

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA LORAYNE MONTEIRO

PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA VIA  
TESTES GEOMÉTRICOS

CURITIBA

2022

ANDRESSA LORAYNE MONTEIRO

PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DESACOPLADA VIA  
TESTES GEOMÉTRICOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra<sup>a</sup> Elizete Maria Lourenço  
Coorientador: Prof<sup>o</sup> Dr Odilon Luis Tortelli

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Monteiro, Andressa Lorayne

Processamento de erros na estimação de estados desacoplada via testes geométricos / Andressa Lorayne Monteiro. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – 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. Engenharia elétrica. 2. Algoritmos. 3. Sistema de transmissão. 4. Sistema de distribuição. I. Lourenço, Elizete Maria. II. Tortelli, Odilon Luis. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Bibliotecário: Nilson Carlos Vieira Junior CRB-9/1797



## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA ELÉTRICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANDRESSA LORAYNE MONTEIRO** intitulada: **Processamento de Erros na Estimação de Estados Desacoplada via Testes Geométricos**, sob orientação da Profa. Dra. ELIZETE MARIA LOURENÇO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 22 de Abril de 2022.

Assinatura Eletrônica  
26/04/2022 07:33:36.0  
ELIZETE MARIA LOURENÇO  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
26/04/2022 09:55:05.0  
CLODOMIRO UNSIHUAY-VILA  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
25/04/2022 16:22:47.0  
ELIZANDRA PEREIRA ROQUE COELHO  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO)

Assinatura Eletrônica  
26/04/2022 10:01:31.0  
RICARDO SCHUMACHER  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

À professora Elizete pela grandiosa orientação e amizade criada, pelo apoio constante e conversas tranquilizadoras e sábias.

Ao professor Odilon pela coorientação e conhecimentos repassados durante o período do mestrado.

À minha família pela compreensão durante o desenvolvimento deste trabalho, mãe, irmãos e cunhado: Dioneia, Vanessa, Larissa e Paulo.

Aos meus amigos e colegas que me ajudaram e me incentivaram nesta trajetória, em especial aos colegas acadêmicos que conheci: Ellen e Renan.

Ao meu companheiro de vida e namorado, Eduardo, que esteve comigo em quase todos os momentos de aulas, estudos e apresentações.

À Universidade Federal do Paraná e à CAPES pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Este trabalho visa corroborar uma ferramenta de processamento de erros simultâneo, em medidas e de topologia, na Estimação de Estados Generalizada considerando a modelagem nível de subestação. A metodologia proposta alia os métodos desacoplados na formulação da estimação de estados com os métodos de processamento de erros. O algoritmo de processamento de erros utiliza o teste do Máximo Resíduo Normalizado para a detecção de anomalias e os testes geométricos para a formação de um conjunto suspeito, a partir do qual são determinadas a natureza do erro bem como identificadas as informações errôneas. Os desenvolvimentos, validações e testes demonstram a viabilidade dos testes geométricos para a abordagem desacoplada do estimador de estados. Ao mesmo tempo, enfatizam a relevância da sua aplicação como um avanço significativo no processamento de erros no processo de estimação de estados por evitar as sucessivas reestimações requeridas pelo método tradicional baseado no máximo resíduo normalizado. Adicionalmente, o trabalho propõe a extensão do uso dos testes geométricos para o processamento de erros na estimação de estados de sistemas de distribuição. Nesse caso, a formulação desacoplada é viabilizada para uso nos sistemas de distribuição através da aplicação da normalização complexa. Diversas simulações e testes envolvendo o sistema de transmissão IEEE 30 barras e um sistema de distribuição de 141 barras demonstram a viabilidade e eficácia das metodologias e processamentos de erros propostos nesse trabalho.

**Palavras-chaves:** Estimação de Estados; Processamento de Erros; Erros em Medidas; Erros de Topologia; Métodos Desacoplados; Testes Geométricos.

## ABSTRACT

This work aims to corroborate a tool for processing simultaneous errors, in measurements and in topology, in Generalized State Estimation considering substation level modeling. The proposed methodology combines decoupled methods in the formulation of state estimation with error processing methods. The error processing algorithm uses the Maximum Normalized Residual test for the detection of anomalies and the geometric tests for the formation of a suspicious set, from which the nature of the error is determined and the erroneous information is identified. The developments, validations and tests demonstrate the feasibility of geometric tests for the decoupled state estimator approach. At the same time, they emphasize the relevance of its application as a significant advance in the processing of errors in the state estimation process by avoiding the successive re-estimations required by the traditional method based on the maximum normalized residual. Additionally, the work proposes the extension of the use of geometric tests for error processing in the distribution system state estimation. In this case, the decoupled formulation becomes for use in distribution systems through the application of complex normalization. Several simulations and tests involving the IEEE 30-bus transmission system and a 141-bus distribution system demonstrate the feasibility and effectiveness of the methodologies and error processing proposed in this work.

**Key-words:** State Estimation; Bad Data Processing; Measurements Error; Topology Error; Decoupled Methods; Geometric Tests.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – MODELO $\pi$ DE LINHA DE TRANSMISSÃO . . . . .	26
FIGURA 2 – ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DE ERROS NA EE . . . . .	33
FIGURA 3 – ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DE ERROS NA EEG-DR VIA TESTES GEOMÉTRICOS . . . . .	46
FIGURA 4 – SISTEMA-TESTE 5 BARRAS: MODELAGEM BARRA-RAMO . .	52
FIGURA 5 – SISTEMA-TESTE 4 BARRAS: NÍVEL DE SUBESTAÇÃO . . . . .	54
FIGURA 6 – SISTEMA IEEE 30 . . . . .	57
FIGURA 7 – SUBESTAÇÃO REPRESENTADA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS . . . . .	58
FIGURA 8 – PROCESSAMENTO DE ERROS SIMULTÂNEOS NO SISTEMA 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO: ERRO DE TOPOLOGIA NO CASO C3 . . . . .	60
FIGURA 9 – PROCESSAMENTO DE ERROS SIMULTÂNEOS NO SISTEMA 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO: ERRO EM MEDIDA NO CASO C3 . . . . .	61
FIGURA 10 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO 141 BARRAS . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CASOS SIMULADOS: SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO . . . . .	51
TABELA 2 – CASO A: ERROS EM MEDIDAS NO SISTEMA-TESTE 5 BARRAS	52
TABELA 3 – DETECÇÃO DE ERROS VIA MRN: CASO A . . . . .	53
TABELA 4 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO A . . . . .	53
TABELA 5 – CASO B: ERROS EM MEDIDAS E TOPOLOGIA NO SISTEMA-TESTE 4 BARRAS . . . . .	54
TABELA 6 – DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS VIA MRN: CASOS B1 E B2 . . . . .	55
TABELA 7 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS EM MEDIDAS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASOS B1 E B2 . . . . .	55
TABELA 8 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO B3 . . . . .	55
TABELA 9 – RESÍDUOS DAS MEDIDAS ATIVAS E REATIVAS: CASO B3 . . .	56
TABELA 10 – CASO C: PROCESSAMENTO DE ERROS NO SISTEMA IEEE 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO . . . . .	57
TABELA 11 – DETECÇÃO DE ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS VIA MRN: CASO C1 . . . . .	58
TABELA 12 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO C1 . . . . .	59
TABELA 13 – DETECÇÃO DE ERRO DE TOPOLOGIA VIA MRN: CASO C2 . .	59
TABELA 14 – CASO D: ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS NO SISTEMA 141 BARRAS . . . . .	63
TABELA 15 – MÉTRICAS PARA A EESD DESACOPLADA NO MODELO ( $x10^{-3}$ )	63
TABELA 16 – DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS SIMPLES EM MEDIDAS NA EESD: CASO D1 . . . . .	64
TABELA 17 – ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS NA EESD: CASO D2 - PARTE ATIVA . . . . .	64
TABELA 18 – ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS NA EESD: CASO D2 - PARTE REATIVA . . . . .	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>cpu</i>	Normalização complexa por unidade
EE	Estimação de Estados
EEDR	Estimação de Estados Desacoplada Rápida
EEG	Estimação de Estados Generalizada
EEG-DR	Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida
EESD	Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição
MLN	Multiplicador de Lagrange Normalizado
MMPQ	Método dos Mínimos Quadrados Ponderados
MRN	Máximo Resíduo Normalizado
SD	Sistema de Distribuição
ST	Sistema de Transmissão

## LISTA DE SÍMBOLOS

$n_b$	Número de barras
$n_m$	Número de medidas
$z_m$	Vetor das quantidades medidas
$z_0$	Vetor dos valores verdadeiros das quantidades medidas
$e_m$	Vetor dos erros de medição
$R_m$	Matriz de covariância dos erros de medição
$x$	Vetor das variáveis de estado
$r$	Vetor dos resíduos
$X/R$	Relação reatância sobre resistência
$H$	Matriz Jacobiana
$\hat{x}$	Vetor das variáveis de estado estimadas
$G$	Matriz ganho
$\theta$	Vetor dos ângulos das tensões nas barras
$V$	Vetor de magnitude de tensão nas barras
$\bar{z}_{fluxo}^A$	Vetor de medidas de fluxo de potência ativa
$\bar{z}_{inj}^A$	Vetor de medidas de injeção de potência ativa
$\bar{z}_{fluxo}^R$	Vetor de medidas de fluxo de potência reativa
$\bar{z}_{inj}^R$	Vetor de medidas de injeção de potência reativa
$\bar{z}_{Vmag}$	Vetor de medidas de magnitude de tensão
$P_{fluxo}$	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
$\sigma_i$	Desvio padrão da medida $i$
$pr$	Classe de precisão do medidor
$r_i$	Resíduo da medida $i$
$\Omega_{ii}$	Valor diagonal $ii$ da matriz de covariância dos resíduos
$S$	Matriz de Sensibilidade
$\lambda$	Vetor dos multiplicadores de Lagrange
$\varepsilon$	Vetor de erros
$t$	Vetor de fluxo de potência ativa através dos ramos chaveáveis
$u$	Vetor de fluxo de potência reativa através dos ramos chaveáveis
$t_{kl}$	Fluxo de potência ativa através do ramo chaveável
$u_{kl}$	Fluxo de potência reativa através do ramo chaveável
$\theta_{kl}$	Diferença angular no ramo chaveável
$V_{kl}$	Queda de tensão no ramo chaveável
$\bar{z}_m^A$	Vetor estendido de medidas ativas
$\bar{z}_m^R$	Vetor estendido de medidas reativas
$\bar{z}_p^A$	Vetor de pseudomedidas operacionais ativas
$\bar{z}_p^R$	Vetor de pseudomedidas operacionais reativas
$\bar{z}_{\theta_{kl}}$	Vetor de pseudomedidas ativas de diferença angular nula através dos ramos chaveáveis fechados
$\bar{z}_{V_{kl}}$	Vetor de pseudomedidas reativas de diferença de potencial nula através dos ramos chaveáveis fechados
$\bar{z}_{t_{kl}}$	Vetor de pseudomedidas ativas de fluxo de potência nulo através dos ramos chaveáveis abertos

$\bar{z}_{ukl}$	Vetor de pseudomedidas reativas de fluxo de potência nulo através dos ramos chaveáveis abertos
$\bar{r}_{mii}^A$	Resíduo da medida convencional ativa $i$
$\bar{r}_{pii}^A$	Resíduo da pseudomedida operacional ativa $i$
$\bar{r}_{pii}^R$	Resíduo da medida convencional reativa $i$
$\bar{r}_{pii}^R$	Resíduo da pseudomedida operacional reativa $i$
$\Omega_{mii}^A$	Valor diagonal $ii$ da matriz covariância, associado à medida ativa $i$
$\Omega_{pii}^A$	Valor diagonal $ii$ da matriz covariância, associado à pseudomedida ativa $i$
$\Omega_{mii}^R$	Valor diagonal $ii$ da matriz covariância, associado à medida reativa $i$
$\Omega_{pii}^R$	Valor diagonal $ii$ da matriz covariância, associado à pseudomedida reativa $i$
$\phi_{base}$	Ângulo de base
$R_{cpu}$	Resistência da linha em $cpu$
$X_{cpu}$	Reatância da linha em $cpu$
$\beta$	Ângulo de fase da corrente
$n_l$	Número de linhas do sistema
$X_i$	Reatância da linha $i$
$R_i$	Resistência da linha $i$
$P_i$	Injeção de potência ativa na barra $i$
$Q_i$	Injeção de potência reativa na barra $i$
$z_{m_{base}}$	Vetor do valor de base das grandezas medidas
$z_m^{cpu}$	Vetor das grandezas em $cpu$
$\alpha_{avg}$	Relação $X/R$ média em radianos
$\gamma_{avg}$	Média entre a relação $X/R$ máxima e mínima em radiano
$\tau$	Índice de fator de carregamento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.3	REVISÃO DE LITERATURA	15
1.3.1	Estimação de Estados Generalizada	15
1.3.2	Métodos desacoplados na Estimação de Estados	16
1.3.3	Processamento de Erros na Estimação de Estados em Sistemas de Transmissão	16
1.3.4	Processamento de Erros na Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição	18
1.4	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES	19
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	20
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>21</b>
2.1	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	22
2.1.1	Formulação clássica da Estimação de Estados	22
2.1.2	Estimação de Estados Desacoplada Rápida	27
2.1.2.1	Método Desacoplado no Modelo	29
2.1.2.2	Método Desacoplado no Algoritmo	30
2.2	PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS	31
2.2.1	Teste do Máximo Resíduo Normalizado	33
2.2.2	Testes geométricos	35
<b>3</b>	<b>PROCESSAMENTO DE ERROS VIA TESTE GEOMÉTRICO</b>	<b>37</b>
3.1	FORMULAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA	37
3.1.1	EEG-DR no modelo	41
3.1.2	EEG-DR no algoritmo	42
3.2	TESTE GEOMÉTRICO NA EEG-DR	43
3.3	PROCESSAMENTO DE ERROS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	47
<b>4</b>	<b>SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b>	<b>51</b>
4.1	PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO VIA EEG-DR E TESTES GEOMÉTRICOS EM ST	52
4.2	PROCESSAMENTO DE ERROS EM MEDIDAS NA EESD VIA TESTES GEOMÉTRICOS	62
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>67</b>
5.1	CONCLUSÕES	67
5.2	TRABALHOS FUTUROS	67

	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXO 1 - DADOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO . . . . .</b>	<b>73</b>
1.1	Sistema 5 barras . . . . .	74
1.2	Sistema 4 barras . . . . .	74
1.3	Sistema IEEE-30 barras no nível de subestação . . . . .	75
	<b>ANEXO 2 - DADOS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO . . . . .</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A fim de manter as condições normais de operação, o sistema elétrico é continuamente monitorado através de um conjunto redundante de medidas realizadas em tempo real. A estimação de estados é uma ferramenta fundamental para a modelagem em tempo real da rede do sistema elétrico de potência, que processa estatisticamente esse conjunto redundante de medidas para fornecer o estado de operação da rede e uma base de dados confiável para as ferramentas de análise e segurança da mesma. Uma etapa crucial para garantir a acurácia do estimador é o processamento de erros.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

No âmbito da Estimação de Estados (EE) há muitos estudos e ferramentas consolidadas desde a abordagem de Schweppe e Wildes (1970) no início da década de 70, na qual as formulações existentes são majoritariamente voltadas para os sistemas de transmissão (ST). A modelagem barra-ramo é amplamente utilizada na EE, a qual pressupõe que a topologia da rede está correta e somente os erros em medidas são processados (MONTICELLI, 1999). Visando representar com mais veracidade o estado real do sistema, implementou-se a representação de ramos de impedância nula (MONTICELLI; GARCIA, 1991)(MONTICELLI, 1993a) (MONTICELLI, 1993b), precursora da Estimação de Estados Generalizada (EEG) (ALSAC et al., 1998).

A modelagem no nível de subestação é utilizada na formulação do problema da EEG, na qual os ramos chaveáveis (chaves e disjuntores) da rede são representados explicitamente (MONTICELLI, 1999), viabilizando então o processamento de erros de topologia do sistema. Nessa formulação, os status (aberto/fechado) das chaves e disjuntores são considerados como variáveis de estado, sendo assim, há um aumento significativo da dimensão do problema de EE, o qual pode ser contornado pela representação das subestações apenas das áreas de interesse (MONTICELLI; GARCIA, 1991) (MONTICELLI, 1993b) (MONTICELLI, 1993a) e também utilizando os métodos desacoplados (SILVA, 2016) (NOGUEIRA et al., 2018) (NOGUEIRA, 2019), o qual subdivide o problema de EE conforme a natureza ativa e reativa ao mesmo tempo que considera a modelagem da rede no nível de subestação.

Em Nogueira et al. (2018), o desacoplamento foi implementado na EEG, viabilizando a detecção e identificação de erros de topologia. Até então, os algoritmos apresentados na literatura que utilizavam os métodos desacoplados focavam na modelagem barra-ramo e processavam somente erros grosseiros em medidas (MONTICELLI; GARCIA, 1990)(GARCIA et al., 1979).

Os testes do Máximo Resíduo Normalizado (MRN) e do máximo Multiplicador de Lagrange Normalizado (MLN) são bastante difundidos e revalidados na literatura, demonstrando eficiência na etapa de detecção e identificação de informações errôneas. No entanto, eles apresentam uma grande desvantagem que é a necessidade de sucessivas reestimações de estados, o que implica em um elevado custo computacional.

Em Lourenço et al. (2015) uma interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange foi apresentada, dando origem aos testes geométricos (também conhecidos como teste do cosseno). Esse teste permite processar um conjunto suspeito de medidas para identificar tanto a natureza quanto as informações/medidas errôneas sem a necessidade de sucessivas reestimações de estado. O teste geométrico é um método não-enumerativo, no qual testes iniciais utilizando os métodos desacoplados na EEG explorados em Nogueira (2019) para sistemas de transmissão foram apresentados.

O trabalho de Nogueira (2019) aborda a EEG em conjunto com métodos desacoplados ao mesmo tempo que traz a aplicação da normalização complexa para o processo de estimação de estados viabilizando sua aplicação para ST e sistemas de distribuição (SD). Testes iniciais discutem o processamento de erros em ST e SD.

