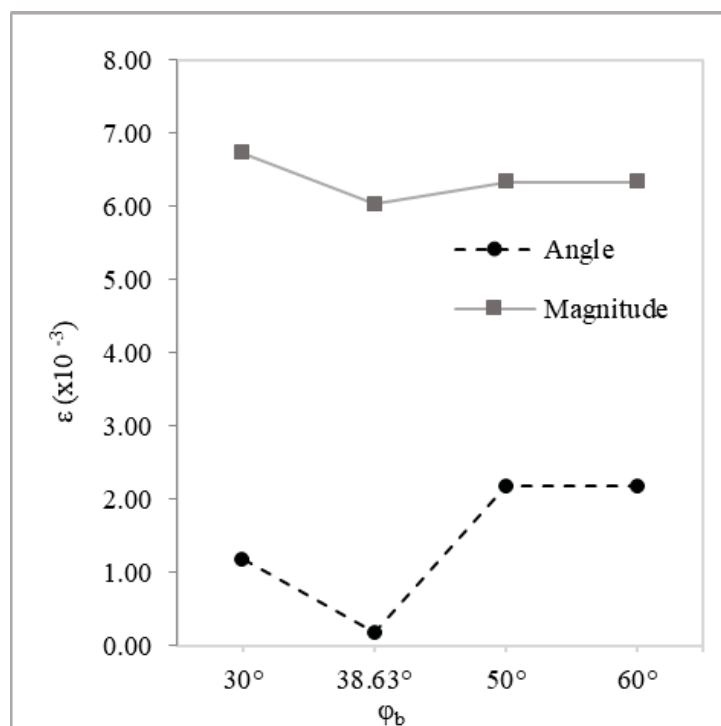


Fonte: – O autor (2019)

resultado com menor Erro Médio Absoluto ($\bar{\varepsilon}$) para a magnitude e ângulo da tensão.

A FIGURA 13 apresenta o Desvio Padrão (σ) para magnitudes e ângulos de tensão

FIGURA 12 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO A2



Fonte: – O autor (2019)

considerando a mesma variação para o ângulo de base. De modo semelhante, na FIGURA 13 o $\phi_{base} = 38,63^\circ$ resulta em um valor de Desvio Padrão menor para as magnitudes e os ângulos das tensões estimados.

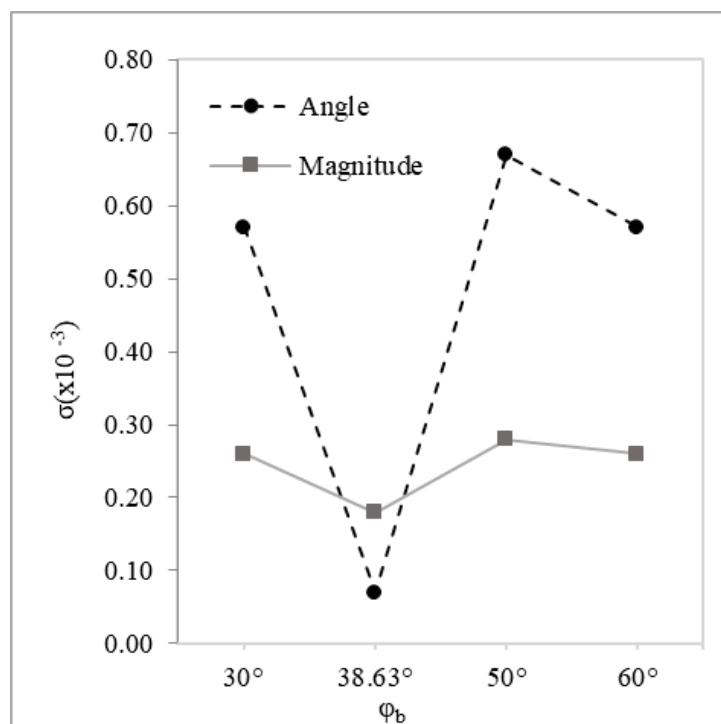
4.2.2 Caso B: Sistema teste 907 barras

Nesta seção, o sistema teste de distribuição de 907 barras é utilizado, cujo diagrama unifilar está ilustrado na FIGURA 14. Os dados originais podem ser encontrados em IEEE... (s.d.), e a relação X/R média das linhas são 0,6382. Para normalização dos dados em cpu , foi considerado 1 MVA para a potência de base, 416 V para a tensão de base e um ângulo base $\phi_{base} = 81,30^\circ$.

Com relação ao plano de medição, em um primeiro caso, assume-se que o sistema teste contém medidas de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos, injeções de potência ativa e reativa, bem como magnitude de tensão em todas as barras. Assim como foi realizado para o Caso A, este caso também buscou avaliar também o desempenho da ferramenta para diferentes valores de ϕ_{base} , calculados através da equação (3.39). O Erro Absoluto Máximo (ϵ^{max}), o Erro Médio Absoluto ($\bar{\epsilon}$) e o Desvio Padrão (σ), dado pelas equações (4.1) (4.2) e (4.3), são as métricas usadas para avaliar os resultados.

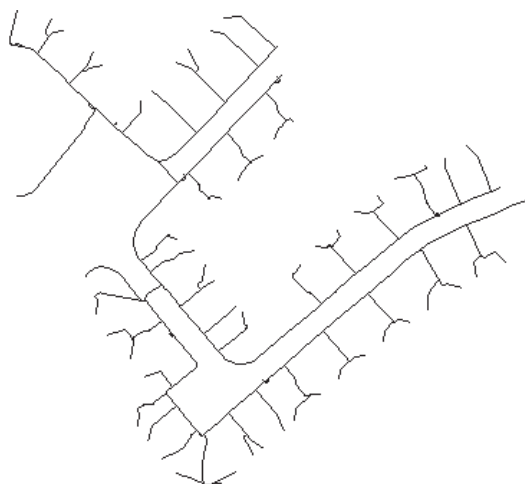
A FIGURA 15 mostra o Erro Médio Absoluto ($\bar{\epsilon}$) para os diferentes ângulos de base. Para ângulos menores de 40° , não há convergência.

FIGURA 13 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO A2



Fonte: – O autor (2019)

FIGURA 14 – SISTEMA TESTE DE 907 BARRAS

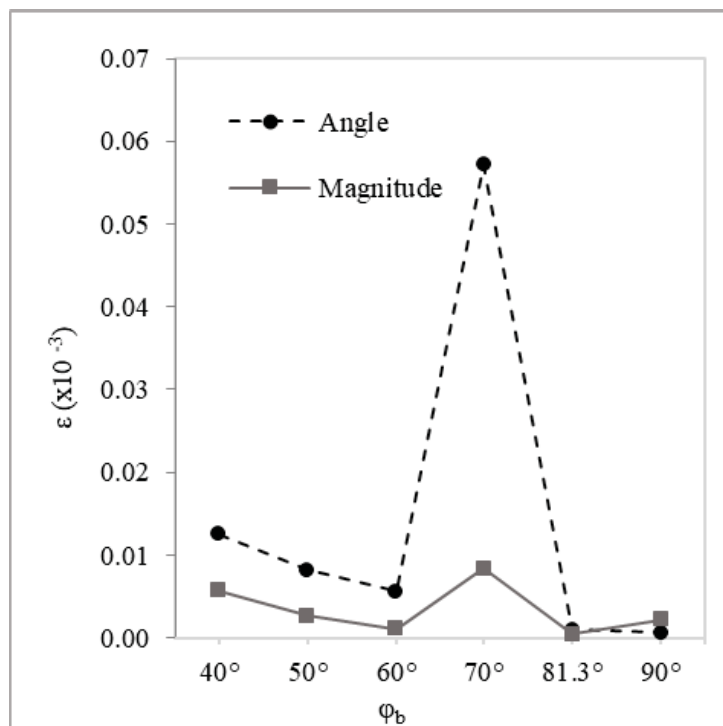


Fonte: – (IEEE..., s.d.)

O $\phi_{base} = 81,30^\circ$ é o ângulo que fornece o melhor resultado com menor ($\bar{\epsilon}$) para as magnitudes e ângulos de tensões, uma vez que leva em conta as informações das ramificações do sistema e, por essa razão, esse ângulo é capaz de dar o melhor ponto de operação.

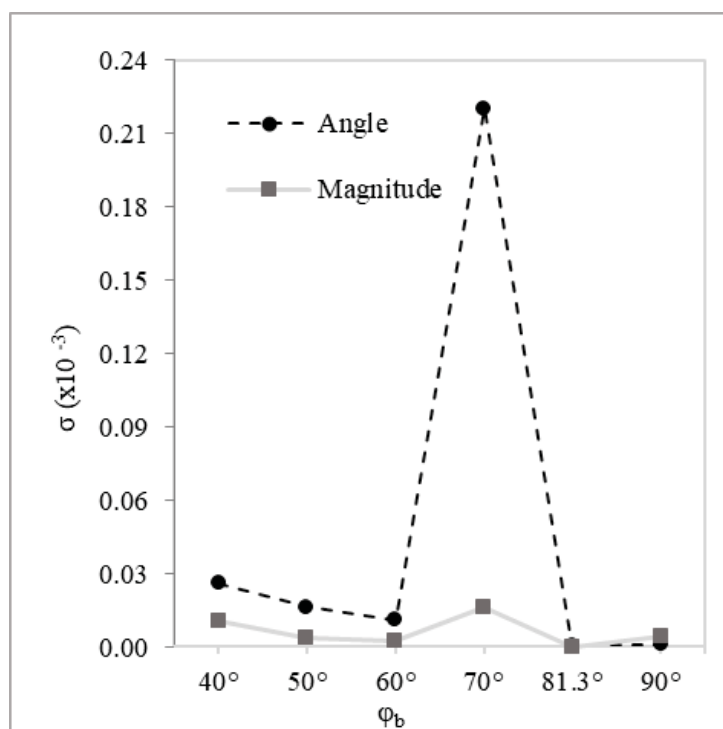
Da mesma forma, a FIGURA 16 apresenta um valor de desvio padrão menor para as magnitudes e os ângulos de tensão estimados para os ϕ_{base} possíveis. Observa-se que uma estimativa melhor é obtida com $\phi_{base} = 81,30^\circ$ em relação os outros valores simulados, uma vez que as características intrínsecas do sistema conduzem ao valor obtido.

FIGURA 15 – ERRO MÉDIO ABSOLUTO PARA O CASO B



Fonte: – O autor (2019)

FIGURA 16 – DESVIO PADRÃO PARA O CASO B



Fonte: – O autor (2019)

4.2.3 Análise do desempenho computacional

Assim como relatado em (MONTICELLI; GARCIA, 1990), a eficácia dos métodos desacoplados para a estimação de estados é comprovada, e com a aplicação da normalização *cpu*, mesmo com a extensão do problema e sua aplicação em sistemas de distribuição, a eficiência é mantida. Isso significa que, embora a abordagem desacoplada, adotada neste trabalho, introduza aproximações na formulação, isto pouco influencia nas métricas, não afetando a qualidade dos resultados.

TABELA 7 – PRECISÃO COM BASE EM MÉTRICAS DEFINIDAS ($\times 10^{-3}$)

		Magnitude			Ângulo		
		ε_k^{max}	$\bar{\varepsilon}$	σ	ε_k^{max}	$\bar{\varepsilon}$	σ
A1	<i>EEDR – cpu</i>	22,2	10,5	4,75	3,69	0,93	1,39
	<i>EE – completo</i>	22,2	10,6	4,75	1,48	0,47	0,50
A2	<i>EEDR – cpu</i>	6,94	6,3	0,18	0,27	0,17	0,7
	<i>EE – completo</i>	6,92	6,2	0,18	0,20	0,11	0,5
B	<i>EEDR – cpu</i>	0,14	0,4	0,2	0,20	0,9	0,9
	<i>EE – completo</i>	0,6	0,2	0,3	0,7	0,3	0,6

FONTE: O autor (2019)

O impacto do ângulo de base no desempenho de convergência da *EEDR – cpu* também é avaliado para os casos A e B. A TABELA 8 mostra o número de iterações quando o ângulo de base diferentes é aplicado.

TABELA 8 – IMPACTO DO ÂNGULO DE BASE NO NÚMERO DE ITERAÇÕES ATIVAS/REATIVAS

Caso	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
A1	Sem convergência			7/7	3/3	5/4	8/7	Sem convergência		
A2	Sem convergência			6/5	3/2	4/3	7/6	Sem convergência		
B	Sem convergência			15/13		5/4	4/3	3/3	2/2	3/4

FONTE: O autor (2019)

Os resultados nesta seção demonstram claramente a adequação do cálculo do ângulo de base, calculado pela equação (3.39), uma vez que os valores obtidos para os casos estão dentro do intervalo que apresenta o menor número de iterações, conforme indicado na TABELA 8. Deve ser enfatizado que a convergência não é alcançada se normalização *pu* convencional (equivalente a $\phi_{base} = 0$) é considerado.