Tendo em vista os avanços do sistema elétrico de potência e o algoritmo proposto em Nogueira (2019), este trabalho visa corroborar a eficiência do processamento de erros em medidas e de topologia na EEG desacoplada rápida em sistemas de transmissão, além de instigar o processamento de erros nos sistemas de distribuição, através dos resíduos normalizados e do teste geométrico.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Consolidar a combinação dos resíduos normalizados com o teste geométrico no processamento de erros em medidas e de topologia na estimação de estados em sistemas de transmissão e processamento de erros em medidas em sistemas de distribuição, considerando os métodos desacoplados na formulação do problema.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Em função do objetivo geral descrito anteriormente, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Compreender o estado da arte da EE (EE em sistemas de transmissão e distribuição, métodos desacoplados e normalização complexa por unidade) através da literatura;

- Avaliar o desempenho do teste geométrico no processamento de erros na EE para sistemas de transmissão;
- Consolidar o teste geométrico no processamento de erros em medidas e de topologia em sistemas de transmissão;
- Implementar e investigar o uso do teste geométrico no processamento de erros em medidas na estimação de estados desacoplada em sistemas de distribuição.

### 1.3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 1.3.1 Estimação de Estados Generalizada

Tradicionalmente, a modelagem barra-ramo é utilizada na formulação do problema de EE, a qual considera a topologia do sistema correta. Entretanto, essa modelagem não é fiel à realidade, visto que erros de topologia afetam de forma significativa a EE. Os métodos para a EE evoluem em conjunto com o sistema elétrico de potência, e a fim de representar com maior acurácia o estado da rede, foi proposta a representação dos status dos ramos chaveáveis. Em Monticelli e Garcia (1991), Monticelli (1993a) e Monticelli (1993b) apresentou-se a modelagem dos ramos de impedância nula, na qual o problema de mau condicionamento numérico causado pelas impedâncias série de valores muito pequenos ou extremamente altos é contornado através da inclusão dos fluxos de potência ativa e reativa nos ramos chaveáveis como variáveis de estado.

Em Alsac et al. (1998) propôs-se a Estimação de Estados Generalizada (EEG), na qual a topologia da rede é representada no nível de subestação. Nessa modelagem, os disjuntores das subestações são representados de forma explícita, fazendo com que os fluxos de potência através destes dispositivos sejam considerados como variáveis de estado. Na EEG os status dos disjuntores são adicionados como pseudomedidas ou como restrições de igualdade, conforme a abordagem de resolução do problema de estimação: Método dos Mínimos Quadrados Ponderados (MMQP) ou Método do Tableau, respectivamente, sendo que a diferença angular e a queda de tensão serão nulas quando o disjuntor estiver fechado, enquanto que os fluxos de potência através destes dispositivos serão nulos se este estiver aberto.

Apesar da EEG possibilitar a detecção e identificação de erros de topologia, o aumento da dimensão do problema de EE é evidente, acarretando em um incremento na carga computacional. Uma das alternativas exploradas em Silva (2016) e Nogueira (2019) é o desacoplamento das grandezas conforme a natureza ativa e reativa do problema. Para entender a proposta desses trabalhos, as próximas seções apresentam inicialmente as formulações desacopladas originais do processo de EE, seguida das sua extensão para a EEG propostas em Silva (2016) e Nogueira (2019).

### 1.3.2 Métodos desacoplados na Estimação de Estados

Os métodos desacoplados foram inicialmente aplicados no problema de fluxo de potência em Stott e Alsac (1974), através de aproximações nas matrizes relacionadas ao problema. Em Horisberger et al. (1976), o desacoplamento foi estendido para o problema de EE, utilizando o MMQP, em sistemas de transmissão, no qual foram feitas simplificações na matriz ganho.

Em Garcia et al. (1979) propôs-se a estimação de estados desacoplada rápida no estimador MMPQ em duas versões distintas: desacoplado no modelo e no algoritmo. No desacoplado no modelo as submatrizes fora da diagonal principal da matriz Jacobiana são ignoradas, enquanto no desacoplado no algoritmo, as submatrizes fora da diagonal principal da matriz ganho são desconsideradas. Além destas simplificações, também foi realizado o processamento de erros em medidas, apresentando um custo computacional inferior quando comparado à EE sem desacoplamento.

Em Monticelli e Garcia (1990) o método desacoplado rápido proposto não desconsidera as submatrizes da matriz Jacobiana, mas sim aplica o método de Newton em duas etapas para a resolução do problema, na qual as diferenças da defasagem angular e da tensão são calculadas separadamente sem outras aproximações. Apesar de demonstrar maior robustez e uma melhor convergência, o custo computacional é relativamente maior que a versão tradicional de desacoplamento.

A formulação clássica dos métodos desacoplados proposta em Garcia et al. (1979) e Monticelli e Garcia (1990) é limitada à modelagem barra-ramo e também aplicável somente em sistemas de transmissão, em função da alta razão da reatância pela resistência e da baixa sensibilidade da parte ativa (reativa) em relação a magnitude de tensão (ângulo).

Em Nogueira et al. (2018) foi proposta a EEG utilizando os métodos desacoplados, permitindo além do detalhamento da rede no nível de subestação, um melhor desempenho computacional associado ao desacoplamento das grandezas, originando a Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR). Além disso, o trabalho propõe um estimador de estados generalizado desacoplado rápido para sistemas de distribuição, através da incorporação da normalização complexa por unidade (*cpu*), proposta em Tortelli et al. (2015) inicialmente para o fluxo de potência em sistemas de distribuição.

### 1.3.3 Processamento de Erros na Estimação de Estados em Sistemas de Transmissão

Como a EEG permite um detalhamento mais apurado do sistema e inclui novas informações, a análise de erros de topologia torna-se viável, sendo assim, além dos erros em medidas, os erros de topologia também passaram a compor o processamento

de erros na EE.

Em Clements e Davis (1988) e Wu e Liu (1989), o teste do Máximo Resíduo Normalizado (MRN) é utilizado para a detecção e identificação de erros de topologia, anteriormente já aplicado para a detecção de erros em medidas, conforme apresentado em Abur e Exposito (2004), por exemplo.

Em Clements e Costa (1998) é introduzido o uso dos multiplicadores de Lagrange normalizados (MLN), visto como uma extensão dos resíduos normalizados, para a identificação de erros de topologia em sistemas de transmissão, onde os status dos disjuntores são tratados como restrições operacionais do problema de EE. Neste trabalho demonstrou-se que o maior MLN está associado ao status errôneo do sistema, podendo também ser aplicado para detectar e identificar erros em medidas.

Tanto o teste do MRN quanto do máximo MLN são métodos enumerativos e necessitam de reestimações quando se lida com erros múltiplos. Na literatura têm-se métodos não-enumerativos que evitam essas reestimações, como o Teste de Hipóteses e o teste geométrico. Em Lourenço et al. (2002) e Lourenço et al. (2004), o Teste de Hipóteses baseado no teorema de Bayes é aplicado, após a detecção de anomalias via teste do máximo MLN e formação do conjunto suspeito pela interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange, sendo então feitos testes de possíveis combinações de status suspeitos.

Em Lourenço et al. (2006) o teste geométrico junto com o teste do máximo MLN foi expandido para a identificação do erro de topologia em sistemas de transmissão. Coelho (2012) apresenta a formulação linearizada da EEG, pelo método Tableau Esperso, incluindo o processamento simultâneo de erros através dos MLN e testes geométricos em sistemas-teste de transmissão. O algoritmo apresentado é capaz de identificar a origem da anomalia (erro em medida analógica ou de topologia). Assim como em Lourenço et al. (2015), onde são processados erros em medidas e erros de topologia, aplicando o teste do máximo MLN para a detecção de anomalias e o teste geométrico para a formação do conjunto suspeito e identificação de informações errôneas em sistemas de transmissão.

Já Nogueira (2019) apresentou o uso do teste do MRN juntamente com o teste geométrico para o processamento de erros em medidas e de topologia, separadamente, na EEG-DR em um sistema de transmissão, necessitando de mais testes para a consolidação do teste geométrico nessa abordagem. Além disso, também explorou a EEG-DR em sistemas de distribuição, porém, sem o processamento de erros.

#### 1.3.4 Processamento de Erros na Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição

Dentro do contexto da Estimação de Estados nos Sistemas de Distribuição (EESD), poucos estudos englobam de forma conjunta uma ferramenta para realizar o processamento de erros no estimador de estados nos sistemas de distribuição, considerando o desacoplamento na formulação do problema. Os primeiros trabalhos referentes à EESD começaram em 1990, apontando o primeiro desafio para a sua eficiência: o número limitado de medidas (DELLA GIUSTINA et al., 2014). Desde então, diversos estudos foram desenvolvidos aplicando diferentes técnicas para viabilizar a EESD. No entanto, poucos trabalhos abordam o processamento de erros na EESD.

Uma alternativa bastante disseminada é o uso de medidores inteligentes para suprir a falta da redundância nos SDs. Em Pau et al. (2018) é realizada uma análise sobre o processo de detecção e identificação de erros na presença de medidores inteligentes em redes de distribuição de baixa tensão, dependendo da quantidade desses medidores na rede e das características implícitas dos mesmos. Os autores utilizam o Teste do Qui-Quadrado e o MRN para o processamento de erros em medidas dentro do algoritmo de EESD, baseado na solução via o MMQP.

Braunstein et al. (2015) utiliza o teste do MRN para a identificação de medidas errôneas com uma variação da abordagem geométrica apresentada em (LOURENÇO et al., 2002) e (LOURENÇO et al., 2006). Na etapa da identificação, a análise geométrica calcula o erro composto para cada medição. Em Wei et al. (2015) foi abordado o uso da normalização complexa por unidade (*cpu*), proposta em Tortelli et al. (2015), capaz de contornar os problemas da alta relação R/X presente nos SDs e permitir o uso do método desacoplado rápido na EESD. Porém, o método proposto não contempla processamento de erros de nenhuma natureza.

Ju et al. (2017) reformula as medidas de correntes nos ramos para torná-las equivalentes às perdas ativas e reativas do sistema, as quais são incorporadas em uma formulação desacoplada alternativa. Os erros em medidas são detectados pelo Teste do Qui-Quadrado e identificados pelo teste do MRN. A *cpu* também foi utilizada para viabilizar o desacoplamento em parte ativa e reativa das medidas. O método mostrou-se eficiente para altas e médias tensões nos SDs, porém, para aplicar em baixas tensões, as quais são em sua maioria não observáveis, é necessário expandir para o modelo trifásico.

Issicaba et al. (2015) desenvolveu um algoritmo considerando o modelo trifásico da rede, no qual as injeções de potência errôneas são identificadas com base na aplicação dos testes geométricos ou testes de colinearidades propostos em Lourenço et al. (2002) e Lourenço et al. (2006), os quais são baseados na interpretação geométrica dos multiplicadores de Lagrange. Em comparação com outros testes estatísticos, essa

abordagem mostrou-se mais direta e evita a grande quantidade de combinações de alternativas decorrentes do aumento das restrições operacionais do problema, sendo de extrema importância nas redes de distribuição.

Em Nogueira et al. (2019) é proposto um algoritmo que combina a EEG-DR com a *cpu*, sendo viável o processamento de erros em medidas (em sistemas de distribuição e transmissão) e de topologia (para sistemas de transmissão), através do teste do Qui-Quadrado para a detecção de anomalias e teste do MRN para a identificação da origem do erro.

Em Hasler (2021) o processamento de erros em sistemas de distribuição utiliza apenas o teste do MRN para detecção e identificação de erros grosseiros em medidas, necessitando de reestimações cada vez que uma medida apresenta resíduo normalizado maior que o limiar estabelecido.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES

Em decorrência dos avanços do sistema elétrico de potência e também do aumento significativo da geração distribuída e penetração de fontes renováveis no sistema elétrico, a EE tem se tornado mais complexa e o processamento de erros uma etapa mais desafiadora. Apesar da existência de ferramentas eficientes para EE, consolidadas desde a década de 70, grande parte delas foram elaboradas para sistemas de transmissão, os quais apresentam características notadamente distintas do sistema distribuição, além de considerar, em sua maioria, apenas um tipo de erro (medida ou topologia) durante o processamento de erros, onde grande parte das ferramentas é adepta de métodos enumerativos que necessitam de reestimações.

Com isso, a proposta desta dissertação é consolidar um algoritmo habilitado para processar erros de medidas e topologia, simultaneamente, utilizando o teste geométrico na formação do conjunto suspeito e na identificação de anomalias na EEG-DR para sistemas de transmissão e erros em medidas, em sistemas de distribuição. As principais contribuições derivadas desta dissertação são:

- Um algoritmo consolidado de processamento de erros simultâneos, em medidas e de topologia, na EEG-DR em sistemas de transmissão, utilizando o teste geométrico na formação do conjunto suspeito e identificação de anomalias;
- Consolidar o uso dos testes geométricos e métodos desacoplados, aliados à normalização complexa por unidade, no processamento de erros grosseiros em medidas para sistemas de distribuição.

## 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo é contextualizado o processamento de erros no processo de estimação de estados. Também são apresentados os objetivos geral e específicos, uma breve revisão da literatura com foco na Estimação de Estados Generalizada, Estimação de Estados Desacoplada Rápida e processamento de erros em sistemas de transmissão e distribuição. Além disso, são pontuadas as justificativas e contribuições desta dissertação.

O Capítulo 2 traz o estado da arte que fundamentou o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, discorrendo sobre os tipos de erros na estimação de estados, a formulação do problema de estimação de estados e métodos desacoplados e técnicas de processamento de erros.

Com base no Capítulo 2, o Capítulo 3 apresenta a metodologia aplicada na dissertação para o desenvolvimento do algoritmo proposto. Primeiramente tem-se a apresentação do desacoplamento na Estimação de Estados Generalizada usando o MMQP (no modelo e no algoritmo) e, em seguida, a implementação do teste do MRN e do teste geométrico.

A partir das implementações realizadas, no Capítulo 4 são apresentadas as simulações e sistemas teste, juntamente com a discussão dos resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5 são explanadas as conclusões provenientes das simulações e resultados, reforçando as contribuições e limitações do algoritmo e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O estimador de estados processa um conjunto de dados redundantes em tempo real e fornece estimativas confiáveis do estado da rede, visando manter as condições normais e seguras de operação do sistema elétrico de potência (SCHWEPPE; WILDES, 1970) (MONTICELLI, 1999) (ABUR; EXPOSITO, 2004). Porém, esses dados não são exatos em função de falhas na comunicação, erros de medições, erros de modelos matemáticos utilizados, mudanças inesperadas do sistema, entre outros (SCHWEPPE; WILDES, 1970). Sendo assim, a função do estimador é obter as tensões complexas de todas as barras que formam o sistema através dos dados disponíveis, e, para que não haja comprometimento dos resultados, uma etapa fundamental é o processamento de erros.

Os erros podem ser classificados em três tipos: parâmetros, medidas e topologia. Os erros de parâmetros são tratados em um processo off-line, ou seja, fora da EE, através de informações armazenadas em um banco de dados, como os parâmetros das linhas de transmissão, transformadores, capacitores shunt, e outros (LIU et al., 1992) (LIU; LIM, 1995). Já os erros em medidas e de topologia são classificados como um processo online, dentro da EE.

Os erros grosseiros em medidas são os mais tratados na literatura. Eles correspondem, de modo geral, aos valores que possuem um desvio significativo do seu valor real (ABUR; EXPOSITO, 2004). Em tese, considera-se erro grosseiro aquele que apresenta medida superior a três desvios-padrão.

Por fim, os erros de topologia estão relacionados com o status dos disjuntores das subestações que são representadas de forma explícita na EE. As posições errôneas dos status dos disjuntores ou a falta de relato da mudança de status, resulta em erros de topologia (SINGH; ALVARADO, 1995) (ABUR et al., 1995). Os erros de topologia mais comuns são: de inclusão, exclusão ou *bus split*. O erro de inclusão é quando um disjuntor não está em operação (ou seja, está aberto) mas é incluído na operação do sistema (como se estivesse fechado). No erro de exclusão o disjuntor está em operação (disjuntor fechado) porém é excluído da rede (como se estivesse aberto). E o erro *bus split* que é basicamente quando há um seccionamento de barra que não é representado no modelo do sistema.

Neste capítulo são explanados os principais tópicos relacionados à este trabalho, retomando as formulações de estimação de estados e métodos desacoplados até as técnicas de detecção e identificação de erros em medidas e de topologia no processo de EE utilizadas no algoritmo implementado.

## 2.1 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Desde Schweppe e Wildes (1970), a formulação clássica da EE tem como base a representação barra-ramo do sistema, desconsiderando os arranjos internos das subestações. A partir da década de 90, teve início a inclusão de chaves e disjuntores no problema de EE, permitindo a representação das configurações das subestações do sistema elétrico (MONTICELLI; GARCIA, 1991) (MONTICELLI, 1993a) (MONTICELLI, 1993b) (ALSAC et al., 1998), originando a Estimação de Estados Generalizada (EEG). Na EEG a representação da rede é no nível de subestação, onde o fluxo de potência ativa e reativa através dos disjuntores e chaves, assim como a tensão complexa dos barramentos das subestações são adicionados como novas variáveis de estado (ALSAC et al., 1998). Esse detalhamento na EEG impacta no aumento da dimensão do problema de estimação, e para viabilizar o processamento de toda a rede elétrica com um tempo computacional reduzido, pode-se implementar na EEG o desacoplamento  $P\theta-QV$ , originando a Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR) (NOGUEIRA et al., 2018). Antes de adentrar na formulação da EEG-DR implementada no algoritmo de processamento de erros deste trabalho, é necessário recapitular as formulações da EE clássica e métodos desacoplados.