A fim de demonstrar o desempenho da proposta em termos de tempo computacional, vários casos foram simulados quando o *EEDR – cpu* e o *EE – completo* são aplicados. Adicionalmente, níveis distintos de redundância são considerados para o Caso B, levando a

três diferentes níveis de redundância global (GRL), definidos como a razão entre o número de medidas e o número de estados a estimar:

- Caso B1: o Caso B considerando o plano de medição original, que tem um GRL de 2,5002;
- Caso B2: presença de medidas de fluxo de potência ativa e reativa em ramos convencionais, injeções de potência ativa e reativa, bem como medidas de tensão de magnitude apenas na barra 1, reduzindo o GRL para 1,0011;
- Caso B3: presença de medidas de fluxo de potência ativa e reativa em ambas as extremidades dos ramos convencionais, injeções de potência ativa e reativa, bem como medidas de tensão de magnitude em todas as barras, aumentando o GRL para 3,4997.

A TABELA 9 apresenta a comparação do tempo computacional entre as metodologias de $EEDR - cpu$ e $EE - completo$ para todos os casos discutidos.

TABELA 9 – TEMPO COMPUTACIONAL (EM SEGUNDOS)

Caso	$EE - completo$	$EEDR - cpu$	
		Com $\phi_{base} = 0^\circ$	Com ϕ_{base} por Eq.(3.39)
A1	1,44	Sem convergência	0,57
A2	0,60	Sem convergência	0,45
B1	69,3	Sem convergência	32,82
B2	16,43	Sem convergência	8,25
B3	136,76	Sem convergência	54,3

FONTE: O autor (2019)

Como pode ser visto na TABELA 9, o $EEDR - cpu$ proposto é pelo menos 50% mais rápido do que $EE - completo$. Além disso, em qualquer caso de Sistema de Distribuição, nenhuma convergência é observada para o estimador desacoplado sem normalização cpu .

4.3 INCORPORAÇÃO DE MEDIDAS MODIFICADAS DE FASOR DE CORRENTE NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA

Nesta seção, a análise da influência da incorporação de medidas modificadas de fasor de corrente na $EEG - DR$ é realizada. O sistema de 14 barras estendido apresentado na FIGURA 5 é utilizado, e a formulação apresentada na Seção 3.3 é então considerada, visando verificar o comportamento da medida modificada de fasor de corrente em uma formulação desacoplada.

Inicialmente, considera-se um plano de medição com medidas de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos convencionais, nos dois extremos, injeção de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema, e medida de magnitude de tensão e ângulo na barra 1.

A partir disso, fez-se a comparação entre os estados estimados (tensões complexas em todas as barras) com e sem o auxílio das medidas do fasor de corrente com os valores verdadeiros, obtidos através do fluxo de potência. Na TABELA 10, a comparação considerando medidas perfeitas é apresentada:

TABELA 10 – INFLUÊNCIA DAS MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE DESACOPLADAS NOS ESTADOS ESTIMADOS (SEM ERRO ALEATÓRIO)

	Valores Verdadeiros		Sem medida de corrente		Com medida de corrente	
	V	θ	V	θ	V	θ
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
2	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686
3	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547
4	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
5	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
6	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
7	0,9744	-15,1649	0,9744	-15,1649	0,9744	-15,1649
8	1,0000	-15,1649	1,0000	-15,1649	1,0000	-15,1649
9	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
10	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062
11	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593
12	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123
13	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426
14	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9459	-18,5329
15	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
16	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
17	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
18	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
19	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
20	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686

A TABELA 10 mostra a influência da inclusão da medida modificada do fasor de corrente na formulação desacoplada. A adição dessas medidas auxilia na redundância e, portanto, para o processo de estimação de estados, auxiliando na obtenção do ponto de operação do sistema. Os resultados com medidas perfeitas resumidos na TABELA 10, permitem concluir que as modificações aplicadas na medida do fasor de corrente, conforme apresentado na Seção 3.3, permite incorporá-las na formulação desacoplada, sem que haja prejuízos para a obtenção das estimativas dos estados.

Num segundo momento, erros aleatórios são adicionados às medidas, visando aproximar o comportamento do plano de medição ao comportamento de medidores reais, verificando assim o comportamento da ferramenta em condições reais de operação. Considera-se novamente a comparação do plano de medição mencionado no início desta seção (medidas de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos convencionais, nos dois extremos, injeção de potência ativa e reativa em todas as barras do sistema, e medida de magnitude de tensão e

	Valores Verdadeiros		Sem medida de corrente		Com medida de corrente	
	V	θ	V	θ	V	θ
21	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686
22	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686
23	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686
24	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547
25	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547
26	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547
27	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
28	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
29	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
30	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
31	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
32	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
33	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
34	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
35	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
36	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
37	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
38	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
39	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707
40	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
41	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
42	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
43	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
44	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
45	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0000	-16,7456
46	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
47	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
48	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
49	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
50	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
51	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
52	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062
53	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062
54	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062
55	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9459	-18,5329
56	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9459	-18,5329
57	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9459	-18,5329
58	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593
59	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000
60	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593
61	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123
62	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123
63	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426
64	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426
65	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426

ângulo na barra 1) com os valores verdadeiros obtidos através do fluxo de potência. Também, comparam-se os valores verdadeiros com o plano de medição 1 (PM1), que considera o plano inicial adicionado de medidas modificadas do fasor de corrente nos 20 ramos convencionais, e com o plano de medição 2 (PM2), onde são consideradas medidas modificadas do fasor de corrente em todos os ramos.

TABELA 11 – INFLUÊNCIA DAS MEDIDAS DE FASOR DE CORRENTE DESACOPLADAS NOS ESTADOS ESTIMADOS (COM ERRO ALEATÓRIO)

	Valores Verdadeiros		Sem medida de corrente		PM1		PM2	
	V	θ	V	θ	V	θ	V	θ
1	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
2	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0044	-5,8426	1,0044	-5,8426
3	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0033	-14,7554	1,0044	-14,7554
4	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
5	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
6	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
7	0,9744	-15,1649	0,9744	-15,1649	0,9767	-15,0822	0,9767	-15,0822
8	1,0000	-15,1649	1,0000	-15,1649	1,0026	-15,0844	1,0026	-15,0844
9	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
10	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9596	-17,2144	0,9596	-17,2144
11	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9775	-17,0839	0,9775	-17,0839
12	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9845	-17,0839	0,9845	-17,0839
13	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9789	-17,6997	0,9789	-17,6997
14	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9480	-18,4391	0,9480	-18,4391
15	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
16	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
17	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
18	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
19	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
20	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0044	-5,8426	1,0044	-5,8426

Assim como observado no caso sem erros aleatórios, verifica-se que a adição de erros aleatórios às medidas do plano de medição não irá influenciar na obtenção do ponto de operação. Também, a adição das medidas modificadas do fasor de corrente não irão afetar negativamente no processo de estimação de estados quando utilizada a formulação desacoplada. É possível observar, por exemplo, para a barra 14. Há uma diferença de valores dos ângulos comparados com o o ângulo verdadeiro para aquela barra. Porém, a diferença é aceitável, já que está dentro da tolerância aceitável para a simulação, que é de 10^{-3} .

Com isso, é possível concluir que o uso da medida modificada do fasor de corrente pode ser utilizada no *EEG – DR*, e através dessas modificações, conforme proposto na Seção 3.3, o desacoplamento dessas informações, adicionando o módulo modificado ao problema ativo e o ângulo modificado ao problema reativo, se torna possível. Dessa forma, através das modificações propostas, as medidas disponíveis num plano de medição real podem ser agregadas ao processo, sem que haja problemas ao ponto de operação obtido. Além disso,

	Valores Verdadeiros		Sem medida de corrente		PM1		PM2	
	V	θ	V	θ	V	θ	V	θ
21	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0044	-5,8426	1,0044	-5,8426
22	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0044	-5,8426	1,0044	-5,8426
23	1,0000	-5,8686	1,0000	-5,8686	1,0044	-5,8426	1,0044	-5,8426
24	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0033	-14,7554	1,0044	-14,7554
25	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0033	-14,7554	1,0044	-14,7554
26	1,0000	-14,7547	1,0000	-14,7547	1,0033	-14,7554	1,0044	-14,7554
27	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
28	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
29	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
30	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
31	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
32	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
33	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852	0,9771	-11,6852
34	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
35	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
36	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
37	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
38	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
39	0,9800	-10,0707	0,9800	-10,0707	0,9834	-10,0076	0,9834	-10,0076
40	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
41	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
42	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
43	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
44	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
45	1,0000	-16,7456	1,0000	-16,7455	1,0027	-16,6665	1,0027	-16,6665
46	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
47	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
48	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
49	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
50	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
51	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304	0,9584	-17,0304
52	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9596	-17,2144	0,9596	-17,2144
53	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9596	-17,2144	0,9596	-17,2144
54	0,9576	-17,3062	0,9576	-17,3062	0,9596	-17,2144	0,9596	-17,2144
55	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9480	-18,4391	0,9480	-18,4391
56	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9480	-18,4391	0,9480	-18,4391
57	0,9459	-18,5329	0,9459	-18,5331	0,9480	-18,4391	0,9480	-18,4391
58	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9775	-17,0839	0,9775	-17,0839
59	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0045	0,0000	1,0045	0,0000
60	0,9747	-17,1593	0,9747	-17,1593	0,9775	-17,0839	0,9775	-17,0839
61	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9845	-17,0839	0,9845	-17,0839
62	0,9820	-17,7123	0,9820	-17,7123	0,9845	-17,0839	0,9845	-17,0839
63	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9789	-17,6997	0,9789	-17,6997
64	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9789	-17,6997	0,9789	-17,6997
65	0,9750	-17,7426	0,9750	-17,7426	0,9789	-17,6997	0,9789	-17,6997

numa situação real, pode haver uma escassez de medidas, e portanto, as que estão disponíveis são fundamentais para auxiliar na redundância necessária para o processo de estimação de estados acontecer.

4.4 PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA

Nesta seção, o processamento de erros para a *EEG – DR* é explorada em duas formulações: o teste do χ^2 e o teste geométrico. Para as duas formulações, a modelagem da rede no nível de seção de barras e a abordagem desacoplada são consideradas. Cabe ressaltar que o método de processamento de erros simultâneos não faz suposições prévias de que as medidas estão corretas para tratar erros na topologia da rede ou vice-versa.

4.4.1 Processamento de erros na EEG-DR pelo teste do χ^2

Simulações e testes conduzidas com o sistema-teste de 14 barras do IEEE (GÓMEZ-EXPÓSITO; VILLA-JAEN, 2001; ABUR; GÓMEZ-EXPÓSITO, 2004) foram realizadas visando avaliar o desempenho do algoritmo proposto na Seção 4 do Capítulo 3, relativo ao processamento simultâneo de erros. A FIGURA 5 ilustra o diagrama unifilar correspondente a modelagem no nível de subestação do referido sistema-teste. A representação detalhada da rede eleva o número de barras/nós da rede de 14 para 65. Além disso, nessa modelagem tem-se representados 73 disjuntores, elevando o número de variáveis de estado do sistema completo para 275. Esses valores salientam a importância da abordagem desacoplada para a estimação e processamento de erros na *EEG*, conforme adotado nesse trabalho.

Buscando avaliar a metodologia e alto grau de redundância, para o plano de medição referente ao conjunto de informações convencionais foram consideradas medidas de fluxo de potência ativa/reactiva em um extremo para todos os ramos convencionais, medidas de injeção de potência ativa/reactiva em todas as barras e medidas de magnitude de tensão em todas as barras. Já para o conjunto de informações operacionais da rede foram consideradas as pseudomedidas correspondentes aos ramos chaveáveis, sendo elas a diferença angular e a diferença de potencial nulas para os disjuntores fechados e os fluxos de potência ativa e reativa nulos para os disjuntores abertos. Os índices $J_m^A(x)$, $J_m^R(x)$, $J_{op}^A(x)$ e $J_{op}^R(x)$ desacoplados foram comparados com a distribuição χ^2 correspondente para cada caso considerando 95% de confiança.