### 2.1.1 Formulação clássica da Estimação de Estados

Com base no processamento do conjunto de medidas provenientes do sistema, um modelo de medição é estabelecido para que o estimador obtenha a melhor estimativa do estado da rede. Considera-se um sistema com  $n_b$  barras e  $n_m$  medidas, onde os parâmetros e topologia da rede são conhecidos. O vetor de estados é composto por  $n_b - 1$  variáveis, dado o conhecimento do ângulo da barra de referência. Sendo assim, a dimensão do vetor de variáveis de estados é  $n = 2n_b - 1$ . O vetor das quantidades medidas pode ser expresso através do seguinte modelo de medição (QUINTANA et al., 1982) (MONTICELLI, 1999):

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

onde:

$z_m$  é o vetor das quantidades medidas ( $n_m \times 1$ );

$z_0$  é o vetor dos valores verdadeiros das quantidades medidas ( $n_m \times 1$ );

$e_m$  é o vetor correspondente aos erros de medição ( $n_m \times 1$ ).

Entende-se por erros de medição os erros associados diretamente ao processo de medição, como a imprecisão dos medidores, erros nos transformadores de medição, erros de comunicação e efeitos da conversão analógica digital (LOURENÇO, 2001).

Como não é possível ter conhecimento dos valores verdadeiros das grandezas medidas, supõe-se que os erros de medição possuem distribuição normal com média zero:

$$E(e_m) = 0 \quad (2.2)$$

sendo  $E(\cdot)$  o valor esperado, a matriz de covariância dos erros de medição ( $R_m$ ) é a matriz diagonal ( $n_m \times n_m$ ) dada por:

$$E(e_m e_m^T) = R_m \quad (2.3)$$

Apesar do vetor dos valores verdadeiros ser desconhecido, este pode ser representado através de funções não lineares que relacionam as quantidades medidas às variáveis de estado  $x$ :

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

sendo assim, o modelo de medição utilizado no processo de estimação de estados pode ser expresso da seguinte maneira (MONTICELLI, 1999):

$$z_m = h_m(x) + e_m \quad (2.5)$$

sendo:

$x$  o vetor das variáveis de estados ( $n \times 1$ );

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

A partir das medidas provenientes do sistema e do modelo de medição, é possível realizar a estimação de estados. Considerando o método clássico, aplica-se o MMQP, através da minimização da soma ponderada dos resíduos, que são definidos por:

$$r = z_m - h(\hat{x}) \quad (2.6)$$

sendo  $\hat{x}$  o vetor de estados estimados ( $n \times 1$ ).

Sendo assim, o problema de EE pode ser formulado como uma minimização da seguinte função objetivo (ABUR; EXPOSITO, 2004):

$$J(\hat{x}) = [z_m - h_m(\hat{x})]^T R_m^{-1} [z_m - h_m(\hat{x})] \quad (2.7)$$

As condições de otimalidade de primeira ordem devem ser satisfeitas no ponto mínimo, levando à:

$$g(\hat{x}) = \nabla J(\hat{x}) = \frac{\partial J(\hat{x})}{\partial \hat{x}} = -H^T(\hat{x})R_m^{-1}[z_m - h_m(\hat{x})] = 0 \quad (2.8)$$

sendo  $H(\hat{x})$  a matriz Jacobiana, definida por:

$$H(\hat{x}) = \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \quad (2.9)$$

chegando-se à:

$$[H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}]\Delta x = H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}[z_m - h_m(\hat{x}^k)] \quad (2.10)$$

Expandindo a função não linear  $g(\hat{x})$  através da série de Taylor em torno do vetor  $\hat{x}^k$  e negligenciando os termos de maior ordem, chega-se a uma solução iterativa denominada como método de Gauss-Newton, conhecida por (ABUR; EXPOSITO, 2004):

$$\hat{x}^{k+1} = \hat{x}^k - [G(\hat{x}^k)]^{-1}g(\hat{x}^k) \quad (2.11)$$

onde:

$k$  é índice das iterações;

$\hat{x}^k$  é o vetor de solução correspondente à iteração  $k$ .

Tendo como a matriz ganho  $G(x)$  e o vetor do lado direito  $T$  do processo de EE dados por:

$$G(x) = \frac{\partial g(\hat{x}^k)}{\partial \hat{x}^k} = [H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}H(\hat{x}^k)] \quad (2.12)$$

$$T = [H^T(\hat{x}^k)R_m^{-1}(z_m - h(\hat{x}^k))] \quad (2.13)$$

a equação apresentada em (2.10), conhecida como Equação Normal de Gauss, pode ser resolvida através de um processo iterativo que, a cada iteração, soluciona o seguinte sistema linear (ABUR; EXPOSITO, 2004):

$$G(\hat{x}^k)\Delta x^{k+1} = T \quad (2.14)$$

onde a cada iteração, determina-se o incremento do vetor de estado  $\Delta x$ :

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

Na EE clássica, no modelo barra-ramo da rede, tem-se definido o vetor de estados  $x$  e o vetor de medidas  $z_m$ , respectivamente, por:

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

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

onde:

$\theta$  é o vetor dos ângulos das tensões nas barras, com dimensão  $n_b \times 1$ ;

$V$  é o vetor das magnitudes das tensões nas barras, com dimensão  $n_b \times 1$ ;

$z_{fluxo}^A$  e  $z_{fluxo}^R$  são os vetores de fluxo de potência ativa e reativa, respectivamente;

$z_{inj}^A$  e  $z_{inj}^R$  são os vetores de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente;

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

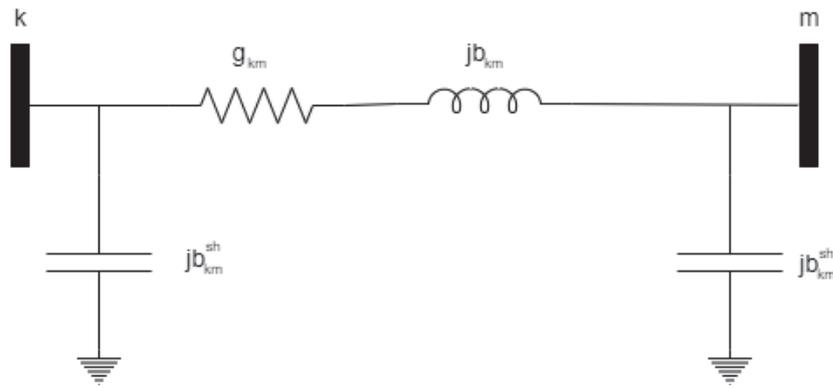
Também, as equações referentes às quantidades medidas compõem o vetor  $h_m(\hat{x}^k)$  são:

$$h_m(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ Q_{fluxo} \\ P_{inj} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Sendo que as equações de fluxo de potência ativa ( $P_{fluxo}$ ) e reativa ( $Q_{fluxo}$ ) nos ramos convencionais, a injeção de potência ativa ( $P_{inj}$ ) e reativa ( $Q_{inj}$ ) e magnitude de tensão nas barras ( $V_{mag}$ ) são obtidas através das conhecidas equações a seguir, respectivamente (MONTICELLI, 1999)(ABUR; EXPOSITO, 2004), baseadas no modelo  $\pi$  da rede elétrica (FIGURA 1):

$$P_{km} = g_{km}V_k^2 - V_kV_m(g_{km}\cos\theta_{km} + b_{km}\sen\theta_{km}) \quad (2.19)$$

$$Q_{km} = -(b_{km} + b_k^{sh})V_k^2 - V_kV_m(g_{km}\sen\theta_{km} - b_{km}\cos\theta_{km}) \quad (2.20)$$

FIGURA 1 – MODELO  $\pi$  DE LINHA DE TRANSMISSÃO

FONTE: a Autora (2022)

$$P_k = V_k \sum_{m \in \omega_k} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (2.21)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in \omega_k} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2.22)$$

$$V_k = V_k \quad (2.23)$$

sendo que:

o índice  $km$  representa o ramo da barra  $k$  para a barra  $m$ ;

$g_{km} + j b_{km}$  representa a admitância série do ramo  $km$ ;

$b_k^{sh}$  representa a susceptância *shunt* conectada na barra  $k$ ;

$G_{km} + j B_{km}$  representa o  $km$ -ésimo elemento da matriz de admitâncias;

$\Omega_k$  representa as barras adjacentes à  $k$ .

A partir dos vetores dados em (2.16) e (2.18), substituindo em (2.9), tem-se a estrutura da matriz Jacobiana (ABUR; EXPOSITO, 2004):

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

A solução iterativa do algoritmo da EE via MMQP pode ser descrita como (ABUR; EXPOSITO, 2004):

1. Inicialização das iterações com  $k = 0$ ;
2. Inicialização do vetor de estados ( $x^k$ ), tipicamente usando *flat start*;
3. Cálculo da matriz ganho (2.12);
4. Cálculo do lado direito da Equação de Gauss (2.13);
5. Obtenção de  $\Delta x^k$  através de (2.14);
6. Teste do critério de convergência:  $\max|\Delta x^k| \leq \text{tolerância}$ ;
7. Se o critério for atendido,  $\hat{x}^k$  é a solução. Caso contrário, atualização das variáveis através de (2.15).

Devido ao grande esforço computacional associado à fatoração da matriz ganho em (2.14), buscou-se alternativas para melhorar o condicionamento numérico durante o processo de EE. Uma das observações apontadas em Abur e Exposito (2004) foi que os elementos da matriz ganho não se alteram significativamente durante as iterações, em comparação dos valores de inicialização *flat start* e os valores obtidos na convergência do problema. Além disso, observou-se que em altas razões  $X/R$ , encontradas em sistemas de transmissão, há uma baixa sensibilidade das quantidades ativas (reativas) em relação às magnitudes de tensão (ângulo de fase), levando à formulação desacoplada rápida no processo de estimação de estados (GARCIA et al., 1979).

### 2.1.2 Estimação de Estados Desacoplada Rápida

Na formulação da Estimação de Estados Desacoplada Rápida (EEDR), proposta em Garcia et al. (1979), as equações são particionadas conforme a natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ). Sendo assim, as equações (2.16), (2.17) e (2.18) são reescritas da seguinte maneira:

$$x^A = [\theta]; x^R = [V] \quad (2.25)$$

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

$$z_m^R = \begin{bmatrix} z_{fluxo}^R \\ z_{inj}^R \\ z_{Vmag} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$h_m^A(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} P_{fluxo} \\ P_{inj} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$h_m^R(\hat{x}^k) = \begin{bmatrix} Q_{fluxo} \\ Q_{inj} \\ V_{mag} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

A matriz de covariância na EEDR é dada por (GARCIA et al., 1979):

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

A partição da matriz Jacobiana é dada em função dos novos vetores de estado e medidas e pode ser representada por:

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

onde as submatrizes da Jacobiana são dadas a partir das derivadas primeiras de  $h_m(\cdot)$  em função de  $\theta$  e  $V$ :

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

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

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

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

A partir de (2.12), (2.30) e (2.31), a matriz ganho é particionada da seguinte maneira:

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

onde:

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

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

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

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

Explorando as características das matrizes Jacobiana e ganho, chegou-se em duas versões dos métodos desacoplados, provenientes de simplificações nessas matrizes que aceleram o processo de convergência: método desacoplado no modelo e método desacoplado no algoritmo (GARCIA et al., 1979).

#### 2.1.2.1 Método Desacoplado no Modelo

Na abordagem dos métodos desacoplados no modelo, simplificações na matriz Jacobiana são realizadas durante o processo iterativo: as submatrizes fora da diagonal principal ( $H_{PV}$  e  $H_{Q\theta}$ ) são desprezadas. Além disso, as resistências das linhas de transmissão são ignoradas na matriz  $H_{P\theta}$ :

$$H = \begin{bmatrix} H_{P\theta} & 0 \\ 0 & H_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

As simplificações efetuadas na Jacobiana afetam os dois lados da Equação Normal (2.10), sendo assim, a EEDR no modelo (indicadas pelo subscrito  $dm$ ) se dá pelas iterações dos seguintes sistemas lineares, divididos em subproblemas de natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ):

- Subproblema ativo:

$$G_{dm}^A = H_{P\theta}^T (R_m^A)^{-1} H_{P\theta} \quad (2.42)$$

$$T_{dm}^A = H_{P\theta}^T (R_m^A)^{-1} [z_m^A - h_m^A] \quad (2.43)$$

e a resolução do subproblema ativo é dado por:

$$G_{dm}^A \Delta \hat{x}_A = T_{dm}^A \quad (2.44)$$

- Subproblema reativo:

$$G_{dm}^R = H_{QV}^T (R_m^R)^{-1} H_{QV} \quad (2.45)$$

$$T_{dm}^R = H_{QV}^T (R_m^R)^{-1} [z_m^R - h_m^R] \quad (2.46)$$

e a resolução do subproblema reativo é dado por:

$$G_{dm}^R \Delta \hat{x}_R = T_{dm}^R \quad (2.47)$$

O processo de EE finaliza quando ambos subproblemas atingirem o critério de convergência, não precisando, necessariamente, ocorrer com o mesmo número de iterações. Devido às aproximações realizadas na EEDR no modelo, podem surgir alterações na solução final, porém, de pequena magnitude.

#### 2.1.2.2 Método Desacoplado no Algoritmo

Já na EEDR no algoritmo, as aproximações são realizadas apenas na matriz ganho, afetando um lado da Equação Normal (2.10). Essas aproximações não afetam a solução final em comparação com a solução da EE sem o desacoplamento. As submatrizes  $G_{PV}$  e  $G_{Q\theta}$  são negligenciadas, levando à:

$$G = \begin{bmatrix} G_{P\theta} & 0 \\ 0 & G_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

A EEDR no algoritmo (indicadas pelo subscrito  $da$ ) se dá pelas iterações dos seguintes sistemas lineares, divididos em subproblemas de natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ):

- Subproblema ativo:

$$T_{da}^A = \begin{bmatrix} H_{P\theta}^T \\ H_{Q\theta}^T \end{bmatrix} (R_m^A)^{-1} [z_m^A - h_m^A] \quad (2.49)$$

e a convergência do subproblema ativo é dado por:

$$G_{da}^A \Delta \hat{x}_A = T_{da}^A \quad (2.50)$$

- Subproblema reativo:

$$T_{da}^R = \begin{bmatrix} H_{PV}^T \\ H_{QV}^T \end{bmatrix} (R_m^R)^{-1} [z_m^R - h_m^R] \quad (2.51)$$

e a convergência do subproblema reativo é dado por:

$$G_{da}^R \Delta \hat{x}_R = T_{da}^R \quad (2.52)$$

Cabe ressaltar que todas as formulações apresentadas até então são válidas para a modelagem barra-ramo do sistema elétrico, tendo como premissa a modelagem topológica correta da rede. Uma maneira de garantir que os resultados estimados estejam livres de erros, é a implementação de uma etapa de detecção e identificação de medidas erradas no processo de EE.

## 2.2 PROCESSAMENTO DE ERROS NA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS

Na EE clássica, parte-se do pressuposto que a topologia e os parâmetros da rede estão corretos, sendo assim, somente os erros em medidas são processados. Os erros em medidas são classificados conforme a magnitude do erro (CASTILLO-ALBERTINI, 2010):

- Erro extremo: |medida - valor verdadeiro| é maior que  $20\sigma$ ;
- Erro grosseiro: |medida - valor verdadeiro| está entre  $3\sigma$  e  $20\sigma$ ;
- Ruído: |medida - valor verdadeiro| é menor que  $3\sigma$ .

sendo  $\sigma$  o desvio padrão da medida, o qual pode ser calculado por (CASTILLO et al., 2010):

$$\sigma_i = \frac{(pr \cdot z_{ti})}{3} \quad (2.53)$$

onde:

$\sigma_i$  é o desvio padrão correspondente à medida  $i$ ;

$pr$  classe de precisão do medidor (ABUR; EXPOSITO, 2004);

$z_{ti}$  corresponde ao valor verdadeiro da medida  $i$  obtido através do fluxo de potência exato.

Os erros considerados extremos são eliminados na pré-filtragem de dados, antes do processo de EE. Os ruídos são erros íntinsecos ao processo de medição,

aqueles erros que estão embutidos nos próprios medidores e baseados no fundo de escala do equipamento. Como são erros de pequena magnitude, eles não afetam a EE. Entretanto, os erros grosseiros em medidas são tratados na etapa de processamento de erros na EE e afetam a solução do estimador. As causas mais comuns dos erros grosseiros são as falhas na comunicação, desvios ou conexões erradas, defeitos nos instrumentos de medição, entre outros (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Além dos diferentes tipos de erros em medidas, eles podem se manifestar de formas distintas em função da sua localização e número de medições, sendo classificados em (ABUR; EXPOSITO, 2004):

- Erro simples: apenas uma medida no sistema apresenta erro grosseiro;
- Erros múltiplos: mais de uma medida no sistema apresenta erro grosseiro.

Conforme apontado por Abur e Exposito (2004), um aspecto importante referente aos erros múltiplos é que eles podem ocorrer em medidas que possuem resíduos fortemente ou fracamente correlacionados. Entende-se por resíduo a diferença do valor medido e do valor calculado da medida, apresentado na Equação (2.6). Dessa maneira, as medidas fortemente correlacionadas são aquelas nas quais o erro afeta de forma significativa o valor estimado de outra medida, fazendo com que uma medida correta possa ser detectada como errada. Já as estimações das medidas que apresentam resíduos fracamente correlacionados não são significativamente afetadas por erros de outras medições.

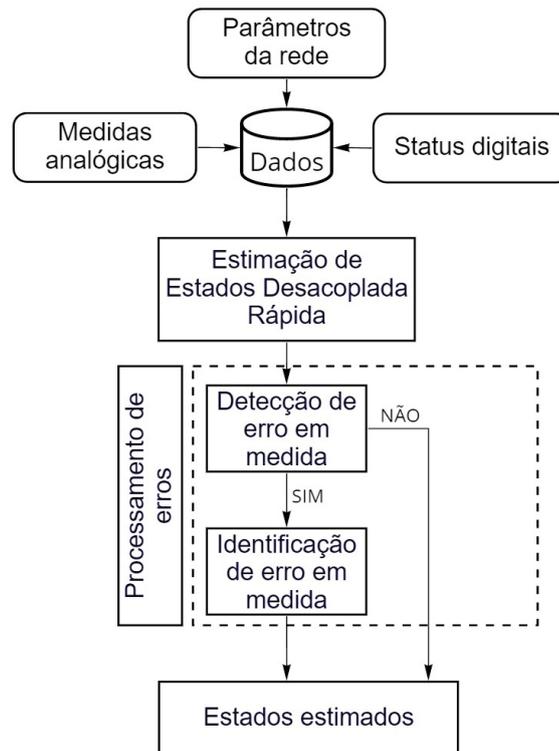
Outro aspecto relevante no processamento de erros são os conceitos de observabilidade do sistema e criticidade das medidas. Entende-se por um sistema observável aquele no qual é possível realizar a EE a partir das medições disponíveis, enquanto a análise de criticidade está relacionada com as medidas e conjuntos críticos do plano de medição (LOURENÇO, 2001).

Dado um sistema observável, entende-se por medida crítica aquela que quando é retirada do plano de medição, torna o sistema não observável (CLEMENTS et al., 1981), impossibilitando o processamento de erro visto que não haverá mais redundância. Já um conjunto crítico é quando retira-se do plano de medição um conjunto de medidas, tornando as remanescentes críticas (CLEMENTS et al., 1981), não sendo possível identificar qual medida está errada.

O processamento de erros é constituído por duas etapas: detecção e identificação. Na detecção, uma etapa mais simples, é apontada alguma anomalia dentro do conjunto de medidas. Alguns dos métodos mais utilizados para a detecção são o teste do Qui-Quadrado, Multiplicador de Lagrange Normalizado e Teste do Resíduo Normalizado. Na identificação, uma etapa mais complexa, é reconhecida exatamente

a origem da anomalia. Os métodos mais implementados na literatura são: teste do Máximo Resíduo Normalizado (MRN), máximo Multiplicador de Lagrange Normalizado e o Teste de Hipóteses. De forma genérica, o processamento de erros dentro da EE pode ser esquematizado da seguinte maneira (FIGURA 2):

FIGURA 2 – ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DE ERROS NA EE



FONTE: a Autora (2022)

Após a identificação e correção (ou exclusão da medida errônea), dependendo do método utilizado, é realizada uma reestimação. No processamento de erros pode-se dividir os algoritmos entre os métodos enumerativos (os quais necessitam reestimações após a identificação do erro) e não-enumerativos (que não necessitam de reestimações).

### 2.2.1 Teste do Máximo Resíduo Normalizado

Um dos métodos bastante consolidados na literatura para a detecção e identificação de erros no processo de EE é através do cálculo dos resíduos, onde estes são normalizados e comparados a uma constante obtida via uma distribuição normal (GARCIA et al., 1979) (ABUR; EXPOSITO, 2004). A normalização dos resíduos é dada por:

$$r_i^N = \frac{|r_i|}{\sqrt{\Omega_{ii}}} \quad (2.54)$$

onde:

$r_i$  é o resíduo da  $i$ -ésima medida;

$\Omega_{ii}$  é  $i$ -ésimo elemento da diagonal da matriz de covariância dos resíduos ( $\Omega$ ).

A matriz de covariância dos resíduos é obtida por (ABUR; EXPOSITO, 2004):

$$\Omega = SR \quad (2.55)$$

sendo  $S$  a matriz de Sensibilidade definida por:

$$S = 1 - HG^{-1}H^T R^{-1} \quad (2.56)$$

A matriz de covariância permite uma análise da criticidade das medidas. Caso os elementos da coluna da matriz  $\Omega$ , correspondentes à uma medida, forem todos nulos, indica que essa medida é crítica. Assim como, caso as colunas correspondentes à duas medidas forem linearmente dependentes, indica que essas duas medidas formam um par crítico, apresentando o mesmo valor de resíduo normalizado (ABUR; EXPOSITO, 2004).

O teste do MRN é constituído pelas seguintes etapas (ABUR; EXPOSITO, 2004):

1. Solução do problema de EE via MMQP e obtenção do vetor dos resíduos das medidas através de (2.6);
2. Cálculo dos resíduos normalizados através de (2.53);
3. Detectar o maior valor dentro do conjunto dos resíduos normalizados obtidos na etapa anterior;
4. Se o maior resíduo normalizado for maior que um limiar pré-estabelecido, a medida correspondente ao resíduo é detectada como suspeita. Caso contrário, nenhuma medida é dada como suspeita;
5. Elimina-se a medida com o maior resíduo e faz-se a reestimação de estados.

As propriedades dos resíduos normalizados para erro simples permitem a detecção e identificação de erros via teste do MRN. Quando lida-se com erros múltiplos são necessários métodos mais eficientes, como por exemplo, os testes geométricos que formam um conjunto suspeito composto por todos os resíduos maiores que o limiar estabelecido.

### 2.2.2 Testes geométricos

Inicialmente, os testes geométricos (testes de colinearidade) foram propostos com o objetivo de garantir que todas as informações consideradas como errôneas fossem incluídas em um conjunto suspeito (LOURENÇO et al., 2002), através da análise dos multiplicadores de Lagrange considerando a formulação do problema de EE via Método do Tableau. Em Lourenço et al. (2006) os testes geométricos foram estendidos para a identificação de erros de topologia e em Lourenço et al. (2015) além de identificar erros de topologia, também foi replicado para os erros em medidas.

No algoritmo proposto em Lourenço et al. (2015), calcula-se os multiplicadores de Lagrange normalizados, similar ao cálculo dos resíduos normalizados. Os multiplicadores de Lagrange estão associados com as restrições de medidas, estruturais e operacionais do problema da EEG via Método do Tableau. Compara-se os multiplicadores de Lagrange normalizados à um limiar pré-estabelecido e todos os valores superiores à este limiar passam a compor um conjunto de informações suspeitas.

As informações contidas no conjunto suspeito são analisadas através do cosseno do ângulo ( $\theta$ ) entre o vetor dos multiplicadores de Lagrange e a projeção no espaço gerado pelas colunas da matriz de covariância dos multiplicadores correspondentes ao conjunto suspeito (LOURENÇO et al., 2015). O multiplicador de Lagrange está diretamente relacionado com a matriz de covariância e com os erros:

$$\lambda = V\varepsilon \quad (2.57)$$

onde:

$\lambda$  é o vetor dos multiplicadores de Lagrange;

$V$  é a matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange;

$\varepsilon$  é o vetor contendo os erros (de medidas e pseudomedidas).

A matriz de covariância  $V$  é particionada conforme as colunas linearmente independentes de  $V$  em relação as informações suspeitas ( $V_s$ ), outra parte correspondente a informação sem erro e as colunas correspondentes às informações críticas. A partição de interesse é a  $V_s$ , sendo que se todas as informações errôneas estiverem dentro do conjunto suspeito, o vetor de resíduos estará no mesmo espaço de  $V_s$  e o valor de  $\theta$  é dado por (LOURENÇO et al., 2015):

$$\cos\theta = \sqrt{\frac{\lambda_S^T (V_S^T R V_S)^{-1} \lambda_S}{\lambda^T R^{-1} \lambda}} \quad (2.58)$$

Caso o valor do cosseno de  $\theta$  seja muito próximo de 1,0, isso indica que todas as informações errôneas estão dentro do conjunto suspeito. Caso contrário, o valor apresentará valor notadamente inferior à 1,0.

Posteriormente, em Nogueira (2019), os testes geométricos foram implementados na identificação de erros de medidas ou erros de topologia utilizando a formulação via MMQP para a EEG-DR. Foram apresentados testes iniciais e efetivos, porém são resultados preliminares e limitados a poucos casos, além de serem direcionados somente para sistemas de transmissão.

### 3 PROCESSAMENTO DE ERROS VIA TESTE GEOMÉTRICO

Visando aliar a representação veraz da topologia do sistema elétrico com o desempenho computacional dos métodos desacoplados, foi proposta a Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida (EEG-DR) (NOGUEIRA et al., 2018) (NOGUEIRA, 2019).

#### 3.1 FORMULAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS GENERALIZADA DESACOPLADA RÁPIDA

Na EEG-DR o fluxo de potência ativa e reativa através das chaves e disjuntores são incluídas como variáveis de estado, e, considerando o desacoplamento, os vetores são dados por (NOGUEIRA et al., 2018) (NOGUEIRA, 2019):

$$x^A = \begin{bmatrix} \theta \\ t \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$x^R = \begin{bmatrix} V \\ u \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

onde:

$t$  é o vetor de fluxo de potência ativa através dos ramos chaveáveis;

$u$  é o vetor de fluxo de potência reativa através dos ramos chaveáveis.

Na formulação do MMQP via método desacoplado da EE, as informações referentes aos status dos disjuntores são inseridas como pseudomedidas operacionais, denotadas pelo subscrito  $p$ . Dessa forma, representa-se os status aberto ou fechado da seguinte maneira:

- Dispositivo aberto:

$$t_{kl} = 0 \quad (3.3)$$

$$u_{kl} = 0 \quad (3.4)$$

onde:

$t_{kl}$  representa o fluxo de potência ativa através do dispositivo conectado entre os nós  $k - l$ ;

$u_{kl}$  representa o fluxo de potência reativa através do dispositivo conectado entre os nós  $k - l$ .

- Dispositivo fechado:

$$\theta_{kl} = \theta_k - \theta_l = 0 \quad (3.5)$$

$$V_{kl} = V_k - V_l = 0 \quad (3.6)$$

onde:

$\theta_{kl}$  é a diferença angular no ramo chaveável  $k - l$ ;

$V_{kl}$  é a queda de tensão no ramo chaveável  $k - l$ .

Considerando o particionamento conforme a natureza ativa e reativa e conforme medidas (subscrito  $m$ ) e pseudomedidas operacionais (subscrito  $p$ ), tem-se os vetores estendidos:

- Parte ativa:

$$\bar{z}^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_m^A \\ \bar{z}_p^A \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

sendo que:

$$\bar{z}_m^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo}^A \\ \bar{z}_{inj}^A \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$\bar{z}_p^A = \begin{bmatrix} \bar{z}_{\theta_{kl}} \\ \bar{z}_{t_{kl}} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

- Parte reativa:

$$\bar{z}^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_m^R \\ \bar{z}_p^R \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

sendo que:

$$\bar{z}_m^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_{fluxo}^R \\ \bar{z}_{inj}^R \\ \bar{z}_{V_{mag}} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\bar{z}_p^R = \begin{bmatrix} \bar{z}_{V_{kl}} \\ \bar{z}_{u_{kl}} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

onde:

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

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

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

$\bar{z}_{\theta_{kl}}$  e  $\bar{z}_{V_{kl}}$  são os vetores de pseudomedidas operacionais de diferença angular e diferença de potencial nulos (ramos chaveáveis fechados), respectivamente;

$\bar{z}_{t_{kl}}$  e  $\bar{z}_{u_{kl}}$  são os vetores de pseudomedidas operacionais de fluxo de potência nulo ativas e reativas (ramos chaveáveis abertos), respectivamente.

Cabe ressaltar que com a representação das subestações, as equações de injeção de potência sofrem alterações, conforme demonstrado em Monticelli e Garcia (1990), onde entra no equacionamento das funções não-lineares de injeção o conjunto de fluxos de potência através dos ramos chaveáveis que estão conectados à barra em análise.

Aplicando as extensões dos vetores  $h(\cdot)$  e  $x$ , considerando as medidas e pseudomedidas, tem-se a matriz Jacobiana estendida composta por:

$$\bar{H}_{P\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial P_{inj}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial \theta_{kl}}{\partial \theta} & \frac{\partial \theta_{kl}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial t_{kl}}{\partial \theta} & \frac{\partial t_{kl}}{\partial t_{kl}} \end{bmatrix}, \bar{H}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial V_{kl}}{\partial V} & \frac{\partial V_{kl}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial u_{kl}}{\partial V} & \frac{\partial u_{kl}}{\partial u_{kl}} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$\bar{H}_{Q\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial V_{kl}}{\partial \theta} & \frac{\partial V_{kl}}{\partial t_{kl}} \\ \frac{\partial u_{kl}}{\partial \theta} & \frac{\partial u_{kl}}{\partial t_{kl}} \end{bmatrix}, \bar{H}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & \frac{\partial Q_{inj}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & \frac{\partial V_{mag}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial V_{kl}}{\partial V} & \frac{\partial V_{kl}}{\partial u_{kl}} \\ \frac{\partial u_{kl}}{\partial V} & \frac{\partial u_{kl}}{\partial u_{kl}} \end{bmatrix}$$

Como as equações referentes aos dispositivos chaveáveis são lineares, muitas submatrizes da Jacobiana serão compostas por "0" e "±1", resultando em (NOGUEIRA et al., 2018):

$$\bar{H}_{P\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial \theta} & 0; \pm 1 \\ 0; \pm 1 & 0 \\ 0; \pm 1 & 0; \pm 1 \end{bmatrix}, \bar{H}_{PV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial P_{inj}}{\partial V} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

$$\bar{H}_{Q\theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial \theta} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \bar{H}_{QV} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_{fluxo}}{\partial V} & 0 \\ \frac{\partial Q_{inj}}{\partial V} & 0; \pm 1 \\ \frac{\partial V_{mag}}{\partial V} & 0 \\ 0; \pm 1 & 0 \\ 0 & 0; \pm 1 \end{bmatrix}$$

Nota-se que a extensão da matriz Jacobiana na EEG-DR impacta linearmente somente as submatrizes  $\bar{H}_{P\theta}$  e  $\bar{H}_{QV}$ . A matriz ganho estendida pode ser determinada através da substituição da matriz Jacobiana estendida (3.13) em (2.12):

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} \bar{G}_{P\theta} & \bar{G}_{PV} \\ \bar{G}_{Q\theta} & \bar{G}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Nogueira et al. (2018) concluiu que a adição das pseudomedidas operacionais e novas equações advindas da modelagem no nível de subestação não precariza o desacoplamento da matriz Jacobiana, e portanto, da matriz ganho também. Com isso, Nogueira et al. (2018) apresentou as versões de desacoplado no modelo e no algoritmo para a EEG-DR.

### 3.1.1 EEG-DR no modelo

As simplificações na matriz Jacobiana estendida são realizadas durante o processo iterativo, onde as submatrizes fora da diagonal principal ( $\bar{H}_{PV}$  e  $\bar{H}_{Q\theta}$ ) são desprezadas:

$$\bar{H} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{H}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

As simplificações efetuadas na Jacobiana afetam os dois lados da Equação Normal (2.10), sendo assim, a EEG-DR no modelo (indicadas pelo subscrito  $dm$ ) se dá pelas iterações dos seguintes sistemas lineares, divididos em subproblemas de natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ):

- Subproblema ativo:

$$\bar{G}_{dm}^{P\theta} = \bar{H}_{P\theta}^T (R_m^A)^{-1} \bar{H}_{P\theta} \quad (3.17)$$

$$\bar{T}_{dm}^{P\theta} = \bar{H}_{P\theta}^T (R_m^A)^{-1} [\bar{z}^A - \bar{h}^A] \quad (3.18)$$

e a resolução do subproblema ativo é dado por:

$$\bar{G}_{dm}^A \Delta \hat{x}_A^{k+1} = \bar{T}_{dm}^{P\theta} \quad (3.19)$$

- Subproblema reativo:

$$\bar{G}_{dm}^{QV} = H_{QV}^T (R_m^R)^{-1} H_{QV} \quad (3.20)$$

$$T_{dm}^{QV} = H_{QV}^T (R_m^R)^{-1} [\bar{z}^R - \bar{h}^R] \quad (3.21)$$

e a resolução do subproblema reativo é dado por:

$$\bar{G}_{dm}^{QV} \Delta \hat{x}_R^{k+1} = T_{dm}^{QV} \quad (3.22)$$

Assim como na versão da EE-DR no modelo, na modelagem barra-ramo, constatou-se que na EEG-DR no modelo, no nível de subestação, a solução não é exata porém muito próxima, desde que em sistema de transmissão com altas razões  $X/R$  (NOGUEIRA et al., 2018) (NOGUEIRA, 2019).