O grau de liberdade para o conjunto de medidas ativas, determinado a partir da equação (3.129), é de 23. Da mesma forma, utilizando a equação (3.130), o grau de liberdade do conjunto de medidas reativas é de 84. Uma vez que o número de pseudomedidas-operacionais ativas/reactivas é igual ao número variáveis de estado operacionais ativa/reactiva, o grau de liberdade para ambas as partições é nulo. Consequentemente, os valores de χ^2 são de 35,1725 (para o conjunto de medidas ativas); de 107,5217 (para o conjunto de medidas reativas) e 0 (para os conjuntos de pseudomedidas-operacionais).

Dois casos foram considerados: *Caso A*, em que erros grosseiros simples e múltiplos

em medidas são simulados; *Caso B*, em que erros de topologia do tipo exclusão e inclusão são simulados. Os casos são descritos a seguir:

- Caso A1 - Erro simples em medida ativa na linha 7-50;
- Caso A2 - Erro simples em medida reativa na linha 7-50;
- Caso A3 - Erro múltiplo em medidas ativa e reativa na linha 7-50;
- Caso B1 - Erro de exclusão envolvendo o disjuntor 13-64;
- Caso B2 - Erro de inclusão envolvendo o disjuntor 52-55.

4.4.1.1 Caso A: Erros Grosseiros em Medidas

Caso A1

Na primeira simulação, um erro na medida de fluxo de potência ativo na linha 7-50 foi considerado e os índices para $J(x)$ são apresentados na segunda coluna da TABELA 12.

TABELA 12 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^A

	Com erro em z_{7-50}^A	Valor dos índices $J(x)$ para erro simples em z_{7-50}^A
$J_m^A(x)$	44,934	0,012
$J_{op}^A(x)$	0,010	$7,75 \times 10^{-6}$
$J_m^R(x)$	0,689	0,319
$J_{op}^R(x)$	0,001	$1,35 \times 10^{-5}$

FONTE: O autor (2019)

Conforme é observado na TABELA 12, através do teste do χ^2 , o índice $J(x)$ da parte ativa para as medidas convencionais é apontado como possuidor de um erro. Com isso, os resíduos normalizados das medidas ativas são calculados, sendo que os maiores valores encontrados estão apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^A

Com erro em z_{7-50}^A		z_{7-50}^A é retirada do conjunto de medidas ativas	
z_{7-50}^A	6,704	z_{45}^A	0,095
z_7^A	5,165	z_{45-65}^A	0,093
z_{50}^A	2,466	z_{43-62}^A	0,076

FONTE: O autor (2019)

A medida de fluxo de potência ativo em 7-50 apresentou o maior resíduo normalizado. É possível observar na terceira coluna das Tabelas TABELA 12 e TABELA 13 que após a remoção da medida apontada como errônea, nem $J(x)$ e nem os resíduos normalizados apontaram

a existência de erro, demonstrando a eficácia do método.

Caso A2

A análise foi também realizada considerando um erro na medida de fluxo de potência reativa na linha 7-50 e os índices $J(x)$ obtidos na presença do referido erro estão apresentados na primeira coluna da TABELA 14.

TABELA 14 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^R

	Com erro em z_{7-50}^R	z_{7-50}^R é retirada do conjunto de medidas reativas
$J_m^A(x)$	0,136	0,012
$J_{op}^A(x)$	0,0009	$7,75 \times 10^{-6}$
$J_m^R(x)$	110,409	0,319
$J_{op}^R(x)$	0,467	$1,35 \times 10^{-5}$

FONTE: O autor (2019)

Da mesma forma que para a situação anterior, o valor de $J(x)$ da parte reativa referente às medidas convencionais é apontado no teste do χ^2 como errôneo.

TABELA 15 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO SIMPLES EM Z_{7-50}^R

Com erro em z_{7-50}^R		z_{7-50}^R é retirada do conjunto de medidas reativas	
z_{7-50}^R	10,584	z_{64}^R	0,552
z_7^R	7,527	z_{45}^R	0,460
z_{49}^R	2,863	z_{65}^R	0,332

FONTE: O autor (2019)

A medida de fluxo de potência reativo em 7-50 apresentou maior resíduo normalizado, permitindo a correta identificação da medida errônea. Após a remoção da medida do conjunto, nem o índice $J(x)$ e nem os resíduos normalizados apontaram a existência de erro, conforme as TABELA 14 e TABELA 15.

Caso A3

Após as análises de erros simples em medidas, buscou-se também analisar o comportamento da ferramenta quando há erros em medidas de natureza ativa e reativa simultaneamente. Com isso, visa-se analisar o comportamento dos índices $J(x)$ e, como deve ser a identificação e o processo de eliminação das medidas errôneas do conjunto, conforme indicam os valores apresentados nas últimas colunas das TABELA 16 e TABELA 17.

O valor do índice $J(x)$ das partes ativa/reactiva são apontados no teste do chi-quadrado como errôneos, porém o valor correspondente à parte reativa é maior. De acordo com o algoritmo proposto, a medida de fluxo de potência reativa na linha 7-50 é eliminada por possuir o maior resíduo normalizado. Após a remoção da medida de fluxo de potência reativo e uma

TABELA 16 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO MÚLTIPLO EM Z_{7-50}

	Com erro em z_{7-50}^A e z_{7-50}^R	z_{7-50}^R é retirada do conjunto de medidas reativas	z_{7-50}^A é retirada do conjunto de medidas ativas
$J_m^A(x)$	46,455	44,934	0,012
$J_{op}^A(x)$	0,124	0,105	$7,75 \times 10^{-6}$
$J_m^R(x)$	108,061	0,689	0,319
$J_{op}^R(x)$	0,441	0,001	$1,35 \times 10^{-5}$

FONTE: O autor (2019)

nova estimacão de estados, o $J(x)$ da parte ativa desse fluxo indicou ainda a existência de dado errôneo. Então, a análise se concentrou na parte ativa das medidas convencionais. Após a remoo também da medida de fluxo de potência ativa, nem $J(x)$ e nem os resíduos normalizados apontaram a existência de erro.

TABELA 17 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO MÚLTIPLO EM Z_{7-50}

r^N			
Com erro em z_{7-50}^A e z_{7-50}^R			
z_{7-50}^A	6,804	z_{7-50}^R	10,457
z_7^A	5,186	z_7^R	7,546
z_{49}^A	2,453	z_{49}^R	2,697
z_{7-50}^R é retirada do conjunto de medidas reativas			
z_{7-50}^A	6,704	z_{64}^R	0,521
z_7^A	5,165	z_{61}^R	0,512
z_{49}^A	2,466	z_{45}^R	0,485
z_{7-50}^A é retirada do conjunto de medidas ativas			
z_{49}^A	0,095	z_{64}^R	0,552
z_{45-65}^A	0,093	z_{45}^R	0,460
z_{4-62}^A	0,076	z_{65}^R	0,332

FONTE: O autor (2019)

Após a análise das simulaes considerando erros grosseiros simples e múltiplos em medidas, observa-se que o ndice $J(x)$ é capaz de apontar o conjunto ao qual se deve iniciar a identificao do erro detectado, reduzindo o campo de busca do erro.

4.4.1.2 Caso B: Erros de Topologia

Caso B1

Visando analisar o desempenho do algoritmo com relao a ocorrência de erros da topologia da rede, foram simulados um erro de exclusão envolvendo o status do disjuntor 13-64, cujo status foi erroneamente simulado como estando aberto.

Os resultados dos índices na presença do erro estão apresentados na segunda coluna

da TABELA 18.

TABELA 18 – VALOR DOS ÍNDICES $J(X)$ PARA ERRO DE EXCLUSÃO NO DISJUNTOR (13-64)

	Com erro de exclusão no disjuntor (13-64)	Status do disjuntor (13-64) é corrigido
$J_m^A(x)$	70,332	0,012
$J_{op}^A(x)$	0,010	$7,75 \times 10^{-6}$
$J_m^R(x)$	1,645	0,319
$J_{op}^R(x)$	0,001	$1,35 \times 10^{-5}$

FONTE: O autor (2019)

Verifica-se que nesse caso de erro de topologia os 2 índices operacionais ativo e reativo apontaram a existência de erro. Além disso, os resíduos normalizados operacionais da parte ativa/reactiva correspondente ao disjuntor 13-64 apareceram como os mais significativos nos dois conjuntos operacionais, conforme observado na TABELA 18. Quando há um erro de topologia na rede, o impacto numérico é muito mais significativo do que quando há um erro grosseiro em medida. Dessa forma, observando a solução numérica encontrada permite chegar uma conclusão sobre a natureza do erro.

TABELA 19 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO DE EXCLUSÃO NO DISJUNTOR (13-64)

r^N			
Com erro de exclusão no disjuntor (13-64)			
z_{13-64}^A	16,804	z_{13-64}^R	10,730
z_{13-64}^A	1,504	z_{13-63}^R	2,229
z_{64-65}^A	1,192	z_{12-61}^R	1,802
Status do disjuntor (13-64) é corrigido			
z_{12-61}^A	0,045	z_{12-61}^R	0,070
z_{6-43}^A	0,030	z_{13-64}^R	0,057
z_{64-65}^A	0,007	z_{13-63}^R	0,033

FONTE: O autor (2019)

Caso B2

Os índices $J(x)$ para erro de inclusão no disjuntor (52-55) são apresentados na TABELA 20.

Conforme é observado na TABELA 20, os índices das partes operacionais, assim como o índice ativo das medidas convencionais apontam a presença de erro. Porém, opta-se pela análise dos resíduos normalizados operacionais já que os índices $J(x)$ correspondentes

TABELA 20 – VALOR DOS ÍNDICES $J(x)$ PARA ERRO DE INCLUSÃO NO DISJUNTOR (52-55)

	Com erro de inclusão no disjuntor (52-55)	Status do disjuntor (52-55) é corrigido
$J_m^A(x)$	116,309	0,012
$J_{op}^A(x)$	1,638	$7,75 \times 10^{-6}$
$J_m^R(x)$	18,696	0,319
$J_{op}^R(x)$	0,158	$1,35 \times 10^{-5}$

FONTE: O autor (2019)

apontam um erro tanto na parte ativa quanto reativa.

TABELA 21 – MAIORES RESÍDUOS NORMALIZADOS PARA ERRO DE INCLUSÃO NO DISJUNTOR (52-55)

r^N			
Com erro de exclusão no disjuntor (52-55)			
z_{52-55}^A	10,220	z_{52-55}^R	3,295
z_{56-57}^A	8,548	z_{10-52}^R	2,915
z_{13-64}^A	5,508	z_{10-54}^R	2,652
Status do disjuntor (13-64) é corrigido			
z_{12-61}^A	0,045	z_{12-61}^R	0,070
z_{6-43}^A	0,030	z_{13-64}^R	0,057
z_{64-65}^A	0,007	z_{13-63}^R	0,033

FONTE: O autor (2019)

Conforme a TABELA 21, os resíduos normalizados operacionais da parte ativa/reativa correspondente ao disjuntor 52-55 foram os mais significativos nos dois conjuntos operacionais. Após a correção do status desse disjuntor, observa-se que tanto os índices $J(x)$ quanto os resíduos normalizados deixam de apontar a existência de erro, indicando que o erro foi corretamente identificado.

4.4.2 Processamento de erros na EEG-DR pelo teste geométrico

Para a ferramenta de processamento de erros na *EEG – DR* através do teste geométrico, foi considerado o sistema IEEE 14 barras estendido apresentado em (GÓMEZ-EXPÓSITO; VILLA-JAEN, 2001). É importante lembrar, por exemplo, que a representação detalhada sistema IEEE 14 barras eleva o número de barras/nós da rede de 14 para 65, além da representação de 73 disjuntores, elevando o número de variáveis de estado do sistema completo para 275. Assim, a formulação desacoplada se torna interessante, pois é capaz de processar o aumento da dimensão do problema com desempenho computacional.

Dois casos foram considerados: *Caso A*, em que erros grosseiros simples e múltiplos

em medidas são simulados; *Caso B*, em que erros de topologia do tipo exclusão, inclusão e bus-split são simulados.

4.4.2.1 Caso A: Erros Grosseiros em Medidas

Para os erros grosseiros em medidas, os casos são descritos a seguir:

- Caso A1 - Erro simples em medida ativa na linha 7-50;
- Caso A2 - Erro simples em medida reativa na linha 7-50;
- Caso A3 - Erro simples em medida ativa na barra 2;
- Caso A4 - Erro simples em medida reativa na barra 2;
- Caso A5 - Erro múltiplo em medidas ativas na barra 4 e na linha 40-60;
- Caso A6 - Erro múltiplo em medidas reativas na barra 4 e na linha 40-60;
- Caso A7 - Erro múltiplo em medidas ativas na barra 11 e nas linhas 11-58 e 53-58;
- Caso A8 - Erro múltiplo em medidas reativas na barra 11 e nas linhas 11-58 e 53-58.