### 3.1.2 EEG-DR no algoritmo

Já na EEG-DR no algoritmo, as aproximações são realizadas apenas na matriz ganho, afetando um lado da Equação Normal (2.10). Assim como na EE-DR no algoritmo na modelagem barra-ramo, no nível de subestação, essas aproximações não afetam a solução final em comparação com a solução da EEG sem o desacoplamento. As submatrizes  $\bar{G}_{PV}$  e  $\bar{G}_{Q\theta}$  são negligenciadas, levando à:

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} \bar{G}_{P\theta} & 0 \\ 0 & \bar{G}_{QV} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

A EEG-DR no algoritmo (indicadas pelo subscrito  $da$ ) se dá pelas iterações dos seguintes sistemas lineares:

- Subproblema ativo:

$$\bar{G}_{da}^{P\theta} = \bar{H}_{P\theta}^T (R^A)^{-1} \bar{H}_{P\theta} + \bar{H}_{Q\theta}^T (R^R)^{-1} \bar{H}_{Q\theta} \quad (3.24)$$

$$\bar{T}_{da}^{P\theta} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{P\theta}^T \\ \bar{H}_{Q\theta}^T \end{bmatrix} R^{-1} [\bar{z} - \bar{h}] \quad (3.25)$$

e a convergência do subproblema ativo é dado por:

$$G_{da}^{P\theta} \Delta \hat{x}_A^{k+1} = \bar{T}_{da}^{P\theta} \quad (3.26)$$

- Subproblema reativo:

$$\bar{G}_{da}^{QV} = \bar{H}_{PV}^T (R^A)^{-1} \bar{H}_{PV} + \bar{H}_{QV}^T (R^R)^{-1} \bar{H}_{QV} \quad (3.27)$$

$$\bar{T}_{da}^{QV} = \begin{bmatrix} \bar{H}_{PV}^T \\ \bar{H}_{QV}^T \end{bmatrix} R^{-1} [\bar{z} - \bar{h}] \quad (3.28)$$

e a convergência do subproblema reativo é dado por:

$$G_{da}^{QV} \Delta \hat{x}_R = \bar{T}_{da}^{QV} \quad (3.29)$$

### 3.2 TESTE GEOMÉTRICO NA EEG-DR

Na EEG-DR, em função da estimação generalizada, os vetores dos resíduos são calculados conforme as medidas (subscrito  $m$ ) e pseudomedidas dos status dos disjuntores (subscrito  $p$ ). Além disso, seguem o particionamento conforme a natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ) em função do desacoplamento, onde os cálculos dos resíduos normalizados ( $r^N$ ) correspondentes de cada medida/pseudomedida “ $i$ ” são dados por:

$$\bar{r}_{m_i}^{A N} = \frac{|\bar{r}_{m_i}^A|}{\sqrt{\Omega_{m_{ii}}^A}} \quad (3.30)$$

$$\bar{r}_{p_i}^{A N} = \frac{|\bar{r}_{p_i}^A|}{\sqrt{\Omega_{p_{ii}}^A}} \quad (3.31)$$

$$\bar{r}_{m_i}^{R N} = \frac{|\bar{r}_{m_i}^R|}{\sqrt{\Omega_{m_{ii}}^R}} \quad (3.32)$$

$$\bar{r}_{p_i}^{R N} = \frac{|\bar{r}_{p_i}^R|}{\sqrt{\Omega_{p_{ii}}^R}} \quad (3.33)$$

onde:

$\bar{r}_{m_i}^A$  e  $\bar{r}_{m_i}^R$  são os resíduos da medida convencional ativa e reativa “ $i$ ”, respectivamente;

$\bar{r}_{p_i}^A$  e  $\bar{r}_{p_i}^R$  são os resíduos da pseudomedida ativa e reativa “ $i$ ”, respectivamente;

$\Omega_{m_{ii}}^A$  e  $\Omega_{m_{ii}}^R$  são os valores da diagonal “ $ii$ ” da matriz covariância, associado à medida “ $i$ ” ativa e reativa, respectivamente;

$\Omega_{p_{ii}}^A$  e  $\Omega_{p_{ii}}^R$  são os valores da diagonal “ $ii$ ” da matriz covariância, associado à pseudomedida “ $i$ ” ativa e reativa, respectivamente.

O mesmo particionamento é realizado na matriz de covariância dos resíduos associados às medidas (subescrito  $m$ ) e pseudomedidas (subescrito  $p$ ) conforme a natureza ativa (sobrescrito  $A$ ) e reativa (sobrescrito  $R$ ):

$$\Omega^A = \begin{bmatrix} \Omega_m^A & \Omega_p^A \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$\Omega^R = \begin{bmatrix} \Omega_m^R & \Omega_p^R \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

em que:

$$\Omega^A = S^A R^A \quad (3.36)$$

$$\Omega^R = S^R R^R \quad (3.37)$$

sendo  $S_A$  e  $S_R$  as matrizes de Sensibilidade dos resíduos, calculadas a partir de (2.56):

$$S^A = 1 - \overline{H}_{P\theta}^T \overline{G}_{P\theta}^{-1} \overline{H}_{P\theta} R^{A-1} \quad (3.38)$$

$$S^R = 1 - \overline{H}_{QV}^T \overline{G}_{QV}^{-1} \overline{H}_{P\theta} R^{R-1} \quad (3.39)$$

Após o cálculo dos resíduos normalizados particionados, formam-se os conjuntos suspeitos contendo todos os resíduos maiores que o limiar pré-determinado, o qual neste caso adotou-se 3,0. Este conjunto suspeito também é dividido conforme o tipo da informação e natureza da grandeza para então calcular-se os cossenos associados à cada conjunto (NOGUEIRA, 2019):

$$\cos\theta_m^A = \sqrt{\frac{(r_m^{AT} R_m^A \Omega_m^A)(\Omega_m^A R_m^A \Omega_m^A)(\Omega_m^{AT} R_m^A r_m^A)}{r_m^{AT} R_m^A r_m^A}} \quad (3.40)$$

$$\cos\theta_p^A = \sqrt{\frac{(r_p^{AT} R_p^A \Omega_p^A)(\Omega_p^A R_p^A \Omega_p^A)(\Omega_p^{AT} R_p^A r_p^A)}{r_p^{AT} R_p^A r_p^A}} \quad (3.41)$$

$$\cos\theta_m^R = \sqrt{\frac{(r_m^{RT} R_m^R \Omega_m^R)(\Omega_m^R R_m^R \Omega_m^R)(\Omega_m^{RT} R_m^R r_m^R)}{r_m^{RT} R_m^R r_m^R}} \quad (3.42)$$

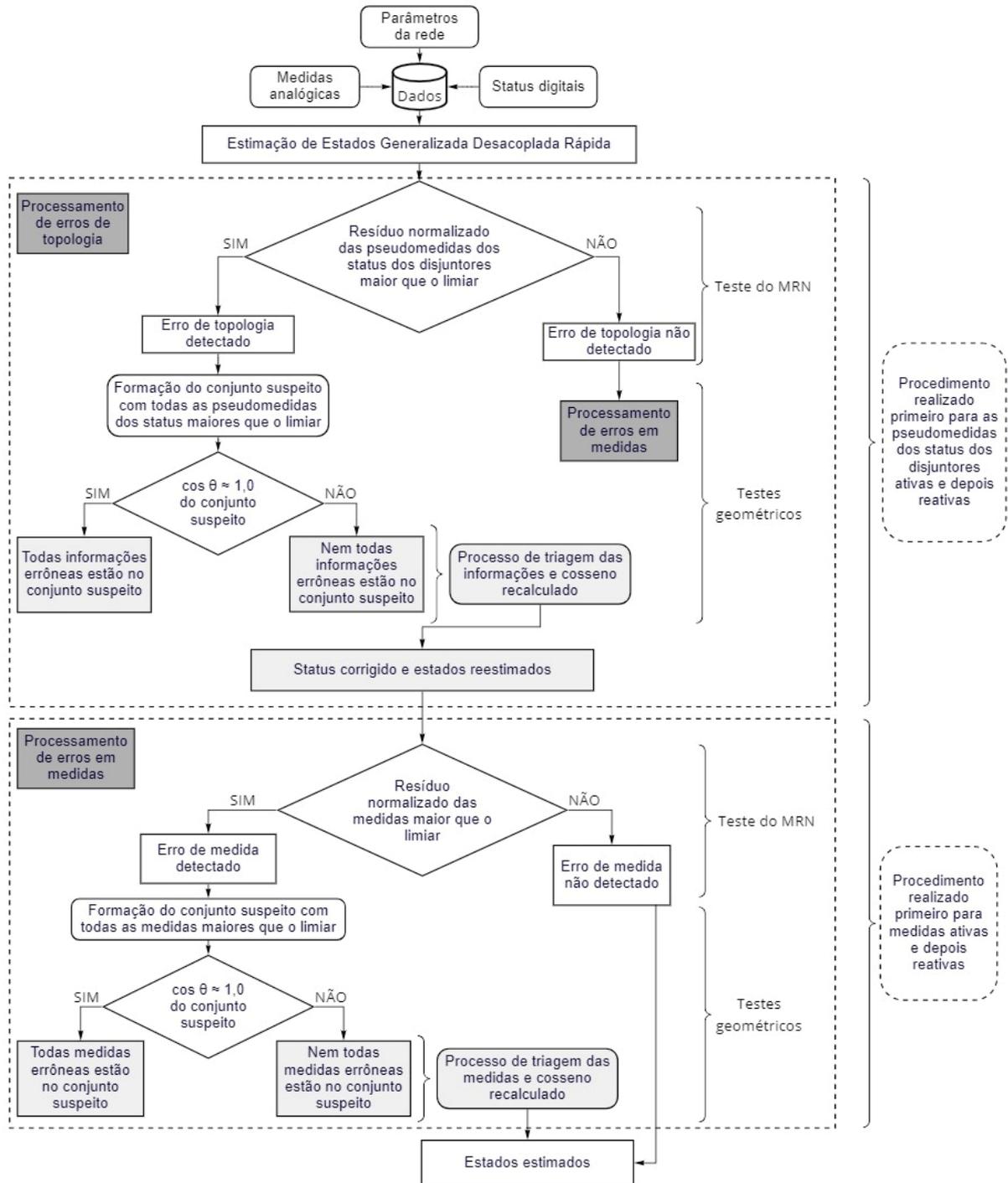
$$\cos\theta_p^R = \sqrt{\frac{(r_p^{RT} R_p^R \Omega_p^R)(\Omega_p^R R_p^R \Omega_p^R)(\Omega_p^{RT} R_p^R r_p^R)}{r_p^{RT} R_p^R r_p^R}} \quad (3.43)$$

Através do valor do cosseno de  $\theta$  é possível identificar a origem da anomalia sem a necessidade de reestimções. Caso o valor do cosseno seja muito próximo de 1,0, é possível afirmar que todas as informações errôneas estão dentro do conjunto suspeito. As informações são retiradas uma por vez e o cosseno do conjunto suspeito é recalculado. O procedimento do teste geométrico e triagem das informações do conjunto suspeito pode ser descrito da seguinte maneira:

1. Formação dos conjuntos suspeitos com as pseudomedidas dos status dos disjuntores (ativas (3.31) e reativas (3.33)) e medidas convencionais (ativas (3.30) e reativas (3.32)) associadas aos resíduos normalizados maiores que o limiar determinado;
2. Cálculo do cosseno de  $\theta$  dos conjuntos suspeitos das pseudomedidas dos status dos disjuntores (ativas (3.41) e reativas (3.43)) e medidas convencionais (ativas (3.40) e reativas (3.42));
3. Cosseno com valor próximo de 1,0: todas as informações errôneas estão dentro do seu respectivo conjunto suspeito;
4. Retira-se uma informação e recalcula-se o cosseno;
5. Caso o valor do cosseno continue próximo de 1,0: a informação retirada não é errônea, indicando que todas as informações errôneas estão contidas no conjunto suspeito. Retira-se definitivamente essa informação do conjunto e recalcula-se o cosseno;
6. Se o valor do cosseno se afastar de 1,0: significa que nem todas as informações errôneas estão dentro do conjunto suspeito, ou seja, a informação retirada é uma das errôneas. Coloca-se novamente essa informação no conjunto e recalcula-se o cosseno.

O algoritmo do processamento de erros simultâneos primeiro verifica a presença de erros na topologia, através dos resíduos das pseudomedidas dos status dos disjuntores ativas e reativas. Se os resíduos normalizados associados às pseudomedidas forem maiores que o limiar, forma-se o conjunto suspeito e parte-se para os teste geométricos. O erro de topologia é corrigido, os estados são reestimados e dá-se início ao processamento de erros nas medidas. Caso não haja resíduos das pseudomedidas maiores que o limiar, parte-se para a detecção de erros nas medidas convencionais, ativas e reativas, respectivamente. Em seguida, têm-se os testes geométricos para identificação da origem do erro. O esquema de processamento de erros na EEG-DR implementado, considerando os testes geométricos, pode ser observado a seguir (FIGURA 3).

FIGURA 3 – ESQUEMA DO PROCESSAMENTO DE ERROS NA EEG-DR VIA TESTES GEOMÉTRICOS



FONTE: a Autora (2022)

### 3.3 PROCESSAMENTO DE ERROS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Uma das principais barreiras que impedem o uso dos métodos desacoplados no processo de EESD é a baixa relação  $X/R$ , decorrente das características dos parâmetros da rede. A fim de ajustar essa relação, aplica-se a normalização complexa por unidade ( $cpu$ ), a qual permite a aplicação do desacoplamento nos fluxos de potência em sistemas de distribuição (TORTELLI et al., 2015). Nesta técnica, primeiro define-se uma base de potência complexa:

$$\dot{S}_{base} = |S_{base}|e^{-j\phi_{base}} \quad (3.44)$$

sendo  $\phi_{base}$  o ângulo da base.

As tensões de base são mantidas reais e definidas conforme o tradicional sistema por unidade ( $pu$ ):

$$\dot{V}_{base} = |V_{base}|e^{-j0} = V_{base} \quad (3.45)$$

A impedância de base é obtida através das equações (3.44) e (3.45):

$$\dot{Z}_{base} = \frac{\dot{V}_{base}^2}{\dot{S}_{base}^*} = |\dot{Z}_{base}|e^{-j\phi_{base}} \quad (3.46)$$

Sendo assim, as impedâncias em  $cpu$  são determinadas por:

$$\dot{Z}_{cpu} = \frac{R_{\Omega} + jX_{\Omega}}{\dot{Z}_{base}} = \frac{|\dot{Z}_{\Omega}| \cdot e^{j\theta}}{|\dot{Z}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{Z}_{pu}|e^{j(\theta+\phi_{base})} \quad (3.47)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de fase original da impedância.

Apesar da magnitude da impedância normalizada ser a mesma independente da normalização adotada ( $pu$  ou  $cpu$ ), na normalização complexa o ângulo da impedância varia conforme o ângulo de base, evidenciado na Equação (3.47). As resistências ( $R_{cpu}$ ) e reatâncias ( $X_{cpu}$ ) normalizadas podem ser expressas por:

$$R_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}|\cos(\theta + \phi_{base}) \quad (3.48)$$

$$X_{cpu} = |\dot{Z}_{pu}|\sin(\theta + \phi_{base}) \quad (3.49)$$

Ou seja, a relação  $X/R$  do sistema pode ser ajustada em função de um ângulo de base adequado, conforme demonstrado em Tortelli et al. (2015):

$$\frac{X_{cpu}}{R_{cpu}} = \tan(\theta + \phi_{base}) \quad (3.50)$$

Através dessas normalizações é possível obter os novos parâmetros da rede e injeções de potência ativa e reativa normalizadas (TORTELLI et al., 2015):

$$\dot{S}_{cpu} = \frac{|\dot{S}_{VA}|e^{j\theta}}{|\dot{S}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{S}_{pu}|e^{j(\theta+\phi_{base})} \quad (3.51)$$

$$\dot{S}_{cpu} = |P_{cpu} + jQ_{cpu}|e^{j(\theta+\phi_{base})} \quad (3.52)$$

As injeções de potência nas barras e os fluxos nos ramos são obtidas através de:

$$P_{cpu} = |\dot{S}_{cpu}|\cos(\theta + \phi_{base}) \quad (3.53)$$

$$Q_{cpu} = |\dot{S}_{cpu}|\sen(\theta + \phi_{base}) \quad (3.54)$$

Considerando a corrente de base como:

$$\dot{I}_{base} = \frac{V_{base}}{|\dot{Z}_{base}|e^{-j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{base}|e^{j\phi_{base}} \quad (3.55)$$

tem-se a corrente normalizada:

$$\dot{I}_{cpu} = \frac{|\dot{I}_A|e^{j\beta}}{|\dot{I}_{base}|e^{j\phi_{base}}} = |\dot{I}_{pu}|e^{j(\beta-\phi_{base})} \quad (3.56)$$

sendo  $\beta$  o ângulo de fase original da corrente.

A tensão normalizada pode ser obtida através da aplicação das equações (3.44) e (3.52) em  $\dot{S} = \dot{V} \dot{I}^*$ :

$$\dot{V}_{cpu} = \frac{|\dot{S}_{pu}|e^{j(\theta+\phi_{base})}}{|\dot{I}_{pu}|e^{-j(\beta-\phi_{base})}} = |V_{pu}|e^{j(\theta+\beta)} = \dot{V}_{pu} \quad (3.57)$$

A equação (3.57) evidencia que os estados do sistema são equivalentes, em  $pu$  e  $cpu$ , ou seja:

$$V_{cpu} \equiv V_{pu} \quad (3.58)$$

$$\theta_{cpu} \equiv \theta_{pu} \quad (3.59)$$

O ângulo de base é determinado por (TORTELLI et al., 2015):

$$\phi_{base} = \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_{avg} + \gamma_{avg}}{2} \right) (1 + \epsilon) \quad (3.60)$$

sendo  $\alpha_{avg}$  e  $\gamma_{avg}$  a relação média  $X/R$  (em radianos) e a média entre a relação  $X/R$  máxima e mínima (em radianos), respectivamente. Esses valores são calculados da seguinte maneira:

$$\alpha_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{n_l} \tan^{-1} \frac{X_i}{R_i}}{N_l} \quad (3.61)$$

$$\gamma_{avg} = \frac{\tan^{-1} \left( \frac{X_i}{R_i} \right)_{max} + \tan^{-1} \left( \frac{X_i}{R_i} \right)_{min}}{2} \quad (3.62)$$

Além disso, o índice de fator de carregamento,  $\epsilon$  é calculado por:

$$\epsilon = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_b} \cos(\tan^{-1} \frac{Q_i}{P_i})}{N_b} \quad (3.63)$$

onde:

$n_b$  é o número de barras do sistema;

$n_l$  é o número de linhas do sistema;

$X_i$  é a reatância da linha  $i$ ;

$R_i$  é a resistência da linha  $i$ ;

$P_i$  é a injeção de potência ativa na barra  $i$ ;

$Q_i$  é a injeção de potência reativa na barra  $i$ .

Através do ângulo de base os parâmetros de entrada do sistema são normalizados, elevando a relação  $X/R$ , garantido a aplicação dos métodos desacoplados.

Para a aplicação da normalização complexa na EESD, além de envolver modificações nos parâmetros da rede e injeções de potências, as medidas do estimador também devem ser convertidas (NOGUEIRA, 2019):

$$z_m^{cpu} = \frac{z_m}{z_{m_{base}}} \quad (3.64)$$

onde:

$z_{m_{base}}$  é o vetor do valor de base das grandezas medidas;

$z_m^{cpu}$  é o vetor das grandezas em  $cpu$ .

Portanto, com a normalização das medidas pode-se implementar o método desacoplado rápido na EESD e o processamento de erros via testes geométricos.

## 4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados provenientes das simulações de diferentes sistemas-teste com o objetivo de consolidar o uso dos testes geométricos para a identificação de erros em medidas e de topologia na EEG-DR em sistemas de transmissão. Para isso, foi implementado e refinado em um programa computacional no software Matlab<sup>®</sup> um algoritmo habilitado para o processamento de erros. A ferramenta utilizada para as simulações engloba a estimação de estados generalizada desacoplada no modelo (EEG-DR no modelo), apresentada no Capítulo 3, o teste do MRN para a detecção de anomalias e o teste geométrico para formação do conjunto suspeito com informações errôneas e identificação da origem do erro.

Os testes iniciais foram realizados em um sistema-teste com 5 barras no modelo barra-ramo da rede. Em seguida, em um sistema com 4 barras adaptado de Irving (2009) modelado no nível de subestação. Por fim, para consolidação do uso dos testes geométricos na EEG-DR em sistemas de transmissão, utilizou-se um sistema-teste IEEE 30 barras modelado no nível de subestação.

Foram realizadas simulações em um sistema de distribuição com 141 barras através da implementação da *cpu* apresentada no Capítulo 3, visando investigar o desempenho dos métodos desacoplados e processamento de erros em medidas via testes geométricos. Cabe ressaltar que o desempenho dos testes geométricos no processamento de erros na EESD desacoplada rápida, quando combinada com a normalização complexa, está sendo pioneiramente investigada nesse trabalho. Na TABELA 1 pode-se observar quais os sistemas de transmissão e distribuição simulados e a descrição dos mesmos.

TABELA 1 – CASOS SIMULADOS: SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Processamento de Erros em Sistemas de Transmissão e Distribuição		
Caso	Sistema	Descrição
Caso A	ST: 5 barras	6 ramos convencionais
Caso B	ST: 4 barras adaptado	3 ramos convencionais e 1 ramo chaveável
Caso C	ST: IEEE 30 barras	41 ramos convencionais e 9 ramos chaveáveis
Caso D	SD: 141 barras	140 ramos convencionais

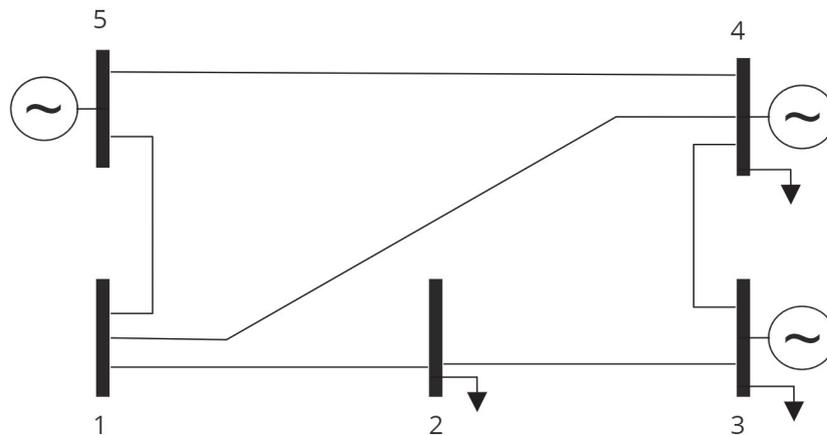
FONTE: A autora (2022)

As simulações e resultados da ferramenta de processamento de erros foram divididas em sistemas de transmissão e distribuição.

#### 4.1 PROCESSAMENTO SIMULTÂNEO VIA EEG-DR E TESTES GEOMÉTRICOS EM ST

Primeiramente, o teste geométrico foi replicado para um sistema-teste de 5 barras na modelagem barra-ramo, conforme representado na FIGURA 4. As características do sistema foram retiradas do banco de dados do Matpower (LI; BO, 2010). Os parâmetros de todos os sistemas de transmissão utilizados nas simulações podem ser consultados no ANEXO 1.

FIGURA 4 – SISTEMA-TESTE 5 BARRAS: MODELAGEM BARRA-RAMO



FONTE: a Autora (2022)

Neste sistema foram simulados os seguintes erros simples e múltiplos em medidas na EEG-DR no modelo, conforme apresentado na TABELA 2:

TABELA 2 – CASO A: ERROS EM MEDIDAS NO SISTEMA-TESTE 5 BARRAS

Caso A1	Erro simples: fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ )
Caso A2	Erro simples: injeção de potência reativa ( $z_1^R$ )
Caso A3	Erros múltiplos: fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ) e fluxo de potência reativa ( $z_{1-2}^R$ )

FONTE: A autora (2022)

Previamente ao processamento os erros grosseiros simples e múltiplos, o programa realizou a rotina em duas situações: sem nenhum erro (com medidas perfeitas) e com erros aleatórios. Em ambos os casos os valores estimados obtidos foram iguais ou muito próximos aos valores gerados pelo fluxo de potência e nenhum resíduo normalizado apresentou valor maior que o limiar 3,0. O plano de medição para este sistema engloba as medidas de fluxo de potência ativa e reativa em todos os ramos, injeções de potência ativa e reativa em todas as barras, assim como magnitude de

tensão. Os resultados foram divididos conforme a etapa de detecção e identificação dos erros.

Em todos os cenários simulados no caso A, fez-se a análise dos resíduos desacoplados das medidas, entre a parte ativa e reativa. Todas as medidas associadas aos resíduos normalizados maiores que o limiar estabelecido em 3,0 são selecionados para compor o conjunto suspeito, respeitando a natureza ativa e reativa, ou seja, formando um conjunto suspeito de medidas ativas e outro conjunto suspeito de medidas reativas. Em seguida, os testes geométricos são aplicados. Os resultados obtidos foram separados na TABELA 3 e TABELA 4.

TABELA 3 – DETECÇÃO DE ERROS VIA MRN: CASO A

Caso A1		Caso A2		Caso A3	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
$z_{1-2}^A$	297,7561	$z_1^R$	208,9013	$z_{1-2}^A$	297,7567
$z_{1-2}^{Ireal}$	4,0823	$z_{1-2}^{Iimg}$	3,1103	$z_{1-2}^{Ireal}$	4,1080
-	-	-	-	$z_{1-2}^R$	208,8995
-	-	-	-	$z_{1-2}^{Iimg}$	3,0739

FONTE: A autora (2022)

TABELA 4 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO A

Caso A1		Caso A2		Caso A3	
Conjunto Suspeito	$\cos \theta$	Conjunto Suspeito	$\cos \theta$	Conjunto Suspeito	$\cos \theta$
$z_{1-2}^A, z_{1-2}^{Ireal}$	1,0000	$z_1^R, z_{1-2}^{Iimg}$	1,0000	$z_{1-2}^A, z_{1-2}^{Ireal}$	1,0000
$z_{1-2}^{Ireal}$	0,3819	$z_{1-2}^{Iimg}$	0,3904	$z_{1-2}^{Ireal}$	0,3819
-	-	-	-	$z_{1-2}^R, z_{1-2}^{Iimg}$	1,0000
-	-	-	-	$z_{1-2}^{Iimg}$	0,3904

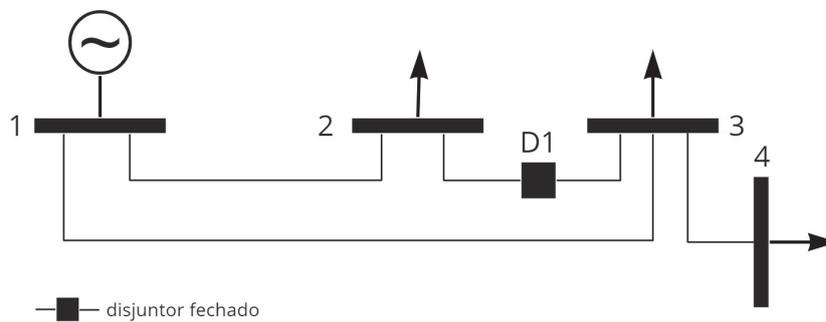
FONTE: A autora (2022)

As medidas contidas no conjunto suspeito são retiradas temporariamente, uma a uma, para a verificação do valor do cosseno deste conjunto. No caso A1, em um primeiro momento o cosseno resulta em 1,0, indicando que a medida errônea está dentro do conjunto suspeito. Quando a medida referente ao fluxo de potência ativa no ramo convencional ( $z_{1-2}^A$ ) é retirada, o valor do cosseno diminui significativamente para 0,3819, apontando então que a anomalia de fato está na medida que foi retirada, visto que é um erro simples. O mesmo procedimento é replicado nos casos A2 e A3. No caso A3 primeiro é analisada a parte ativa do problema. Conforme mostrado na TABELA 4, analisa-se o cosseno do conjunto suspeito das medidas ativas. Ao retirar a medida  $z_{1-2}^A$ , o valor do cosseno do conjunto suspeito das medidas ativas atinge o valor de 0,3819. Segue-se para o conjunto suspeito das medidas reativas e ao retirar  $z_{1-2}^R$

o valor do cosseno chega em 0,3904. Sendo assim, identificou-se as duas medidas errôneas.

Já no caso B, representado na FIGURA 5, uma adaptação do sistema apresentado em Irving (2009), a modelagem do sistema é no nível de subestação, permitindo a simulação de erros simples e múltiplos em medidas, além de erro na topologia. Neste sistema com 4 barras e 1 disjuntor foram realizados os testes descritos na TABELA 5. O plano de medição neste sistema abrange os fluxos de potência ativa e reativa (em uma extremidade), as injeções de potência ativa e reativa e tensões em todas as barras.

FIGURA 5 – SISTEMA-TESTE 4 BARRAS: NÍVEL DE SUBESTAÇÃO



FONTE: a Autora (2022)

TABELA 5 – CASO B: ERROS EM MEDIDAS E TOPOLOGIA NO SISTEMA-TESTE 4 BARRAS

Caso B1	Erro simples em medida: fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ )
Caso B2	Erro múltiplo em medida: fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ) e de potência reativa ( $z_{1-2}^R$ )
Caso B3	Erro de topologia: erro de exclusão ( $D_1$ )
Caso B4	Erro simultâneo: medida ( $z_{1-2}^A$ ) e topologia ( $D_1$ )

FONTE: A autora (2022)

No caso B1 o erro simulado foi na medida de fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ), sendo seu valor verdadeiro 0,9300 pu e simulado 1,8601 pu. No caso B2 os erros foram nas medidas de fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ) e reativa ( $z_{1-2}^R$ ). Para estes casos, considerou-se a topologia correta. Os resultados obtidos para os erros grosseiros em medidas, do caso B1 e B2, para as etapas de detecção e identificação de erros podem ser analisadas nas TABELA 6 e TABELA 7.

Nos erros grosseiros simples e múltiplos em medidas convencionais dos casos B1 e B2, respectivamente, nota-se o mesmo desempenho e eficiência em detectar e identificar os erros apresentados no caso A, quando a topologia é livre de erros. No caso B1 ao retirar a medida  $z_{1-2}^A$  referente ao fluxo de potência ativa, o valor de cosseno

TABELA 6 – DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS VIA MRN: CASOS B1 E B2

Caso B1		Caso B2	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
$z_{1-2}^A$	116,2536	$z_{1-2}^A$	116,2539
-	-	$z_{3-4}^{Ireal}$	15,1307
-	-	$z_{1-2}^R$	80,4466

FONTE: A autora (2022)

TABELA 7 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS EM MEDIDAS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASOS B1 E B2

Caso B1		Caso B2	
Conjunto Suspeito	$\cos \theta$	Conjunto Suspeito	$\cos \theta$
$z_{1-2}^A$	1,0000	$z_{1-2}^A$	1,0000
-	0	-	0
-	-	$z_{1-2}^R, z_{3-4}^{Iimg}$	1,0000
-	-	$z_{3-4}^{Iimg}$	0

FONTE: A autora (2022)

chega à zero, indicando que a medida errada é o fluxo de potência ativo indicado. É possível chegar nesta conclusão pois há somente um erro no conjunto suspeito das medidas ativas. No caso B2 nota-se que quando a medida ativa  $z_{1-2}^A$  é retirada do conjunto suspeito de natureza ativa, o valor de cosseno zero, o mesmo acontecendo na medida reativa  $z_{1-2}^R$  quando é retirado do conjunto suspeito reativo.

No caso B3 simulou-se o erro de topologia de exclusão, no qual o disjuntor está originalmente fechado mas é simulado como aberto, retirando a linha de transmissão da barra 2 para a barra 3 de operação. Os erros nas pseudomedidas ativas, e depois reativas, associadas aos status errôneo do disjuntor  $D_1$  são inicialmente detectadas através dos resíduos relacionados ao fluxo de potência ativa nula ( $t_{2-3}$ ), com resíduo de 66,1524, e fluxo de potência reativa nula ( $u_{2-3}$ ), com resíduo de 50,4944. O conjunto suspeito das pseudomedidas ativas e reativas é composto apenas por  $t_{2-3}$  e  $u_{2-3}$ , respectivamente. Nesse caso, obteve-se os seguintes resultados nos testes geométricos mostrados na TABELA 8:

TABELA 8 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS DE TOPOLOGIA VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO B3

Disjuntor	Status	Simulado	$\cos\theta_p^A$	$\cos\theta_m^A$	$\cos\theta_p^R$	$\cos\theta_m^R$
$D_1$	Fechado	Aberto	1	0,8615	1	0,8523

FONTE: A autora (2022)

Os subscritos  $p$  e  $m$  na TABELA 8 indicam os conjuntos suspeitos referentes às pseudomedidas associadas aos status dos disjuntores e às medidas convencio-

nais, respectivamente. Os sobrescritos  $A$  e  $R$  indicam a natureza ativa e reativa das grandezas.

Nota-se que o erro de topologia afeta também os resíduos das medidas, conforme apresentado na TABELA 9, fazendo com que seja formado um conjunto suspeito com as medidas convencionais, porém não são identificadas como erradas, conforme indica o valor do cosseno das medidas convencionais ativas ( $\cos\theta_m^A$ ) e reativas ( $\cos\theta_m^R$ ) na TABELA 8.

TABELA 9 – RESÍDUOS DAS MEDIDAS ATIVAS E REATIVAS: CASO B3

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
$z_2^A$	46,7800	$z_2^R$	35,7051
$z_3^A$	46,7745	$z_3^R$	35,7050

FONTE: A autora (2022)

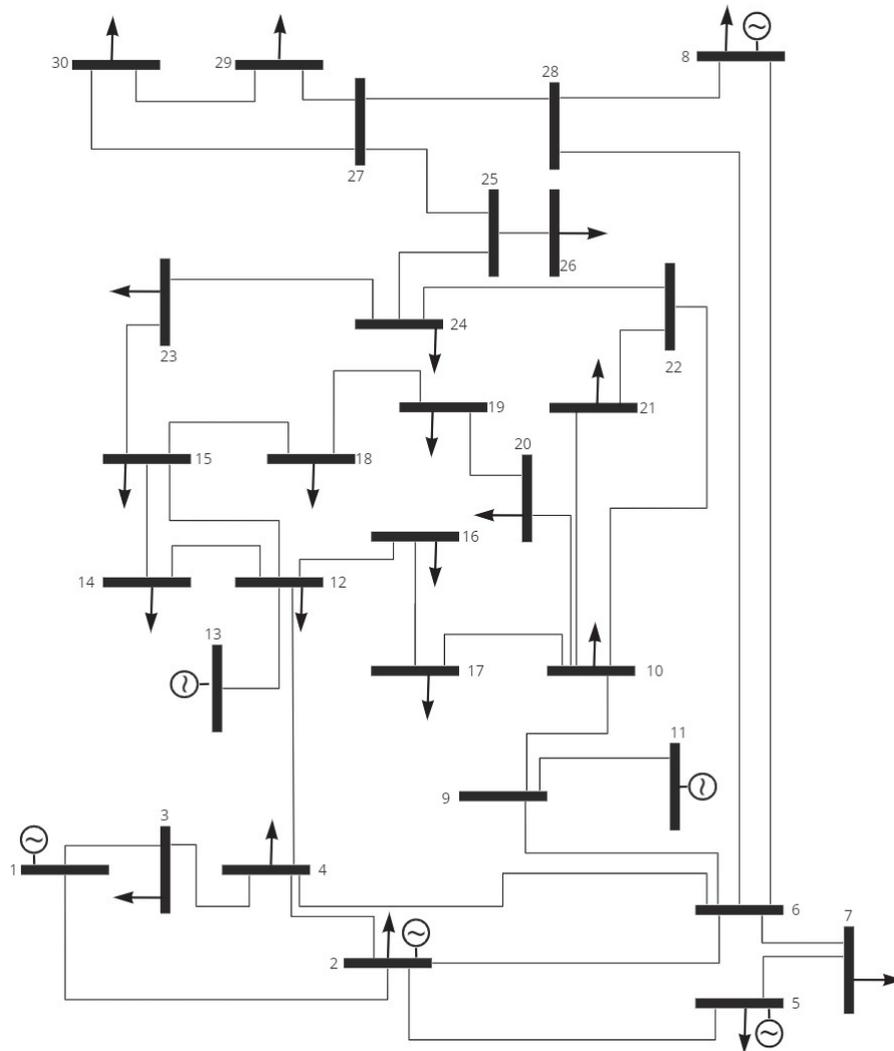
Já para identificação do erro de topologia, o fluxo de potência ativa e reativa nula (disjuntor aberto) do ramo chaveável contendo o disjuntor  $D_1$  são indicadas como errôneas. Após a exclusão dessas pseudomedidas do conjunto suspeito, o valor do cosseno atinge 0, indicando, então, que o status do disjuntor estava errado. Chega-se nessa conclusão pelo fato de ter-se apenas uma única informação que compõe o conjunto suspeito ativo e outra que compõe o conjunto reativo.

Por fim, no caso B4, simulou-se erros simultâneos em medida e topologia. Primeiro, verifica-se a presença de anomalias nas pseudomedidas relacionadas aos status dos disjuntores, conforme realizado no caso B3. Com a presença detectada e identificada pelos testes geométricos, corrige-se o status do disjuntor, os estados são reestimados, verifica-se se o sistema está livre de erros de topologia e parte-se para a detecção dos erros em medidas.