Foram portanto simulados erros em medidas de injeção de potência ativa e reativa e medidas de fluxo de potência ativa e reativa em ramos convencionais e ramos chaveáveis, e neste caso, a topologia foi considerada livre de erros. A TABELA 22 mostra as medidas que foram simuladas como errôneas, os valores verdadeiros dessas medidas, e os valores simulados. Também é apresentado o maior resíduo normalizado r^N observado na presença de uma medida errônea no plano de medição, indicando que conforme o algoritmo da ferramenta proposta, uma anomalia foi detectada.

Já a TABELA 23 mostra os conjuntos suspeitos e o valor do cosseno encontrado para cada conjunto segundo a natureza, ativa e reativa, e o tipo de medidas, convencionais ou operacionais.

A primeira coluna de TABELA 23 identifica o caso simulado e a segunda identifica o conjunto suspeito de conter informações errôneas quando uma anomalia é detectada. A terceira e quarta colunas apresentam o valor do cosseno calculado para os conjuntos suspeitos quando uma anomalia é detectada para o caso simulado.

Para os casos A1, A2, A3 e A4, nenhuma anomalia foi detectada no conjunto operacional, e portanto, a topologia é considerada livre de erros. Dessa forma, a análise é realizada considerando o conjunto de medidas. Para os casos A1 e A3, apenas no conjunto de natureza ativa foi detectada a anomalia, e portanto, apenas o conjunto de medidas ativas apresentam medidas suspeitas. O cosseno para os conjuntos S_{mA1} e S_{mA3} é próximo de 1,0, e por isso, entende-se que a medida errônea está no conjunto suspeito. Da mesma forma, quando as medidas errôneas, destacadas em negrito na TABELA 23, foram retiradas do conjunto suspeito, o valor do cosseno diminui consideravelmente. Analogamente para os casos A2 e A4,

TABELA 22 – ERROS GROSSEIROS SIMULADOS EM MEDIDAS CONVENCIONAIS

Caso	Medidas Errôneas	Valores Verdadeiros	Valores Simulados	r_{max}^N
A1	z_{7-50}^A	0,2758	0,5517	34,0888
A2	z_{7-50}^R	0,1671	0,3342	20,6476
A3	z_2^A	0,1830	0,3661	17,4957
A4	z_2^R	0,1806	0,3612	17,1277
A5	z_4^A	-0,4780	-0,9560	29,5082
	z_{40-60}^A	0,0791	0,2373	
A6	z_4^R	0,0390	0,0779	24,2039
	z_{40-60}^R	0,0971	0,2912	
A7	z_{11-58}^A	-0,0423	-0,0845	6,3726
	z_{53-58}^A	0,0428	0,0857	
	z_{11}^A	-0,0350	-0,1050	
A8	z_{11-58}^R	-0,0764	-0,1528	6,3106
	z_{53-58}^R	0,0751	0,1126	

FONTE: O autor(2019)

TABELA 23 – ERROS EM MEDIDAS: CONJUNTOS SUSPEITOS E VALORES DO COSSENO

Caso	Conjunto Suspeito S		$\cos S^A$		$\cos S^R$	
	S_m	S_{op}	$\cos S_m^A$	$\cos S_{op}^A$	$\cos S_m^R$	$\cos S_{op}^R$
A1	S_{mA1}	\emptyset	0,9996	-	-	-
A2	S_{mA2}	\emptyset	-	-	0,9997	-
A3	S_{mA3}	\emptyset	0,9992	-	-	-
A4	S_{mA4}	\emptyset	-	-	0,9985	-
A5	S_{mA5}	D_4	0,9999	0,8747	-	-
A6	S_{mA6}	D_4	-	-	0,9998	0,9997
A7	S_{mA7}	D_2, D_3, D_8	0,9999	0,5839	-	-
A8	S_{mA8}	D_2, D_3, D_8	-	-	0,9999	0,5317

Conjunto de medidas suspeitas para cada caso

S_{mA1}	$\{z_{7-50}^A, z_7^A, z_9^A\}$
S_{mA2}	$\{z_{7-50}^R, z_7^R, z_9^R\}$
S_{mA3}	$\{z_2^A, z_2^A, z_3^A\}$
S_{mA4}	$\{z_2^R, z_1^R, z_2^R, z_3^R\}$
S_{mA5}	$\{z_{4-5}^A, z_{40-60}^A, z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A, z_2^A, z_3^A, z_4^A, z_5^A, z_7^A\}$
S_{mA6}	$\{z_{40-60}^R, z_4^R, z_6^R, z_{11}^R\}$
S_{mA7}	$\{z_{11-58}^A, z_{16-21}^A, z_{11}^A, z_{23}^A\}$
S_{mA8}	$\{z_{16-21}^R, z_{11-58}^R, z_{11}^R\}$

FONTE: O autor(2019)

a anomalia foi detectada no conjunto de natureza reativa, apresentando medidas suspeitas apenas nos conjuntos de medidas reativas. Da mesma forma, o cosseno dos conjuntos S_{mA2} e S_{mA4} são muito próximos de 1,0, confirmando que a medida errônea está no conjunto suspeito. Quando as medidas em negrito são retiradas do conjunto suspeito, o valor do cosseno diminui, confirmando que ela é uma medida errônea. Assim, nesses 4 casos, é possível observar o

comportamento desacoplado quando há um erro simples em uma medida, confirmando que é possível realizar a análise conforme a natureza (ativa e reativa) da medida, reduzindo o campo de busca da informação errônea.

Para os casos A5, A6, A7 e A8, erros múltiplos em medidas foram simulados. Conforme observado na TABELA 23, os conjuntos suspeitos da parte operacional detectaram uma anomalia. Para os casos A5 e A7, apenas a parte operacional ativa detectou uma anomalia, e para os casos A6 e A8, apenas a parte reativa. O valor do cosseno dos conjuntos S_{mA5} , S_{mA7} e S_{mA8} é muito abaixo de 1,0, e por isso, considera-se que mesmo havendo informações nos conjuntos suspeitos, ele está livre de erros. Assim, para esses casos, há apenas erros grosseiros em medidas. Já para o caso A6, o valor do cosseno do conjunto S_{mA6} é próximo de 1,0. Porém, como será observado mais a diante que, para os casos em que há erro em topologia, o conjunto suspeito operacional tanto da parte ativa quanto da parte reativa deve detectar a presença de anomalia. Neste caso, especificamente, apenas a parte reativa aponta a anomalia. Como a medida errônea simulada é apenas na parte reativa, entende-se e a simulação influenciou também na parte operacional reativa, mesmo não havendo erro. Para essa situação, também atribuiu-se a presença apenas de erros grosseiros em medidas. As medidas simuladas como errôneas aparecem nos conjuntos suspeitos S_{mA5} , S_{mA6} , S_{mA7} e S_{mA8} , destacadas em negrito. Quando só as informações errôneas permanecem no conjunto suspeito, o valor do cosseno fica muito próximo de 1,0, sendo então possível concluir que a ferramenta é capaz de identificar todas as medidas errôneas presentes no plano de medição.

4.4.2.2 Caso B: Erros de Topologia

Para os erros em topologia, os casos são descritos a seguir:

- Caso Exclusão (Exc) - Erro de exclusão no disjuntor 13-64;
- Caso Inclusão 1 (Inc1) - Erro de inclusão no disjuntor 52-55;
- Caso Inclusão 2 (Inc2) - Erro de inclusão no disjuntor 10-57;
- Caso Bus-split (BS) - Erro de exclusão nos disjuntores 5-38 e 5-39 e inclusão nos disjuntores 35-38 e 35-39;

Para esses casos, foram simulados erros nos *status* dos disjuntores, considerando então as medidas livres de erros. A TABELA 24 mostra os disjuntores que foram simuladas erroneamente, o *status* verdadeiro e o simulado. Também são apresentados os maiores resíduos normalizados r^N da parte ativa e reativa quando o erro em topologia é simulado, indicando que a anomalia foi detectada.

A TABELA 25 mostra os conjuntos suspeitos e o valor do cosseno encontrado para cada conjunto segundo a natureza, ativa e reativa, e o tipo de medidas, convencionais ou operacionais. Comparando com os casos quando há apenas erros em medidas, é possível observar o impacto de um erro em topologia para a identificação de erros. A TABELA 25 mostra que para todos os conjuntos, ativo e reativo, operacional e de medidas, uma anomalia

TABELA 24 – ERROS EM TOPOLOGIA

Caso	Disjuntor errôneo	Status Verdadeiro	Status Simulado	r_{max}^N	
				Ativo	Reativo
<i>Exc</i>	13 – 64	Fechado	Aberto	22,8249	13,4655
<i>Inc1</i>	52 – 55	Aberto	Fechado	134,2382	71,0503
<i>Inc2</i>	10 – 57	Aberto	Fechado	134,1700	71,0696
<i>BS</i>	5 – 38, 5 – 39 35 – 38, 35 – 39	Fechado Aberto	Aberto Fechado	91,7211	130,572

FONTE: O autor(2019)

foi detectada. Assim, quando é observado que todos os conjuntos apontam a presença de uma anomalia, opta-se por começar o processo de análise sempre pelos conjuntos da parte operacional.

TABELA 25 – ERROS EM TOPOLOGIA: CONJUNTOS SUSPEITOS E VALORES DO COS-SENO

Caso	Conjunto Suspeito S				$\cos S^A$		$\cos S^R$	
	S_m^A	S_{op}^A	S_m^R	S_{op}^R	$\cos S_m^A$	$\cos S_{op}^A$	$\cos S_m^R$	$\cos S_{op}^R$
<i>Exc</i>	S_{mExc}^A	S_{opExc}^A	S_m^{RExc}	S_{opExc}^R	0,5130	0,9829	0,8732	0,9998
<i>Inc1</i>	S_{mInc1}^A	S_{opInc1}^A	S_m^{RInc1}	S_{opInc1}^R	0,8544	1,0000	0,8988	0,9999
<i>Inc2</i>	S_{mInc2}^A	S_{opInc2}^A	S_m^{RInc2}	S_{opInc2}^R	0,9884	1,0000	0,6875	1,0000
<i>BS</i>	S_{mBS}^A	S_{opBS}^A	S_m^{RBS}	S_{opBS}^R	0,9296	1,0000	0,9785	1,0000
Conjunto suspeito para cada caso								
S_{mExc}^A	$\{z_{45-65}^A, z_{65-45}^A, z_{13-63}^A, z_{64-65}^A, z_{13}^A, z_{63}^A, z_{64}^A, z_{65}^A\}$							
S_{opExc}^A	$\{Z_{13-63}^A, z_{64-65}^A, z_{63-65}^A\}$							
S_m^{RExc}	$\{z_{13-63}^R, z_{64-65}^R, z_{13}^R, z_{63}^R, z_{64}^R, z_{65}^R\}$							
S_{opExc}^R	$\{Z_{13-63}^R, z_{64-65}^R, z_{63-65}^R\}$							
S_{mInc1}^A	$\{z_{47-54}^A, z_{49-57}^A, z_{53-58}^A, z_{56-63}^A, z_{57-49}^A, z_{10-54}^A, z_{53}^A, z_{54}^A, z_{57}^A, z_{58}^A, z_9^A, z_{10}^A, z_{11}^A, z_{14}^A\}$							
S_{opInc1}^A	$\{Z_{52-55}^A, z_{11-58}^A, z_{14-56}^A, z_{14-55}^A, z_{53-54}^A, z_{10-54}^A, z_{10-52}^A, z_{14-53}^A, z_{10-57}^A\}$							
S_m^{RInc1}	$\{z_{10}^R, z_{14}^R\}$							
S_{opInc1}^R	$\{Z_{52-55}^R, z_{14-55}^R, z_{10-52}^R\}$							
S_{mInc2}^A	$\{z_{47-54}^A, z_{49-57}^A, z_{53-58}^A, z_{56-63}^A, z_{57-49}^A, z_{10-54}^A, z_{53}^A, z_{54}^A, z_{57}^A, z_{58}^A, z_9^A, z_{10}^A, z_{11}^A, z_{14}^A\}$							
S_{opInc2}^A	$\{Z_{10-57}^A, z_{11-58}^A, z_{14-56}^A, z_{53-54}^A, z_{56-57}^A, z_{10-54}^A, z_{14-53}^A\}$							
S_m^{RInc2}	$\{z_{10}^R, z_{14}^R\}$							
S_{opInc2}^R	$\{Z_{10-57}^R, z_{14-56}^R, z_{56-57}^R\}$							
S_{mBS}^A	$\{z_{2-19}^A, z_{23-25}^A, z_{22-31}^A, z_{21-38}^A, z_{29-39}^A, z_{7-30}^A, z_{34}^A, z_{35}^A, z_{36}^A, z_{37}^A, z_{38}^A, z_{39}^A\}$							
S_{opBS}^A	$\{Z_{35-38}^A, Z_{35-39}^A, Z_5^A-38, Z_5^A-39, z_{5-35}^A, z_{5-36}^A, z_{5-37}^A, z_{34-35}^A, z_{35-36}^A, z_{35-37}^A\}$							
S_m^{RBS}	$\{z_{2-19}^R, z_{21-38}^R, z_{29-39}^R, z_1^R, z_2^R, z_{35}^R, z_{38}^R, z_{39}^R\}$							
S_{opBS}^R	$\{Z_{35-38}^R, Z_{35-39}^R, Z_5^R-38, Z_5^R-39, z_{5-35}^R, z_{34-35}^R, z_{35-36}^R, z_{35-37}^R\}$							

FONTE: O autor(2019)

Para todos os casos, Exc, Inc1, Inc2 e BS, o valor do cosseno calculado para os conjuntos suspeitos da parte operacional, tanto ativa como reativa, é muito próximo de 1,0. Isso significa que nestes conjuntos, todas as informações errôneas estão presentes. É possível observar nos conjuntos suspeitos operacionais que as informações destacadas em negrito são as informações correspondentes aos disjuntores errôneos, e que as informações aparecem corretamente tanto na parte ativa quanto na parte reativa. Também, quando só as informações errôneas permanecem no conjunto, o valor do cosseno é muito próximo de 1,0, e quando elas são retiradas, o valor diminui, indicando que aquela informação retirada do conjunto é uma informação errônea.

Para os conjuntos suspeitos de medidas ativas e reativas dos casos Exc e Inc 1, por exemplo, quando há um erro em topologia, os valores dos cossenos calculados para esses conjuntos não ficam próximos de 1,0, indicando que não há informações errôneas naquele conjunto. Assim, assume-se que as medidas estão livre de erros. Já para os casos Inc2 e BS, observa-se que os valores são um pouco mais próximos de 1,0, mas que ainda assim não apontam que no conjunto há uma informação errônea. Isso se deve ao fato do erro em topologia influenciar mais criticamente no processo. Após a correção do *status* dos disjuntores apontados como errôneos, a estimação foi realizada e nenhuma anomalia foi detectada, confirmando então que as medidas estão livres de erros.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A *EEG* permite a representação de regiões de interesse da rede no nível de seção de barras e tem sido explorada em diversas pesquisas apresentadas na literatura, com especial ênfase no processamento de erros de topologia. No entanto, o aumento da dimensão do problema impacta diretamente no tempo de processamento, o que dificulta sua aplicação em tempo real.

A *EEG – DR* proposta nesse trabalho contorna essa dificuldade, aliando as técnicas de desacoplamento à modelagem no nível de seção de barras. Além disso, demonstra-se que as técnicas de normalização complexa viabilizam a aplicação da *EEG – DR* para sistemas de distribuição, permitindo a representação de chaves e disjuntores estratégicos sem incorrer em problemas numéricos (para representação desses dispositivos) e, ao mesmo tempo, proporcionando a análise de diferentes configurações da rede a partir de uma mesma base dados.

Também, a incorporação de medidas de fasor de corrente na estimação de estados desacoplada foi proposta e avaliada neste trabalho. Assim, além das medidas já tradicionais utilizadas na formulação desacoplada, também agora, é possível considerar mais um grupo de medidas que, caso estejam disponíveis, auxiliam na redundância do plano de medidas.

O presente documento apresenta a pesquisa e os desenvolvimentos envolvendo a ferramenta proposta que, conforme discutido em diversos momentos do documento, permite o processamento de redes modelados no nível barra-ramo e também no nível de seção de barras, possibilitando a identificação de erros grosseiros em medidas e na topologia da rede, e é aplicável a sistemas de transmissão e distribuição a partir do uso apropriado da normalização complexa por unidade (*cpu*).

5 CONCLUSÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma formulação desacoplada para a estimação de estado generalizada, onde os ramos chaveáveis são explicitamente representados, resultando em um conjunto expandido de variáveis de estado e equações operacionais que levam em conta o particionamento ativo e reativo dos métodos desacoplados.

O trabalho demonstra que a extensão proposta reforça a natureza desacoplada da estimação de estado, não deteriorando sua característica de esparsidade e não exigindo qualquer simplificação adicional, garantindo que o $EEG - DR$ apresente o mesmo desempenho de convergência e precisão encontrados em estimadores desacoplados convencionais. A estimação de estados generalizada desacoplada resultante explora o alto desempenho das técnicas de desacoplamento $P\theta - QV$. Assim, a nova abordagem é capaz de lidar com a desvantagem da EEG , ou seja, o aumento da dimensão do problema imposto pela modelagem no nível de seção de barras.

As versões de desacoplamento no modelo e no algoritmo, disponíveis na literatura para a modelagem barra-ramo, são aplicadas à formulação generalizada, gerando dois algoritmos distintos. O mesmo desempenho e precisão de convergência encontrados nos estimadores convencionais desacoplados são obtidos com as versões generalizadas propostas. Os EEG s desacoplados no modelo e no algoritmo podem ser explorados para representar uma área mais significativa da rede no nível de subestação, melhorando a eficiência do processamento de erros com um tempo computacional bem inferior ao obtido com o EEG convencional. Assim, a formulação proposta torna a abordagem generalizada mais viável para aplicações em tempo real.

O $EEG - DR$ pode também ser combinado com a abordagem de estimação de estado de dois estágios ou mesmo ser aplicado considerando a representação em nível de barra de toda a rede. Em ambos os casos, pode melhorar a eficiência do processamento de erros com uma redução significativa da carga computacional, tornando a abordagem generalizada mais viável para aplicações em tempo real.

Já o uso da normalização complexa por unidade (cpu) para Sistemas de Distribuição ($EEDR - cpu$) foi bem-sucedida em seu desempenho, apresentando baixos valores de erro quando comparado com o ponto de operação real obtido através de simulação e com a versão completa do Estimador de Estados. O número de iterações em que o método converge também é satisfatório, apresentando um tempo computacional baixo e permitindo o uso da ferramenta proposta em operação em tempo real.

Leva também em consideração os avanços observados nos Sistemas de Distribuição, que proporcionam, entre outros, um aumento da monitoração desses sistemas. A eficiência computacional dos métodos desacoplados adotados na formulação proposta auxilia nesse processo, uma vez que possibilitam lidar com o aumento significativo de informações/medidas

esperado para esses sistemas, garantindo a eficiência computacional necessária para a operação em tempo real. Do ponto de vista numérico, a abordagem garante uma aplicação segura dos métodos desacoplados para Sistemas de Distribuição apesar das conhecidas características de baixa relação X/R dos mesmos, graças a adoção da normalização complexa por unidade (*cpu*), a qual garante a adequação desses valores a patamares aceitáveis aos métodos desacoplados utilizados.

O trabalho apresenta ainda uma nova técnica de desacoplamento para medidas fasoriais de corrente. Assim, essas medidas, quando disponíveis, podem também ser processadas em estimadores de estados desacoplados, incluindo aquele proposto nesse trabalho. Os resultados obtidos a partir de testes e simulações confirmam a viabilidade da técnica proposta, indicando que essas informações podem auxiliar no aumento do grau de redundância do plano de medição, mantendo o mesmo desempenho e grau de precisão do estimador desacoplado obtidos na ausência dessas informações.

Este trabalho também estende e inova o uso de duas metodologias de processamento de erros em medidas disponíveis na literatura, de forma que essas possam ser concatenadas ao *EEG – DR* proposto e permitam o processamento simultâneo de erros em medidas e de topologia. As metodologias resultantes não fazem nenhuma suposição prévia de que a topologia ou o conjunto de medição estejam corretas. A abordagem desacoplada utilizada em conjunto com a modelagem explícita de chaves e disjuntores, permite um melhor desempenho computacional, compensando o aumento da dimensão do problema ocasionado pela modelagem detalhada da rede. Simulações e testes apresentados comprovam que a adoção simultânea da modelagem no nível de subestação e a abordagem desacoplada se apresenta como uma ferramenta vantajosa e eficiente para a *EEG* e o processamento de erros.

Observa-se finalmente que as metodologias propostas buscam lidar com algumas dificuldades observadas nos métodos de estimação de estados para sistemas elétricos de potência. A união dessas metodologias resultam em uma ferramenta versátil e eficiente, capaz de contornar diversas dessas dificuldades e permitir o processamento de redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, levando em conta as características típicas de cada um desses sistemas.

5.2 PUBLICAÇÕES

Dois artigos foram publicados em revista considerando os resultados obtidos a partir da pesquisa apresentada nesta tese de doutorado:

1. NOGUEIRA, E. M.; PORTELINHA, R. K.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.; PAL, B. C.. Novel approach to power system state estimation for transmission and distribution systems. **IET GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION**, v. 13, p. 1970-1978, 2019.
2. NOGUEIRA, E. M. M.; SILVA, M. A. B. C.; TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M.. Estimação de estados generalizada desacoplada rápida. **ESPAÇO ENERGIA**, v. 28, p. 10-19, 2018.

Também, três artigos foram apresentados em sessões técnicas de congressos da área a partir das pesquisas originadas no desenvolvimento desta tese:

1. NOGUEIRA, E. M. M.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.. Processamento de Erros na Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida. In: **IEEE INDUSCON - International Conference on Industry Applications**, 2018, São Paulo, 2018.
2. NOGUEIRA, E. M. M.; LOURENÇO, E. M.; ABIDO, M.; TORTELLI, O. L.. Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida para Sistemas de Transmissão e Distribuição. In: **CBA - Congresso Brasileiro de Automática**, 2016, Vitória, 2016.
3. NOGUEIRA, E. M. M.; ABIDO, M.; LOURENÇO, E. M.; TORTELLI, O. L.. Estimação de Estados Generalizada via Método Desacoplado Rápido. In: **IEEE ISGT-LA - Innovative Smart Grid Technologies Latin America**, 2015, Montevideu, 2015.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como possível sequência deste trabalho, são indicados alguns temas para trabalhos futuros:

- Comparação entre a modelagem monofásica e trifásica;
- Comparação entre a modelagem linear e não-linear;
- Utilização da modelagem para sistemas de transmissão e distribuição operando integralmente;
- Estudo da influência da *cpu* nas ponderações das informações medidas no Estimador de Estados;
- Extensão da proposta de processamento de erros para Estimadores considerando medidas de fasores de corrente modificada.

REFERÊNCIAS

- ABUR, A; GÓMEZ-EXPÓSITO, A. **Power System State Estimation - Theory and Implementation**. New York: [s.n.], 2004. p. 327. Citado 20 vezes nas páginas 29, 34, 36, 37, 42–45, 65, 71, 80, 82, 99.
- ALMEIDA, M C. **Estimação de Estados Generalizada Trifásica**. 2007. Tese (Doutorado) – UNICAMP. Citado 1 vez na página 25.
- ALMEIDA, M C de; ASADA, E N; GARCIA, A G. Effects of load imbalance and system asymmetry on three-phase state estimation. In: p. 1–6. ISBN 1-4244-0493-2. DOI: 10.1109/PES.2006.1709586. Citado 1 vez na página 27.
- ALSAÇ, O et al. Generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 3, p. 1069–1075, 1998. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/59.709101. Citado 3 vezes nas páginas 24, 45, 51.
- BARAN, M; KELLEY, A. A branch-current-based state estimation method for distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 1, p. 483–491, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.
- _____. State estimation for Real-time monitoring of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 9, n. 3, p. 1601–1609, 1994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=%7B%5C%7Darnumber=336098>>. Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.
- BARAN, M; MCDERMOTT, T. Distribution System State Estimation Using AMI Data. In: POWER Systems Conference and Exposition. Seattle, WA: [s.n.], 2009. p. 1–3. ISBN 9781424438112. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=%7B%5C%7Darnumber=4840257>>. Citado 1 vez na página 26.
- CHAKRABARTI, S et al. Inclusion of PMU current phasor measurements in a power system state estimator. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 4, n. 10, p. 1104, 2010. ISSN 17518687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0398. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2009.0398>>. Citado 1 vez na página 29.
- CLEMENTS, K; SIMÕES COSTA, A. Topology Error Identification Using Normalized Lagrange Multipliers. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 13, n. 2, p. 347–353, 1998. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=%7B%5C%7Darnumber=667350>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25, 48.

COELHO, C et al. Gerador de medidas trifásico para estudos de estimação de estados em sistemas de distribuição emergentes. In: INDUSCON. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 1 vez na página 28.