A detecção e identificação do erro de topologia de exclusão se deu da mesma forma que foi apresentado no caso B3. A diferença é quando os conjuntos suspeitos das medidas são analisados, notou-se resíduos ativos superiores ao limiar 3,0 e cosseno igual à 1,0, indicando presença de anomalia no conjunto das medidas de natureza ativa. Quando o fluxo de potência ativo ( $z_{1-2}^A$ ) foi retirado do conjunto, o valor do cosseno atingiu 0,8879, identificando então a origem do erro no conjunto ativo de medidas convencionais.

Outro sistema analisado foi o IEEE 30 barras apresentado na FIGURA 6, representando os testes realizados no caso C. Neste caso foram simulados erros grosseiros múltiplos em medidas, erros de topologia e também erros simultâneos em medida e topologia (TABELA 10).

FIGURA 6 – SISTEMA IEEE 30



FONTE: A autora (2022)

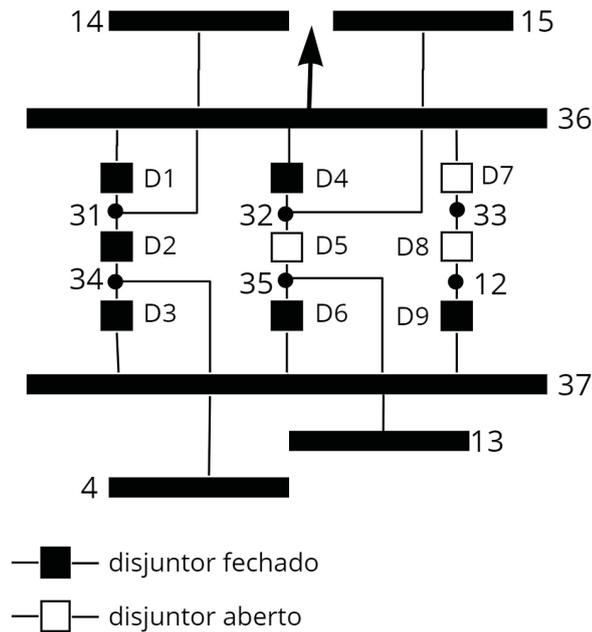
TABELA 10 – CASO C: PROCESSAMENTO DE ERROS NO SISTEMA IEEE 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

Caso C1	Erro múltiplo em medida: fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ) e de potência reativa ( $z_{2-5}^R$ )
Caso C2	Erro de topologia: erro de exclusão ( $D_9$ )
Caso C3	Erros simultâneos: medida (potência reativa ( $z_{2-5}^R$ ) e topologia (exclusão no $D_9$ ))

FONTE: A autora (2022)

No sistema apresentando na FIGURA 6, parte dele foi modelado no nível de subestação, conforme apresentando em detalhes na FIGURA 7. O sistema em questão possui 50 ramos, dos quais 9 são chaveáveis, e 37 barras.

FIGURA 7 – SUBESTAÇÃO REPRESENTADA NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO DO SISTEMA IEEE 30 BARRAS



FONTE: A autora (2022)

O plano de medição utilizado no caso C é composto pelo fluxo de potência ativa e reativa nos dois extremos, injeção de potência ativa e reativa em todas as barras e também a magnitude de tensão em todas elas. Assim como os sistemas anteriores, as informações referentes ao sistema constam no ANEXO 1.

No caso C1 foram simulados erros simples em medidas convencionais, pressuindo que a topologia do sistema é correta. Assim como apresentado nos sistemas teste mais simples e menores, no sistema de 30 barras no nível de subestação obteve-se o mesmo desempenho dos testes geométricos na identificação de erros simples. Também foram realizadas simulações com erros múltiplos em medidas convencionais. As medidas foram desacopladas conforme a natureza ativa e reativa, o teste do MRN foi aplicado e os resultados da detecção de erros múltiplos são apresentados na TABELA 11.

TABELA 11 – DETECÇÃO DE ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS VIA MRN: CASO C1

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Medida Suspeita	Resíduo	Medida Suspeita	Resíduo
$z_{1-2}^A$	162,9880	$z_{2-5}^R$	32,9557
$z_{1-2}^{I_{real}}$	7,8767	$z_5^{V_{mag}}$	11,4492

FONTE: A autora (2022)

O conjunto suspeito ativo e reativo foi composto pelas medidas apresentadas na TABELA 11 e, em seguida, o teste geométrico foi aplicado em cada conjunto, o qual é apresentado na TABELA 12.

TABELA 12 – IDENTIFICAÇÃO DE ERROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS VIA TESTES GEOMÉTRICOS: CASO C1

Medidas Ativas		Medidas Reativas	
Conjunto Suspeito	$\cos \theta$	Conjunto Suspeito	$\cos \theta$
$z_{1-2}^A, z_{1-2}^{img}$	1,0000	$z_{2-5}^R, z_5^{Vmag}$	1,0000
$z_{1-2}^{img}$	0,3298	$z_5^{Vmag}$	0,2502

FONTE: A autora (2022)

Quando todas as medidas convencionais com resíduos normalizados maiores que o limiar 3,0 estão dentro do conjunto suspeito, o cosseno é 1,0. No conjunto ativo, quando a medida de fluxo de potência ativa ( $z_{1-2}^A$ ) é retirada deste conjunto, o valor do cosseno atinge 0,3298, indicando que a medida errônea é, de fato, a  $z_{1-2}^A$ . Em seguida, o conjunto suspeito das medidas reativas é analisado. Quando a medida de fluxo de potência reativa  $z_{2-5}^R$  sai do conjunto, o cosseno é 0,2502, ou seja, a medida  $z_{2-5}^R$  foi identificada como errada.

No caso C2 simulou-se erro de topologia do tipo exclusão, no qual uma linha que está originalmente em operação é reportada como fora do sistema. O disjuntor  $D_9$  representado na FIGURA 7 foi simulado como aberto e livre de erros grosseiros em medidas convencionais. Os resultados são apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – DETECÇÃO DE ERRO DE TOPOLOGIA VIA MRN: CASO C2

Pseudomedidas Ativas		Pseudomedidas Reativas	
Pseudomedida Suspeita	Resíduo	Pseudomedida Suspeita	Resíduo
$t_{33-12}$	102,7824	$u_{33-12}$	24,7453
$t_{12-37}$	10,4299	$u_{12-37}$	5,3920

FONTE: A autora (2022)

Primeiro, analisa-se a topologia do sistema. Os fluxos de potência ativa ( $t$ ) e reativa ( $u$ ) nulas são detectados como errados, indicando disjuntores abertos, no caso  $D_8$  (entre os nós 12-33) e  $D_9$  (entre 12-37). Em seguida, formou-se o conjunto suspeito contendo essas pseudomedidas e aplicou-se o teste geométrico. Ao retirar a pseudomedida ativa  $t_{12-37}$  ( $D_9$ ), o cosseno ficou em 0,6068. No conjunto suspeito das pseudomedidas reativas, ao retirar  $u_{12-37}$  ( $D_9$ ) o cosseno atingiu 0,3426. Esses resultados apontam que, de fato, o disjuntor  $D_9$  estava com o status errôneo, visto que as pseudomedidas relativas aos fluxos de potência ativa e reativa nulos através do disjuntor foram detectadas e identificadas como erradas.

Nas simulações de erro de topologia, apesar de não conterem erros em medidas convencionais, houveram resíduos maiores que o limiar 3,0 nas medidas convencionais ativas e reativas do sistema, porém, os cossenos foram abaixo de 1,0. Isso reflete o quanto os erros de topologia afetam a rede.

No caso C3 foram realizadas simulações contendo erros simultâneos: erro na medida de fluxo de potência reativa ( $z_{2-5}^R$ ) e erro de topologia ( $D_9$ ). Para ilustrar os resultados do caso C3 fez-se um esquema apresentado na FIGURA 8.

FIGURA 8 – PROCESSAMENTO DE ERROS SIMULTÂNEOS NO SISTEMA 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO: ERRO DE TOPOLOGIA NO CASO C3

PSEUDOMEDIDAS DOS STATUS DOS DISJUNTORES (ERRO DE TOPOLOGIA)				
ATIVA		REATIVA		
DETECÇÃO DE ERRO	Pseudomedida	Resíduo	Pseudomedida	Resíduo
	Fluxo de potência nula (33-12) - D8	102,7962	Fluxo de potência nula (33-12) - D8	24,8200
	Fluxo de potência nula (12-37) - D9	10,4325	Fluxo de potência nula (12-37) - D9	5,4059
IDENTIFICAÇÃO DE ERRO	Conjunto Suspeito	Cosseno	Conjunto Suspeito	Cosseno
	D8 D9	0,9999	D8 D9	0,9999
	D8	0,2256	D8	0,8538

FONTE: A autora (2022)

Primeiramente, os conjuntos das pseudomedidas operacionais são analisados, e, assim como apresentado no caso C2, detectou-se erros nos fluxos de potência ativa e reativa nulos nos ramos 33-12 ( $D_8$ ) e 12-37 ( $D_9$ ). Ao retirar o disjuntor  $D_9$  dos conjuntos suspeitos, o valor do cosseno das pseudomedidas ativas atinge 0,2256 e das pseudomedidas reativas 0,8538, indicando que o status do disjuntor  $D_9$  está errado.

A partir da identificação do erro na topologia, o status do disjuntor errôneo ( $D_9$ ) é corrigido, alterando do status aberto para fechado. Depois da correção, os

estados são reestimados e nota-se que a topologia está livre de erros, visto que não são detectados resíduos maiores que o limiar nas pseudomedidas associadas aos disjuntores.

Em seguida é feita a análise dos erros nas medidas convencionais, conforme apresentado na FIGURA 9.

FIGURA 9 – PROCESSAMENTO DE ERROS SIMULTÂNEOS NO SISTEMA 30 BARRAS NÍVEL DE SUBESTAÇÃO: ERRO EM MEDIDA NO CASO C3

MEDIDAS CONVENCIONAIS (ERRO EM MEDIDA)				
ATIVA		REATIVA		
DETECÇÃO DE ERRO	Medidas		Medida	Resíduo
	Não há medidas convencionais ativas com resíduo maior que o limiar		Fluxo de potência (2-5)	32,9549
			Módulo de tensão na barra 5	11,4492
IDENTIFICAÇÃO DE ERRO	Conjunto Suspeito	Cosseno	Conjunto Suspeito	Cosseno
	Vazio	-	Todas as medidas	1
			Módulo de tensão na barra 5	0,2502

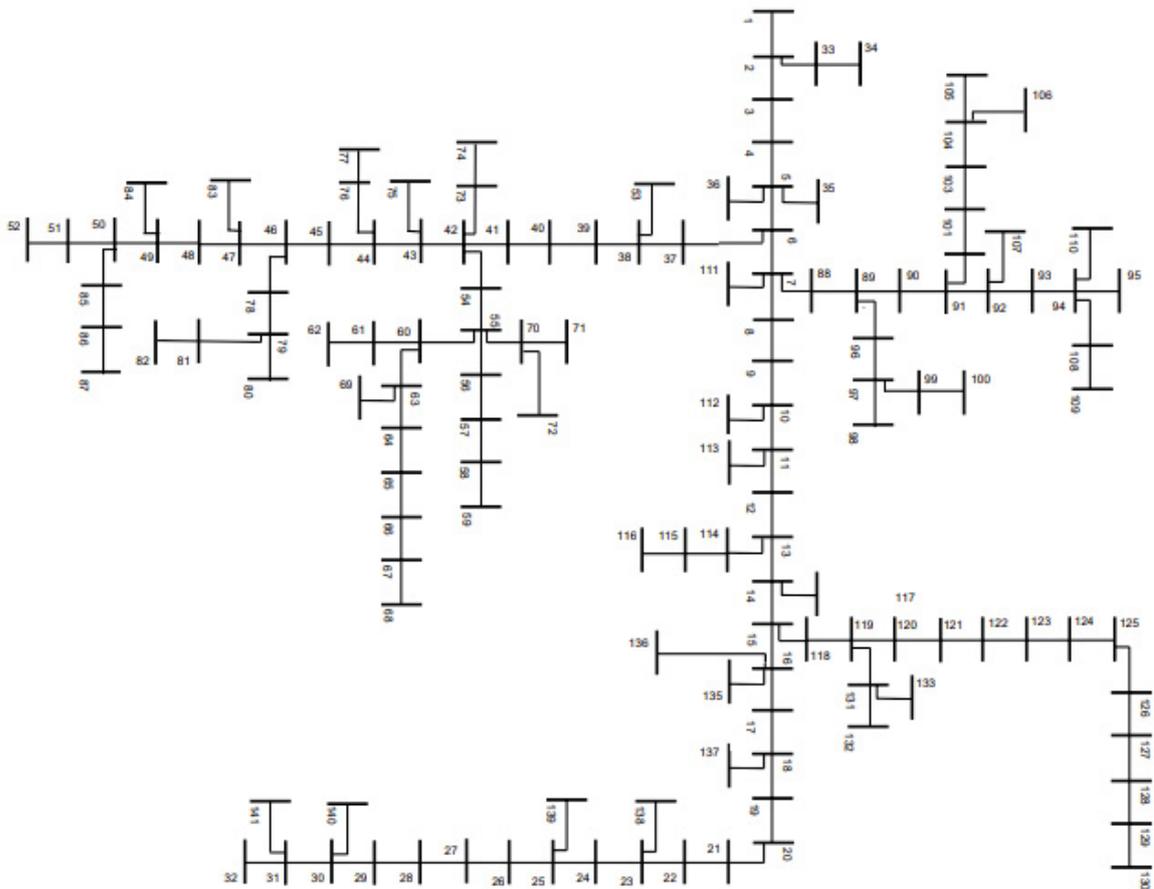
FONTE: A autora (2022)

Detectou-se resíduos maiores que o limiar 3,0 nas medidas convencionais reativas e cosseno do conjunto suspeito foi igual a 1,0, sinalizando que todas as medidas errôneas estão dentro deste conjunto suspeito. Ao retirar a medida de fluxo de potência reativa  $z_{2-5}^R$ , o cosseno do conjunto suspeito é 0,2502, o que indica que nem todas as medidas errôneas estão contidas nesse conjunto. Neste caso, como estamos lidando com erro simples em medida, conclui-se que a medida retirada é a origem do erro em medidas.

## 4.2 PROCESSAMENTO DE ERROS EM MEDIDAS NA EESD VIA TESTES GEOMÉTRICOS

Para viabilizar o desacoplamento nos sistemas de distribuição deve-se primeiramente normalizar as medidas. Aplicou-se a normalização *cpu*, conforme apresentado na Seção 3.3, em um sistema-teste de 141 barras com geração distribuída, ilustrado na FIGURA 10, com os parâmetros disponíveis no ANEXO 2 e banco de dados disponível no Matpower (KHODR et al., 2008). O plano de medição para esse sistema é composto pelo fluxo de potência ativa e reativa (nos dois extremos), injeção de potência ativa e reativa nas barras além das tensões. Antes de adentrar o processamento de erros, para avaliar a ferramenta da EESD utilizando as aproximações provenientes do desacoplamento no modelo, calculou-se o erro absoluto ( $\varepsilon_k$ ), erro absoluto médio ( $\bar{\varepsilon}$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ). Através dessas métricas, compara-se os valores estimados com os valores verdadeiros calculados pelo fluxo de potência.

FIGURA 10 – SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO 141 BARRAS



FONTE: - (HASLER, 2021)

As equações de erro e desvio padrão são as seguintes:

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

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

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

onde:

$x_k$  corresponde aos valores verdadeiros de tensão e ângulo na barra  $k$ ;

$\hat{x}_k$  corresponde aos valores estimados de tensão e ângulo na barra  $k$ .

Após a aplicação da *cpu*, fez-se a estimação de estados desacoplada no modelo e processou-se os erros grosseiros em medidas. Os casos simulados são apresentados na TABELA 14:

TABELA 14 – CASO D: ERROS GROSSEIROS EM MEDIDAS NO SISTEMA 141 BARRAS

Caso D1	Erro simples em medida de fluxo de potência ativa ( $z_{4-5}^A$ )
Caso D2	Erro múltiplo em medida de fluxo de potência ativa ( $z_{4-5}^A$ ) e reativa ( $z_{6-7}^R$ )

FONTE: A autora (2022)

Utilizando as equações (4.1), (4.2) e (4.3) para os valores de tensão e ângulo das barras do caso D na EESD desacoplada no modelo, chegou-se em TABELA 15:

TABELA 15 – MÉTRICAS PARA A EESD DESACOPLADA NO MODELO ( $x10^{-3}$ )

Tensão			Ângulo		
Erro Absoluto	Erro Médio	Desvio Padrão	Erro Absoluto	Erro Médio	Desvio Padrão
0,72	0,01	0,07	0,08	0,02	0,04

FONTE: A autora (2022)

Para ajustar a relação  $X/R$  do SD para possibilitar o desacoplamento, calculou-se o ângulo de base usando a equação (3.60). O ângulo de base mais adequado obtido foi de  $47,26^\circ$ . O estimador de estados do SD desacoplado no modelo apresentou um tempo de 2,27 segundos no processo iterativo, com três iterações ativas e duas reativas. Para este sistema, que é grande, estipulou-se um limiar de 10,0 para os resíduos normalizados com o objetivo de diminuir a quantidade de medidas no conjunto suspeito. Todos os resíduos normalizados com valores superiores à este limiar irão compor o conjunto de medidas consideradas suspeitas.

Primeiro simulou-se erros grosseiros simples em medidas. Na TABELA 16 tem-se os resultados obtidos no processamento de erros, contendo a etapa de detecção via MRN e identificação via testes geométricos.

TABELA 16 – DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE ERROS GROSSEIROS SIMPLES EM MEDIDAS NA EESD: CASO D1

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
$z_{4-5}^A$	21,5751	$z_{4-5}^A, z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	1,0000
$z_{5-4}^A$	19,5248	$z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	0,9368
$z_4^A$	14,9551	-	-
$z_5^A$	11,2906	-	-

FONTE: A autora (2022)

No caso D1, confirma-se a presença de medida errônea dentro do conjunto suspeito visto que o valor do cosseno é igual à 1,0. Em seguida, retirou-se a medida  $z_{4-5}^A$ , referente ao fluxo de potência ativa na linha subscrita indicada, e o valor do cosseno caiu para 0,9368, indicando que o conjunto está livre de erros. Sendo assim, identificou-se que a origem da anomalia é de fato a medida retirada do conjunto.