DURCE, C C et al. Complex normalization to perform power flow analysis in emerging distribution systems. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, IEEE, n. 1, p. 1–6, out. 2012. DOI: 10.1109/ISGTEurope.2012.6465872.

Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6465872>>.

Citado 2 vezes nas páginas 26, 50.

FANTIN, C dos A. **Metodologia para estimação de estado trifásica em sistemas de distribuição incorporando medidas SCADA, virtuais, pseudo-medidas e medidas fasoriais sincronizadas**. 2016. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Citado 1 vez na página 27.

GARCIA, A; MONTICELLI, A; ABREU, P. Fast Decoupled State Estimation and Bad Data Processing. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, PAS-98, n. 5, p. 1645–1652, 1979. ISSN 0018-9510. DOI: 10.1109/TPAS.1979.319482. Citado 12 vezes nas páginas 23, 38, 40, 41, 43, 55, 56, 59, 71.

GÓMEZ EXPÓSITO, A; VILLA JAÉN, A. Reduced substation models for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 4, p. 839–846, 2001. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/59.962435. Citado 1 vez na página 24.

GÓMEZ-EXPÓSITO, A; VILLA-JAEN, A de la. Reduced substation models for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 16, n. 4, p. 839–846, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 80, 82, 99, 104, 121.

HANSEN, C; DEBS, A. Power system state estimation using three-phase models. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 10, n. 2, p. 818–824, 1995. Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Dall.jsp?arnumber=387922>.

Citado 1 vez na página 27.

HORISBERGER, H P; RICHARD, J C; ROSSIER, C. A fast decoupled static state-estimator for electric power systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, v. 95, n. 1, p. 208–215, 1976. Citado 1 vez na página 23.

HUANG, S C; LU, C N; LO, Y L. Evaluation of AMI and SCADA Data Synergy for Distribution Feeder Modeling. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 4, p. 1639–1647, 2015. ISSN 19493053. DOI: 10.1109/TSG.2015.2408111. Citado 1 vez na página 26.

HUANG, Y-F; WERNER, S et al. State estimation in electric power grids: Meeting new challenges presented by the requirements of the future grid. **IEEE Signal Processing Magazine**, IEEE, v. 29, n. 5, p. 33–43, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 26, 50.

IEEE. **IEEE PES DSAS Test Feeder Working Group**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://sites.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>>. Citado 1 vez nas páginas 90, 91.

IRVING, M R. Robust algorithm for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1886–1887, 2009. Citado 1 vez nas páginas 24, 25.

JU, Y et al. Fast Decoupled State Estimation for Distribution Networks Considering Branch Ampere Measurements. v. 3053, n. 100, p. 1–10, 2017. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2017.2709463. Citado 1 vez na página 29.

KORRES, G; KATSIKAS, P. Identification of circuit breaker statuses in WLS state estimator. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 17, n. 3, p. 818–825, 2002. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/TPWRS.2002.800943. Citado 1 vez na página 24.

LI, B; YU, X; BO, Z. Protection Schemes for Closed Loop Distribution Network with Distributed Generator. **Time**, n. 08, p. 1–6, 2009. Citado 1 vez na página 26.

LIN, W-M; TENG, J-H. Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 143, n. 1, p. 43, 1996. ISSN 13502360. DOI: 10.1049/ip-gtd:19960049. Citado 1 vez na página 23.

LONDON JUNIOR, J B et al. Redundancy and observability analysis of conventional and PMU measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 24, n. 3, p. 1629–1630, 2009. Citado 1 vez na página 26.

LOURENÇO, E M. **Análise de Observabilidade e Identificação de Erros de Topologia na Estimação de Estados Generalizada**. 2001. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Citado 6 vezes nas páginas 24, 48, 49, 53.

LOURENÇO, E M; CLEMENTS, K; SIMÕES COSTA, A. Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification. In: June. PSCC. [S.l.: s.n.], 2002. p. 24–28. Citado 3 vezes nas páginas 24, 48.

LOURENÇO, E M; COELHO, E P R; PAL, B C. Topology error and bad data processing in generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 30, n. 6, p. 3190–3200, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 24, 25, 73.

LOURENÇO, E M; SIMÕES COSTA, A; CLEMENTS, K A. Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 19, n. 2, p. 1206–1215, 2004. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 48, 49.

LOURENÇO, E; SIMÕES COSTA, A et al. A topology error identification method directly based on collinearity tests. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/TPWRS.2006.881113. Citado 4 vezes nas páginas 48, 49.

LU, C N; TENG, J H; LIU, W-H E. Distribution system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 10, n. 1, p. 229–240, 1995. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/59.373946. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=373946>>. Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.

MANTOVANI, J R S; CASARI, F; ROMERO, R A. Reconfiguração de sistemas de distribuição radiais utilizando o critério de queda de tensão. **Controle and Automacao**, p. 150–159, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 87, 88, 127.

MARINHO, J L; MACHADO, P A; BONGERS, C. On The Use Of Line-Current Measurements For Reliable State Estimation In Electric Power Systems. In: POWER Industry Computer Applications Conference. [S.l.: s.n.], 1979. p. 2–6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=%7B%5C%7Darnumber=720038>>. Citado 1 vez na página 28.

MEIER, A von et al. Precision Micro-Synchrophasors for Distribution Systems: A Summary of Applications. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 12, n. 1, p. 1–1, 2017. ISSN 1949-3053. DOI: 10.1109/TSG.2017.2720543. Citado 1 vez na página 26.

MELIOPOULOS, A P; COKKINIDES, G J; STEFOPOULOS, G K. Numerical experiments for three-phase state estimation performance and evaluation. **2005 IEEE Russia Power Tech**, p. 1–7, 2005. DOI: 10.1109/PTC.2005.4524705. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4524705>>. Citado 1 vez na página 27.

MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, 1993. ISSN 15580679. DOI: 10.1109/59.260883. Citado 3 vezes nas páginas 20, 24, 45.

_____. **State Estimation in Electric Power Systems - A Generalized Approach**. [S.l.: s.n.], 1999. p. 394. Citado 7 vezes nas páginas 20, 33, 36, 45, 46, 51, 56.

_____. The Impact of Modeling Short Circuit Branches in State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 1, p. 364–370, 1993. ISSN 15580679. DOI: 10.1109/59.221219. Citado 4 vezes nas páginas 20, 24, 45, 51.

MONTICELLI, A; GARCIA, A. Fast decoupled state estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 2, p. 556–564, 1990. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/59.54566. Citado 7 vezes nas páginas 23, 41, 45, 55, 56, 93.

MONTICELLI, A; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. v. 6, n. 4, 1991. Citado 4 vezes nas páginas 20, 24, 45, 51.

NI, F et al. Three-phase state estimation in the medium-voltage network with aggregated smart meter data. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 98, October 2017, p. 463–473, 2018. ISSN 01420615. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.033. Citado 1 vez na página 26.

NOGUEIRA, E M M. **Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição Emergentes**. 2014. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Citado 2 vezes nas páginas 28, 62.

NOGUEIRA, E M M; LOURENÇO, E M; SILVA, M A B C et al. Estimação de Estados Desacoplada Considerando a Modelagem da Rede no Nível de Seção de Barras para Sistemas de Transmissão e Distribuição. In: CONGRESSO Brasileiro de Automática. [S.l.: s.n.], 2016. Citado 1 vez na página 28.

NOGUEIRA, E M M; LOURENÇO, E M; TORTELLI, O. Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição via Normalização Complexa. In: SIMPÓSIO de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 2 vezes nas páginas 28, 62.

PHADKE, A G; THORP, J S; KARIMI, K J. State estimation with phasor measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 1, n. 1, p. 233–238, 1986. Citado 1 vez na página 26.

_____. Recent developments in state estimation with phasor measurements. In: IEEE. 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7. Citado 1 vez na página 26.

PRIMADIANTO, A; LU, C-N. A Review on Distribution System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 21, n. 100, p. 423–429, 2017. ISSN 22120173. DOI: 10.1016/j.protcy.2015.10.063. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017315002911>>. Citado 1 vez na página 26.

_____. Modeling and simulation tools for teaching protective relaying design and application for the smart grid. In: IEEE. 2010 Modern Electric Power Systems. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6. Citado 1 vez na página 26.

ROY, L; MOHAMMED, T A. Fast super decoupled state estimator for power systems. **IEEE transactions on power systems**, IEEE, v. 12, n. 4, p. 1597–1603, 1997. Citado 1 vez na página 23.

ROYTELMAN, I; SHAHIDEHPOUR, S M. State estimation for electric power distribution systems in quasi real-time conditions. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 4, p. 2009–2015, 1993. ISSN 08858977. DOI: 10.1109/61.248315. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=248315>>.

Citado 2 vezes nas páginas 25, 26.

RUBEN, B et al. Meshing radial networks at 11kV. **IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe**, p. 1–8, 2011. ISSN 2165-4816. DOI:

10.1109/ISGTEurope.2011.6162691. Citado 1 vez na página 26.

SCHWEPPE, F C. Power system static-state estimation, Part III: Implementation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 130–135, 1970.

Citado 2 vezes nas páginas 20, 24.

_____. _____. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 130–135, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 20, 24.

SCHWEPPE, F C; ROM, D B. Power system static-state estimation, Part II: Approximate model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 1, p. 125–130, 1970. Citado 2 vezes nas páginas 20, 24.

SINGH, R; PAL, B C; JABR, R A. Choice of estimator for distribution system state estimation. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 3, n. 7, p. 666, 2009.

ISSN 17518687. DOI: 10.1049/iet-gtd.2008.0485. Disponível em:

<<http://link.aip.org/link/IGTDAW/v3/i7/p666/s1%7B%5C%7DAgg=doi>>. Citado 1 vez na página 26.

STOTT, B; ALSAC, O. Fast decoupled load flow. **IEEE transactions on power apparatus and systems**, IEEE, n. 3, p. 859–869, 1974. Citado 1 vez na página 23.

TENG, J H; LIU, Y H; LIN, W M. Using current-magnitude measurements in decoupled state estimation. **Electric Power Engineering, 1999. ...**, p. 6563734, 1999.

Disponível em:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs%7B%5C_%7Dall.jsp?arnumber=826571>.

Citado 1 vez na página 28.

TORTELLI, O L et al. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex PU normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 3, p. 1351–1358, 2015. ISSN 08858950. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2343193. Citado 9 vezes nas páginas 28, 29, 50, 59, 61, 62.

VILLA JAÉN, A; CRUZ ROMERO, P; GÓMEZ EXPÓSITO, A. Substation data validation by a local three-phase generalized state estimator. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 1, p. 264–271, 2005. ISSN 08858950. DOI:

10.1109/TPWRS.2004.841176. Citado 1 vez na página 25.

VILLA JAÉN, A; GÓMEZ-EXPÓSITO, A. Including Ampere Measurements in Generalized State Estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 20, n. 2, p. 603–610, 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=%7B%5C%7Darnumber=1425551>>.

Citado 1 vez na página 29.

WU, Z et al. Interval state estimation of distribution network with power flow constraint. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 40826–40835, 2018. Citado 1 vez na página 28.

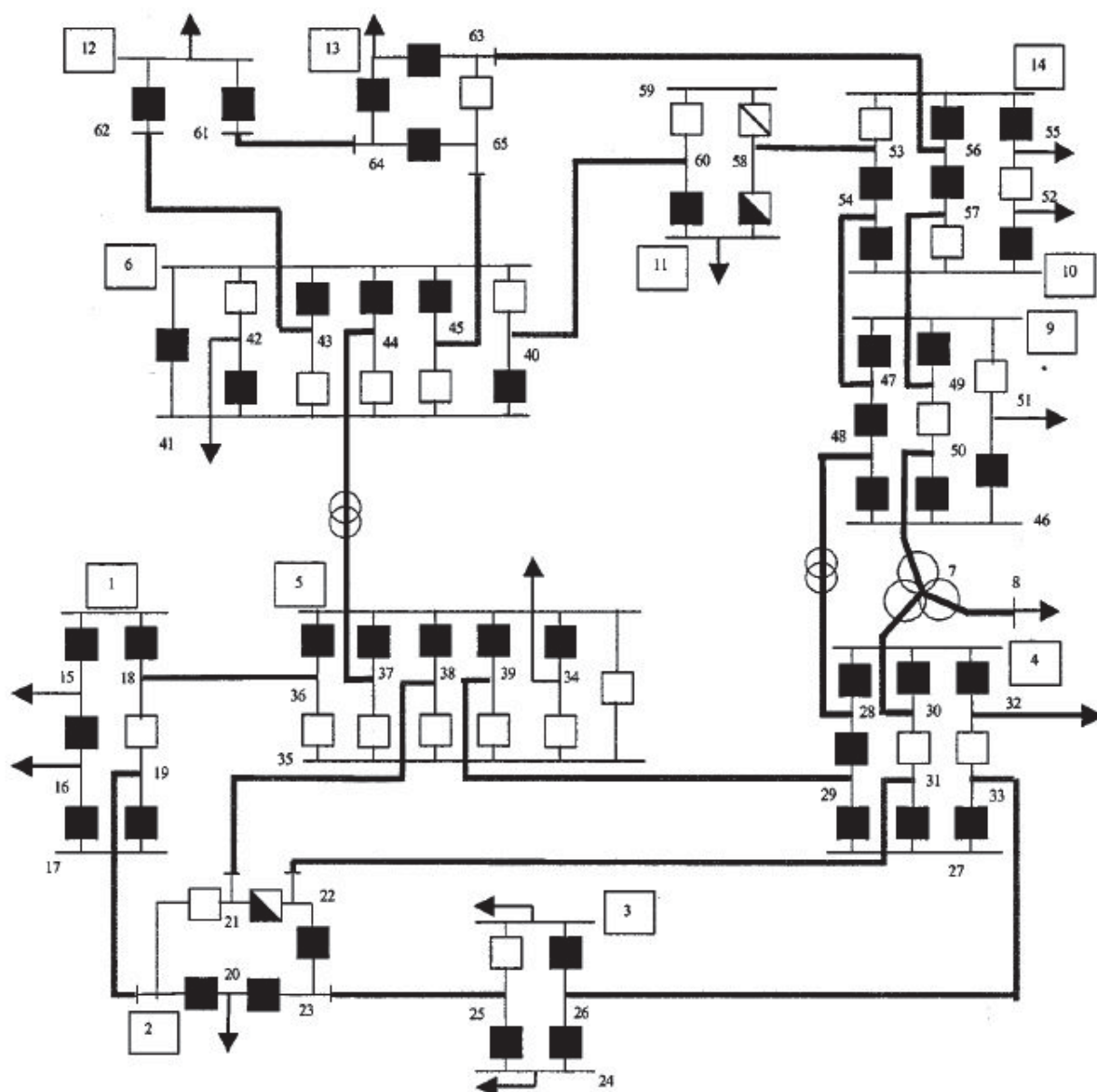
ZAMZAM, A S; FU, X; SIDIROPOULOS, Nicholas D. Data-driven learning-based optimization for distribution system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, 2019. Citado 1 vez na página 28.

ANEXOS

ANEXO A – DADOS DO SISTEMA TESTE IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO

O sistema teste IEEE 14 barras foi estendido em Gómez-Expósito e Villa-Jaen (2001) conforme mostrado na FIGURA 5, e é utilizado neste trabalho. Sua extensão aumenta a quantidade de nós para 65, com 20 ramos convencionais e 73 ramos chaveáveis. Os ramos com reatância "9999" estão abertos, enquanto que os ramos com reatância "0" estão fechados.

Os dados são apresentados nas TABELAS 27 e 26 em pu, considerando uma potência de base de 100 MVA. As barras do tipo 2 são barras de referência, do tipo 1, de geração (*PV*) e do tipo 0, de carga (*PQ*).



Fonte: – (GÓMEZ-EXPÓSITO; VILLA-JAEN, 2001)

TABELA 26 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
2	19	0,01938	0,05917	0,0528
18	36	0,05403	0,22304	0,0492
23	25	0,04699	0,19797	0,0438
22	31	0,05811	0,17632	0,034
21	38	0,05695	0,17388	0,0346
26	33	0,06701	0,17103	0,0128
29	39	0,01335	0,04211	0
7	30	0	0,20912	0
28	48	0	0,55618	0
37	44	0	0,25202	0
40	60	0,09498	0,1989	0
43	62	0,12291	0,25581	0
45	65	0,06615	0,13027	0
7	8	0	0,17615	0
7	50	0	0,11001	0
47	54	0,03181	0,0845	0
49	57	0,12711	0,27038	0
53	58	0,08205	0,19207	0
61	64	0,22092	0,19988	0
56	63	0,17093	0,34802	0
1	15	0	0	0
1	18	0	0	0
15	16	0	0	0
16	17	0	0	0
17	19	0	0	0
18	19	0	9999	0
2	20	0	0	0
2	21	0	9999	0
20	23	0	0	0
21	22	0	0	0
22	23	0	0	0
3	25	0	9999	0
3	26	0	0	0
24	25	0	0	0
24	26	0	0	0
4	28	0	0	0
4	30	0	0	0
4	32	0	0	0
27	29	0	0	0
27	31	0	0	0
27	33	0	0	0
28	29	0	0	0
30	31	0	9999	0
32	33	0	9999	0
5	34	0	0	0
5	35	0	9999	0

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
5	36	0	0	0
5	37	0	0	0
5	38	0	0	0
5	39	0	0	0
34	35	0	9999	0
35	36	0	9999	0
35	37	0	9999	0
35	38	0	9999	0
35	39	0	9999	0
6	40	0	9999	0
6	41	0	0	0
6	42	0	9999	0
6	43	0	0	0
6	44	0	0	0
6	45	0	0	0
40	41	0	0	0
41	42	0	0	0
41	43	0	9999	0
41	44	0	9999	0
41	45	0	9999	0
9	47	0	0	0
9	49	0	0	0
9	51	0	9999	0
46	48	0	0	0
46	50	0	0	0
46	51	0	0	0
47	48	0	0	0
49	50	0	9999	0
58	59	0	9999	0
59	60	0	9999	0
11	58	0	0	0
11	60	0	0	0
12	61	0	0	0
12	62	0	0	0
13	63	0	0	0
13	64	0	0	0
63	65	0	9999	0
64	65	0	0	0
10	52	0	0	0
10	54	0	0	0
10	57	0	9999	0
14	53	0	9999	0
14	55	0	0	0
14	56	0	0	0
52	55	0	9999	0
53	54	0	0	0
56	57	0	0	0

TABELA 27 – DADOS DE BARRA DO SISTEMA IEEE 14 BARRAS ESTENDIDO

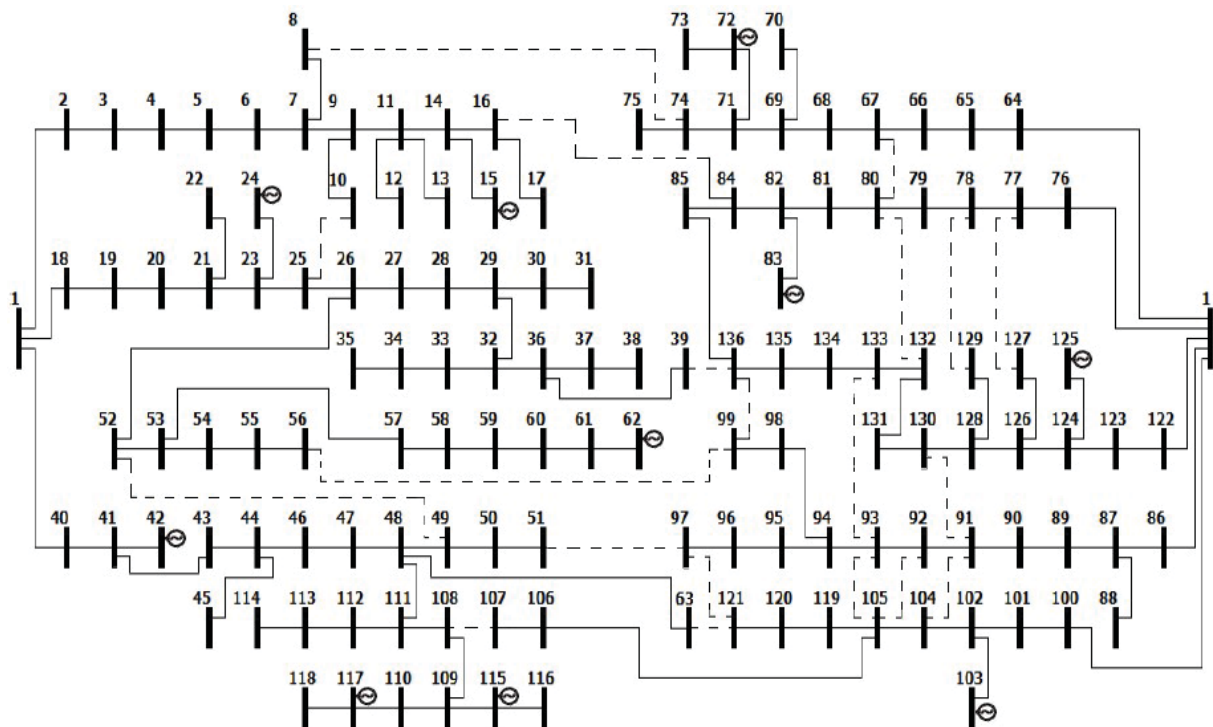
Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
1	2	1,06	0,000	0,000	0,000	2,324	-0,169	0,000
2	1	1,045	0,000	0,000	0,000	0,400	0,424	0,000
3	1	1,01	0,000	0,471	0,095	0,000	0,234	0,000
4	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0	1,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	1	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,122	0,000
7	0	1,062	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	1	1,09	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,000
9	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,19
10	0	1,051	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0	1,057	0,000	0,035	0,018	0,000	0,000	0,000
12	0	1,055	0,000	0,061	0,016	0,000	0,000	0,000
13	0	1,05	0,000	0,135	0,058	0,000	0,000	0,000
14	0	1,036	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0	1,06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0	1,06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0	1,06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0	1,06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0	1,06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0	1,045	0,000	0,217	0,127	0,000	0,000	0,000
21	0	1,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
22	0	1,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0	1,045	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
24	0	1,01	0,000	0,471	0,095	0,000	0,000	0,000
25	0	1,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0	1,01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
27	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
31	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
32	0	1,019	0,000	0,478	-0,039	0,000	0,000	0,000
33	0	1,019	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
34	0	1,02	0,000	0,076	0,016	0,000	0,000	0,000
35	2	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
36	0	1,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
37	0	1,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
38	0	1,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
39	0	1,02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40	0	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
41	0	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
42	0	1,07	0,000	0,112	0,075	0,000	0,000	0,000
43	0	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
44	0	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
45	0	1,07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
46	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
47	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
48	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
49	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	0	1,056	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
51	0	1,056	0,000	0,295	0,166	0,000	0,000	0,000
52	0	1,051	0,000	0,090	0,058	0,000	0,000	0,000

ANEXO B – DADOS DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS

O sistema real de distribuição de 136 barras apresentado em Mantovani, Casari e Romero (2000) é utilizado neste trabalho.

Os dados são apresentados nas TABELAS 28 e 29 em pu, considerando uma potência de base de 100 MVA e tensão de base de 13,8 kV. As barras do tipo 2 são barras de referência, do tipo 1, de geração (*PV*) e do tipo 0, de carga (*PQ*).



Fonte: – (MANTOVANI; CASARI; ROMERO, 2000)

TABELA 28 – DADOS DE LINHA DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
1	2	0.174359	0.402505	0
2	3	0.000987	0.002274	0
3	4	0.117307	0.27061	0
4	5	0.052211	0.120526	0
5	6	0.081763	0.188747	0
6	7	0.085702	0.197842	0
7	8	0.060092	0.138716	0
7	9	0.029799	0.029752	0
9	10	0.273703	0.143972	0
9	11	0.057115	0.057026	0
11	12	0.209005	0.10994	0
11	13	0.481748	0.165244	0
11	14	0.062083	0.061988	0
14	15	0.263747	0.138737	0
14	16	0.029799	0.029752	0
16	17	0.154269	0.081149	0
1	18	0.174359	0.402505	0
18	19	0.000987	0.002274	0
19	20	0.117223	0.27061	0
20	21	0.057136	0.131895	0
21	22	0.37323	0.196324	0
21	23	0.095552	0.220584	0
23	24	0.159242	0.083764	0
23	25	0.012807	0.029563	0
25	26	0.02364	0.054579	0
26	27	0.009851	0.022742	0
27	28	0.062083	0.058969	0
28	29	0.012419	0.012398	0
29	30	0.099527	0.052352	0
30	31	0.209005	0.10994	0
29	32	0.029799	0.029752	0
32	33	0.049764	0.026176	0
33	34	0.218961	0.115175	0
34	35	0.059714	0.031411	0
32	36	0.039729	0.039671	0
36	37	0.194077	0.10209	0
37	38	0.13934	0.073293	0
36	39	0.029799	0.029721	0
1	40	0.174359	0.402505	0
40	41	0.062062	0.143263	0
41	42	1.555808	0.533648	0
41	43	0.000987	0.002274	0
43	44	0.036447	0.084142	0
44	45	0.427967	0.225121	0
44	46	0.033491	0.077316	0

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
46	47	0.068956	0.159184	0
47	48	0.032509	0.075042	0
48	49	0.060092	0.138716	0
49	50	0.148992	0.148766	0
50	51	0.148992	0.148714	0
49	52	0.02364	0.054579	0
52	53	0.013789	0.031837	0
53	54	0.031522	0.072768	0
54	55	0.015763	0.036384	0
55	56	0.010838	0.025016	0
53	57	0.057136	0.131895	0
57	58	0.134363	0.070678	0
58	59	0.218961	0.115175	0
59	60	0.263747	0.138737	0
60	61	0.174176	0.091619	0
61	62	0.109478	0.057588	0
48	63	0.072894	0.168279	0
1	64	0.003938	0.009095	0
64	65	0.14185	0.327463	0
65	66	0.200956	0.463905	0
66	67	0.173377	0.400231	0
67	68	0.17239	0.397957	0
68	69	0.089645	0.206937	0
69	70	0.293604	0.154442	0
69	71	0.03054	0.070495	0
71	72	0.368252	0.193709	0
72	73	0.53745	0.282708	0
71	74	0.035465	0.081868	0
74	75	0.69498	0.23838	0
1	76	0.005913	0.013642	0
76	77	0.383197	0.884604	0
77	78	0.11821	0.272884	0
78	79	0.109347	0.252421	0
79	80	0.024627	0.056853	0
80	81	0.325299	0.324811	0
81	82	0.178791	0.178523	0
82	83	0.298582	0.157063	0
82	84	0.057115	0.057026	0
84	85	0.298582	0.157063	0
1	86	0.005913	0.013642	0
86	87	0.219675	0.507115	0
87	88	0.05513	0.071629	0
87	89	0.230508	0.532126	0
89	90	0.039488	0.013542	0
90	91	0.040391	0.093237	0

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
91	92	0.174359	0.402505	0
92	93	0.044329	0.102331	0
93	94	0.069943	0.161458	0
94	95	0.153959	0.153728	0
95	96	0.114225	0.114057	0
96	97	0.139057	0.138852	0
94	98	0.05418	0.125074	0
98	99	0.070925	0.163731	0
1	100	0.004925	0.011368	0
100	101	0.088658	0.204663	0
101	102	0.062062	0.143263	0
102	103	1.20042	0.411752	0
102	104	0.239377	0.552594	0
104	105	0.365469	0.843673	0
105	106	0.240359	0.554868	0
106	107	0.106585	0.138485	0
107	108	0.112098	0.145647	0
108	109	0.288632	0.151827	0
109	110	0.283654	0.149207	0
108	111	0.023892	0.031039	0
111	112	0.248819	0.130886	0
112	113	0.452851	0.238206	0
113	114	0.298582	0.157063	0
109	115	0.40806	0.21465	0
115	116	0.567307	0.298414	0
110	117	0.55993	0.303649	0
117	118	0.248819	0.130886	0
105	119	0.169434	0.391136	0
119	120	0.076838	0.177373	0
120	121	0.065018	0.150089	0
1	122	0.005913	0.013642	0
122	123	0.340842	0.78682	0
123	124	0.02364	0.054579	0
124	125	0.276413	0.094812	0
124	126	0.010838	0.025016	0
126	127	0.278676	0.146592	0
126	128	0.051223	0.118252	0
128	129	0.062062	0.143263	0
128	130	0.072894	0.168279	0
130	131	0.022658	0.052305	0
131	132	0.048267	0.111426	0
132	133	0.08472	0.195568	0
133	134	0.198656	0.198356	0
134	135	0.208591	0.208276	0
135	136	0.153959	0.153728	0

De	Para	Resistência (pu)	Reatância (pu)	Susceptância Shunt de Linha (pu)
8	74	0.068956	0.159184	0
10	25	0.13934	0.073293	0
16	84	0.074496	0.074386	0
39	136	0.044696	0.044628	0
26	52	0.02364	0.054579	0
51	97	0.074496	0.074386	0
56	99	0.074496	0.074386	0
63	121	0.020689	0.047753	0
67	80	0.067969	0.15691	0
80	132	0.008864	0.020468	0
85	136	0.174176	0.091619	0
92	105	0.074496	0.090139	0
91	130	0.040391	0.093237	0
91	104	0.040391	0.093237	0
93	105	0.040391	0.093237	0
93	133	0.040391	0.093237	0
97	121	0.139057	0.138852	0
111	48	0.260954	0.339041	0
127	77	0.089577	0.047117	0
129	78	0.027583	0.063674	0
136	99	0.153959	0.153728	0

TABELA 29 – DADOS DE BARRA DO SISTEMA TESTE DE 136 BARRAS

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
1	2	1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0.000478	0.00019	0	0	0
4	0	1	0	0.000426	0.000169	0	0	0
5	0	1	0	0.00087	0.000346	0	0	0
6	0	1	0	0.003113	0.001239	0	0	0
7	0	1	0	0.001489	0.000592	0	0	0
8	0	1	0	0.002387	0.00095	0	0	0
9	0	1	0	0.000623	0.000248	0	0	0
10	0	1	0	0.001246	0.000496	0	0	0
11	0	1	0	0.001402	0.000558	0	0	0
12	0	1	0	0.001168	0.000465	0	0	0
13	0	1	0	0.002492	0.000991	0	0	0
14	0	1	0	0.002914	0.001156	0	0	0
15	0	1	0	0.003037	0.001208	0.000607	0	0
16	0	1	0	0.002154	0.000857	0	0	0
17	0	1	0	0.001986	0.00079	0	0	0
18	0	1	0	0	0	0	0	0
19	0	1	0	0	0	0	0	0
20	0	1	0	0	0	0	0	0
21	0	1	0	0.000301	0.000147	0	0	0
22	0	1	0	0.00231	0.001129	0	0	0
23	0	1	0	0.000603	0.000295	0	0	0
24	0	1	0	0.00231	0.001129	0.001155	0	0
25	0	1	0	0.001205	0.000589	0	0	0
26	0	1	0	0	0	0	0	0

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
27	0	1	0	0.00057	0.000279	0	0	0
28	0	1	0	0.003647	0.001783	0	0	0
29	0	1	0	0	0	0	0	0
30	0	1	0	0.001246	0.000609	0	0	0
31	0	1	0	0.00057	0.000279	0	0	0
32	0	1	0	0	0	0	0	0
33	0	1	0	0.000855	0.000418	0	0	0
34	0	1	0	0	0	0	0	0
35	0	1	0	0.003967	0.00194	0	0	0
36	0	1	0	0	0	0	0	0
37	0	1	0	0.001812	0.000886	0	0	0
38	0	1	0	0.002422	0.001184	0	0	0
39	0	1	0	0.000753	0.000368	0	0	0
40	0	1	0	0	0	0	0	0
41	0	1	0	1.25E-05	5.31E-06	0	0	0
42	0	1	0	6.27E-05	2.66E-05	0.000031	0	0
43	0	1	0	0	0	0	0	0
44	0	1	0	0.001179	0.0005	0	0	0
45	0	1	0	0.000627	0.000256	0	0	0
46	0	1	0	0.001723	0.00073	0	0	0
47	0	1	0	0.004586	0.001944	0	0	0
48	0	1	0	0.00263	0.001115	0	0	0
49	0	1	0	0.002358	0.000999	0	0	0
50	0	1	0	0	0	0	0	0
51	0	1	0	0.001092	0.000463	0	0	0
52	0	1	0	0	0	0	0	0
53	0	1	0	0.000728	0.000309	0	0	0
54	0	1	0	0.002585	0.001096	0	0	0

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
55	0	1	0	0.000692	0.000293	0	0	0
56	0	1	0	0.000218	9.26E-05	0	0	0
57	0	1	0	0	0	0	0	0
58	0	1	0	0.000205	8.7E-05	0	0	0
59	0	1	0	0.001505	0.000638	0	0	0
60	0	1	0	0.002207	0.000936	0	0	0
61	0	1	0	0.000924	0.000392	0.000923	0	0
62	0	1	0	0	0	0	0	0
63	0	1	0	0.002267	0.000961	0	0	0
64	0	1	0	0	0	0	0	0
65	0	1	0	0.00294	0.00117	0	0	0
66	0	1	0	0.00083	0.00033	0	0	0
67	0	1	0	0.00083	0.00033	0	0	0
68	0	1	0	0.001038	0.000413	0	0	0
69	0	1	0	0.001764	0.000702	0	0	0
70	0	1	0	0.00083	0.00033	0	0	0
71	0	1	0	0.002179	0.000867	0	0	0
72	0	1	0	0.000233	9.27E-05	0.000047	0	0
73	0	1	0	5.08E-05	2.02E-05	0	0	0
74	0	1	0	0.000726	0.000289	0	0	0
75	0	1	0	0.00406	0.001615	0	0	0
76	0	1	0	0	0	0	0	0
77	0	1	0	0.001002	0.000425	0	0	0
78	0	1	0	0.001425	0.000604	0	0	0
79	0	1	0	0.00096	0.000407	0	0	0
80	0	1	0	0.003005	0.001274	0	0	0
81	0	1	0	0.001412	0.000599	0	0	0

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
82	0	1	0	0.002798	0.001186	0	0	0
83	0	1	0	0.000873	0.00037	0.000873	0	0
84	0	1	0	0.002438	0.001034	0	0	0
85	0	1	0	0.002478	0.00105	0	0	0
86	0	1	0	0	0	0	0	0
87	0	1	0	0.000899	0.000381	0	0	0
88	0	1	0	0.011373	0.004821	0	0	0
89	0	1	0	0.004583	0.001943	0	0	0
90	0	1	0	0.003852	0.001633	0	0	0
91	0	1	0	0	0	0	0	0
92	0	1	0	0.000796	0.000337	0	0	0
93	0	1	0	0.000873	0.00037	0	0	0
94	0	1	0	0	0	0	0	0
95	0	1	0	0.00074	0.000314	0	0	0
96	0	1	0	0.002321	0.000984	0	0	0
97	0	1	0	0.001418	0.000601	0	0	0
98	0	1	0	0	0	0	0	0
99	0	1	0	0.000764	0.000324	0	0	0
100	0	1	0	0	0	0	0	0
101	0	1	0	0.000513	0.000218	0	0	0
102	0	1	0	0.000599	0.000254	0	0	0
103	0	1	0	9.07E-05	3.84E-05	0.000045	0	0
104	0	1	0	2.09E-05	8.87E-06	0	0	0
105	0	1	0	0.000167	7.09E-05	0	0	0
106	0	1	0	0.015065	0.006386	0	0	0
107	0	1	0	0.00313	0.001327	0	0	0
108	0	1	0	0.000798	0.000338	0	0	0

Barra	Tipo	Tensão (pu)	Ângulo (Graus)	Potência Ativa (Carga) (pu)	Potência Reativa (Carga) (pu)	Potência Ativa (Geração) (pu)	Potência Reativa (Geração) (pu)	Susceptância Shunt de Barra (pu)
109	0	1	0	0.000513	0.000218	0	0	0
110	0	1	0	0	0	0	0	0
111	0	1	0	0.002024	0.000858	0	0	0
112	0	1	0	0.000608	0.000259	0	0	0
113	0	1	0	0.000456	0.000193	0	0	0
114	0	1	0	0	0	0	0	0
115	0	1	0	0.001571	0.000666	0.000314	0	0
116	0	1	0	0	0	0	0	0
117	0	1	0	0.002501	0.00106	0.003752	0	0
118	0	1	0	0	0	0	0	0
119	0	1	0	0.000688	0.000286	0	0	0
120	0	1	0	0.000321	0.000136	0	0	0
121	0	1	0	0.000611	0.000259	0	0	0
122	0	1	0	0	0	0	0	0
123	0	1	0	0.000946	0.000463	0	0	0
124	0	1	0	0.000499	0.000244	0	0	0
125	0	1	0	0.001232	0.000602	0.000246	0	0
126	0	1	0	0.000784	0.000383	0	0	0
127	0	1	0	0.001455	0.000711	0	0	0
128	0	1	0	0.000214	0.000104	0	0	0
129	0	1	0	0.000748	0.000366	0	0	0
130	0	1	0	0.002279	0.001114	0	0	0
131	0	1	0	0.000356	0.000174	0	0	0
132	0	1	0	0.002493	0.001219	0	0	0
133	0	1	0	0.003167	0.001548	0	0	0
134	0	1	0	0.003338	0.001632	0	0	0
135	0	1	0	0.002493	0.001219	0	0	0
136	0	1	0	0	0	0	0	0