Em seguida, simulou-se erros grosseiros múltiplos em medidas, denominado como caso D2. Os resultados obtidos foram separados conforme o processamento do algoritmo: primeiro as medidas convencionais ativas são analisadas (TABELA 17) e, posteriormente, as medidas reativas (TABELA 18).

TABELA 17 – ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS NA EESD: CASO D2 - PARTE ATIVA

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
$z_{4-5}^A$	21,5751	$z_{4-5}^A, z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	1,0000
$z_{5-4}^A$	19,5229	$z_{5-4}^A, z_4^A, z_5^A$	0,9365
$z_4^A$	14,9523	-	-
$z_5^A$	11,2959	-	-

FONTE: A autora (2022)

Nos erros múltiplos em medidas, faz-se a varredura das medidas ativas (TABELA 17). O conjunto suspeito ativo é composto por todas as medidas ativas que possuem resíduo normalizado maior que 10,0. Em seguida, com o uso dos testes geométricos, calcula-se o cosseno e observa-se o valor 1,0, indicando que a medida ativa errônea está de fato no conjunto. Ao retirar a medida de fluxo de potência ativa  $z_{4-5}^A$  o valor do cosseno caiu para 0,9365, identificando, portanto, que a medida ativa errada é de fato a  $z_{4-5}^A$ .

TABELA 18 – ERROS GROSSEIROS MÚLTIPLOS EM MEDIDAS NA EESD: CASO D2 - PARTE REATIVA

Detecção do erro		Identificação do erro	
Medidas Suspeitas	Resíduo	Conjunto Suspeito	$\cos\theta$
$z_{6-7}^R$	67,8597	$z_{6-7}^R, z_{7-6}^R, z_6^R, z_7^R, z_{31-141}^R, z_{141-31}^R, z_{31}^R, z_{141}^R$	0,9785
$z_{31-141}^R$	19,2827	$z_{7-6}^R, z_6^R, z_7^R, z_{31-141}^R, z_{141-31}^R, z_{31}^R, z_{141}^R$	0,8527
$z_{7-6}^R$	31,6623	-	-
$z_{141-31}^R$	19,2968	-	-
$z_6^R$	24,0614	-	-
$z_7^R$	28,7362	-	-
$z_{31}^R$	11,6804	-	-
$z_{141}^R$	15,4179	-	-

FONTE: A autora (2022)

Em seguida, partiu-se para a análise das medidas reativas (TABELA 18). Quando retira-se do conjunto suspeito reativo a medida de fluxo de potência reativa  $z_{6-7}^R$ , o valor do cosseno atinge 0,8527, apontando então a medida retirada como a errada.

#### 4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo apresentou-se os resultados de processamento de erros em medidas e topologia na estimação de estados em sistemas de transmissão e distribuição. Para os sistemas de transmissão foram simulados erros grosseiros em medidas, simples e múltiplos (considerando o sistema livre de erros de topologia), erros de topologia (considerando o sistema livre de erros em medidas) e, por fim, erros simultâneos, sendo estes sem considerar premissas sobre a topologia ou medidas. Nos sistemas de transmissão implementou-se a EEG-DR no modelo, a qual representa explicitamente os disjuntores da rede além de aplicar os métodos desacoplados para lidar com o aumento da dimensão do problema. O método desacoplado utilizado foi o desacoplamento no modelo, o qual implica em simplificações na matriz Jacobiana.

Para viabilizar o uso dos métodos desacoplados no sistema de distribuição, os quais apresentam características como a baixa relação  $X/R$ , os parâmetros da rede foram ajustados através da normalização complexa por unidade ( $cpu$ ). Após o tratamento dos dados de entrada, aplicou-se o desacoplamento no modelo, assim como nos sistemas de transmissão. O sistema de distribuição utilizado neste trabalho foi o de 141 barras com o processamento de erros grosseiros em medidas, simples e múltiplos.

O método utilizado para a detecção de erros foi o teste do MRN. No processo de identificação de informações errôneas implementou-se o uso dos testes geométricos,

o qual garante que todos os erros estão dentro de um conjunto suspeito e faz a análise somente com as informações pertinentes à ele.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta resultados provenientes de uma ferramenta de processamento de erros, em medidas e de topologia, para sistemas de transmissão e distribuição na estimação de estados do sistema elétrico. A ferramenta proposta para os sistemas de transmissão utiliza a Estimação de Estados Generalizada a qual representa de forma explícita, no problema de estimação, as subestações e ramos chaveáveis, permitindo a análise da topologia da rede. Para contornar o aumento da dimensão do problema da EEG, os métodos desacoplados são implementados. Neste trabalho utilizou-se as aproximações provenientes do método desacoplado no modelo, particionando o problema de estimação em parte ativa e reativa das medidas convencionais e pseudomedidas operacionais.

Para garantir a acurácia da EE uma etapa fundamental é o processamento de erros. Neste trabalho a ferramenta proposta utiliza o teste do Máximo Resíduo Normalizado, o qual é bem consolidado, para a detecção de informações errôneas e o uso dos testes geométricos para a formação de um conjunto suspeito e identificação do erro. Os testes geométricos demonstram ser promissores no processamento de erros: pela facilidade de implementação e pelo fato de não precisar de reestimações para identificar erros. Os resultados obtidos nos diferentes sistemas-teste simulados corroboram essas características.

O aumento da inserção de fontes renováveis e geração distribuída tem afetado os sistemas de distribuição e tornando-os mais complexos no quesito da estimação de estados. Este trabalho apresenta, também, o uso dos testes geométricos para a identificação de erros grosseiros simples e múltiplos em medidas para sistemas de distribuição, englobando o desacoplamento das medidas em parte ativa e reativa. Devido às características intrínsecas desses sistemas, como a baixa relação da reatância pela resistência da linha, a normalização complexa por unidade ( $cpu$ ) é capaz de adequar esta relação para tornar viável o desacoplamento. Os resultados apresentados evidenciam a efetividade do método desacoplado no modelo em sistemas de distribuição, aliando o uso dos testes geométricos no processamento de erros.

### 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros decorrentes desta dissertação, são propostas as seguintes linhas de pesquisa:

- Processamento de erro de topologia em sistemas de distribuição via testes geométricos;
- Estimação de Estados Generalizada na modelagem trifásica da rede de transmissão e distribuição;
- Comparação entre os métodos desacoplados no modelo e algoritmo na modelagem trifásica da rede;
- Processamento de erros via testes geométricos na modelagem trifásica do sistema.

## REFERÊNCIAS

ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. **Power system state estimation: theory and implementation**. [S.l.]: CRC press, 2004. Citado 18 vezes nas páginas 17, 21, 23–27, 31–34.

ABUR, A.; KIM, H.; CELIK, M. Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 10, n. 4, p. 2029–2037, 1995. Citado 1 vez na página 21.

ALSAC, O.; VEMPATI, N.; STOTT, B.; MONTICELLI, A. Generalized state estimation. **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 13, n. 3, p. 1069–1075, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 22.

BRAUNSTEIN, S. H.; BRETAS, N. G.; ROSSONI, A.; BRETAS, A. Bad data analysis in distribution state estimation considering load models. In: IEEE. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. [S.l.: s.n.], 2015. P. 1–5. Citado 1 vez na página 18.

CASTILLO, M. R.; LONDON, J. B.; BRETAS, N. G.; LEFEBVRE, S.; PRÉVOST, J.; LAMBERT, B. Offline detection, identification, and correction of branch parameter errors based on several measurement snapshots. **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 26, n. 2, p. 870–877, 2010. Citado 1 vez na página 31.

CASTILLO-ALBERTINI, M. **Metodologia para Depuração off-line de Parâmetros Série e Shunt de Linhas de Transmissão Através de Diversas Amostras de Medidas**. 2010. Tese (Doutorado) – Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade ... Citado 1 vez na página 31.

CLEMENTS, K.; DAVIS, P. Detection and identification of topology errors in electric power systems. **IEEE Transactions on Power systems**, IEEE, v. 3, n. 4, p. 1748–1753, 1988. Citado 1 vez na página 17.

CLEMENTS, K.; KRUMPHOLZ, G.; DAVIS, P. Power system state estimation residual analysis: An algorithm using network topology. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 4, p. 1779–1787, 1981. Citado 2 vez na página 32.

CLEMENTS, K. A.; COSTA, A. S. Topology error identification using normalized Lagrange multipliers. **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 13, n. 2, p. 347–353, 1998. Citado 1 vez na página 17.

COELHO, E. P. R. Processamento simultâneo de erros na estimação de estados generalizada. **Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná**, 2012. Citado 1 vez na página 17.

DELLA GIUSTINA, D.; PAU, M.; PEGORARO, P. A.; PONCI, F.; SULIS, S. Electrical distribution system state estimation: measurement issues and challenges. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, IEEE, v. 17, n. 6, p. 36–42, 2014. Citado 1 vez na página 18.

GARCIA, t. A.; MONTICELLI, A.; ABREU, P. Fast decoupled state estimation and bad data processing. **IEEE Transactions on Power apparatus and Systems**, IEEE, n. 5, p. 1645–1652, 1979. Citado 8 vezes nas páginas 13, 16, 27–29, 33.

HASLER, C. F. d. S. Estimativa em tempo real de micro e minigeração em redes de distribuição. **Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná**, 2021. Citado 1 vez na página 19.

HORISBERGER, H.; RICHARD, J.; 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 16.

IRVING, M. Robust algorithm for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 24, n. 4, p. 1886–1887, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 51, 54.

ISSICABA, D.; COSTA, A. S.; COLOMBO, J. L. Real-time monitoring of points of common coupling in distribution systems through state estimation and geometric tests. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 9–18, 2015. Citado 1 vez na página 18.

JU, Y.; WU, W.; GE, F.; MA, K.; LIN, Y.; YE, L. Fast decoupled state estimation for distribution networks considering branch ampere measurements. **IEEE Transactions on Smart Grid**, IEEE, v. 9, n. 6, p. 6338–6347, 2017. Citado 1 vez na página 18.

KHODR, H.; OLSINA, F.; DE OLIVEIRA-DE JESUS, P.; YUSTA, J. Maximum savings approach for location and sizing of capacitors in distribution systems. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 78, n. 7, p. 1192–1203, 2008. Citado 1 vez na página 62.

LI, F.; BO, R. Small test systems for power system economic studies. In: IEEE. IEEE PES general meeting. [S.l.: s.n.], 2010. P. 1–4. Citado 1 vez na página 52.

LIU, W.-H.; LIM, S.-L. Parameter error identification and estimation in power system state estimation. **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 10, n. 1, p. 200–209, 1995. Citado 1 vez na página 21.

LIU, W.-H.; WU, F. F.; LUN, S.-M. Estimation of parameter errors from measurement residuals in state estimation (power systems). **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 7, n. 1, p. 81–89, 1992. Citado 1 vez na página 21.

LOURENCO, E. M.; COSTA, A. S.; 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 1 vez na página 17.

LOURENÇO, E. M.; COELHO, E. P.; 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 6 vezes nas páginas 14, 17, 35.

LOURENÇO, E. M.; COSTA, A. S.; CLEMENTS, K. A.; CERNEV, R. A. A topology error identification method directly based on collinearity tests. **IEEE Transactions on power systems**, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 35.

LOURENÇO, E. **Análise de observabilidade e identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada**. 2001. Tese (Doutorado) – Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Citado 2 vezes nas páginas 22, 32.

LOURENÇO, E.; CLEMENTS, K.; COSTA, A. S. Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification. In: SN. PROC. of the 14th PSCC. [S.l.: s.n.], 2002. P. 24–28. Citado 4 vezes nas páginas 17, 18, 35.

MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 8, n. 3, p. 1143–1149, 1993. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 22.

\_\_\_\_\_. **Power system state estimation: A generalized approach**. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 1999. Citado 6 vezes nas páginas 13, 21–23, 25.

\_\_\_\_\_. The impact of modeling short circuit branches in state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 8, n. 1, p. 364–370, 1993. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 22.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A. Modeling zero impedance branches in power system state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 6, n. 4, p. 1561–1570, 1991. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 22.

\_\_\_\_\_. Fast decoupled state estimators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 5, n. 2, p. 556–564, 1990. DOI: [10.1109/59.54566](https://doi.org/10.1109/59.54566). Citado 4 vezes nas páginas 13, 16, 39.

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 & Distribution**, IET, v. 13, n. 10, p. 1970–1978, 2019. Citado 1 vez na página 19.

NOGUEIRA, E. M.; SILVA, M.; TORTELLI, O.; LOURENÇO, E. M. Estimação de Estados Generalizada Desacoplada Rápida. **Revista Espaço Energia**, n. 28, p. 10–19, 2018. Citado 10 vezes nas páginas 13, 16, 22, 37, 40–42.

NOGUEIRA, E. M. M. Estimação de estados para sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica via abordagem desacoplada. **Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná**, 2019. Citado 13 vezes nas páginas 13–15, 17, 36, 37, 42, 44, 49.

PAU, M.; PONCI, F.; MONTI, A. Analysis of bad data detection capabilities through smart meter based state estimation. In: IEEE. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–6. Citado 1 vez na página 18.

QUINTANA, V.; SIMOES-COSTA, A.; MANDEL, A. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, IEEE, n. 3, p. 617–626, 1982. Citado 1 vez na página 22.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, Part I: Exact model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and systems**, IEEE, n. 1, p. 120–125, 1970. Citado 4 vezes nas páginas 13, 21, 22.

SILVA, M. Á. B. C. d. Estimador de Estados Generalizado Desacoplado Rápido. **Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná**, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 13, 15.

SINGH, H.; ALVARADO, F. L. Network topology determination using least absolute value state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 10, n. 3, p. 1159–1165, 1995. Citado 1 vez na página 21.

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 16.

TORTELLI, O. L.; LOURENÇO, E. M.; GARCIA, A. V.; PAL, B. C. Fast decoupled power flow to emerging distribution systems via complex pu normalization. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 30, n. 3, p. 1351–1358, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 16, 18, 47–49.

WEI, Z.; CHEN, X.; SUN, G.; ZANG, H. Distribution system fast decoupled state estimation based on complex PU normalization. In: IEEE. 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT). [S.l.: s.n.], 2015. P. 840–845. Citado 1 vez na página 18.

WU, F. F.; LIU, W.-H. Detection of topology errors by state estimation (power systems). **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 4, n. 1, p. 176–183, 1989. Citado 1 vez na página 17.

## ANEXO 1 - DADOS DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO

### 1.1 SISTEMA 5 BARRAS

DADOS DE LINHA			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
1	2	0,00281	0,0281
1	4	0,00304	0,0304
1	5	0,00064	0,0064
2	3	0,00108	0,0108
3	4	0,00297	0,0297
4	5	0,00297	0,0297

DADOS DE BARRA						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
1	1	0	0	0	0	0
2	0,989	-3,81	2,9	0,9861	0	0
3	1	-3,521	3	0,9861	3,2349	0
4	1	-2,97	4	1,3147	0,4	0
5	1	0,893	0	0	4,6651	0

### 1.2 SISTEMA 4 BARRAS

DADOS DE LINHA			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
1	2	0,0096	0,0481
1	3	0,0128	0,0641
3	4	0,0328	0,0941
2	3	0	0

DADOS DE BARRA						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
1	1	0	0	0	1,824	1,02
2	1	0	0,45	0,225	0	0
3	1	0	0,9	0,45	0	0
4	1	0	0,25	0,325	0	0

## 1.3 SISTEMA IEEE-30 BARRAS NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO

DADOS DE LINHA			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
1	2	0,0200	0,0600
1	3	0,0500	0,1900
2	4	0,0600	0,1700
3	4	0,0100	0,0400
2	5	0,0500	0,2000
2	6	0,0600	0,1800
4	6	0,0100	0,0400
5	7	0,0500	0,1200
6	7	0,0300	0,0800
6	8	0,0100	0,0400
6	9	0,0000	0,2100
6	10	0,0000	0,5600
9	11	0,0000	0,2100
9	10	0,0000	0,1100
4	12	0,0000	0,2600
12	13	0,0000	0,1400
12	14	0,1200	0,2600
12	15	0,0700	0,1300
12	16	0,0900	0,2000
14	15	0,2200	0,2000
16	17	0,0800	0,1900
15	18	0,1100	0,2200
18	19	0,0600	0,1300
19	20	0,0300	0,0700
10	20	0,0900	0,2100
10	17	0,0300	0,0800
10	21	0,0300	0,0700
10	22	0,0700	0,1500
21	22	0,0100	0,0200
15	23	0,1000	0,2000
22	24	0,1200	0,1800
23	24	0,1300	0,2700
24	25	0,1900	0,3300
25	26	0,2500	0,3800
25	27	0,1100	0,2100
28	27	0,0000	0,4000
27	29	0,2200	0,4200
27	30	0,3200	0,6000

DADOS DE LINHA			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
29	30	0,2400	0,4500
8	28	0,0600	0,2000
6	28	0,0200	0,0600
31	36	0	0
32	36	0	0
33	36	0	9999
31	34	0	0
32	35	0	9999
33	12	0	9999
34	37	0	0
35	37	0	0
12	37	0	0

DADOS DE BARRA						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
1	1	0	0,0000	0,0000	2,6020	-0,1610
2	1	0	0,2170	0,1270	0,4000	0,5000
3	1	0	0,0240	0,0120	0,0000	0,0000
4	1	0	0,0760	0,0160	0,0000	0,0000
5	1	0	0,9420	0,1900	0,0000	0,0000
6	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	1	0	0,1280	0,0590	0,0000	0,0000
8	1	0	0,3000	0,3000	0,0000	0,0000
9	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
10	1	0	0,0580	0,0200	0,0000	0,0000
11	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12	1	0	0,1120	0,0750	0,0000	0,0000
13	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,3700
14	1	0	0,0620	0,0160	0,0000	0,0000
15	1	0	0,0820	0,0250	0,0000	0,0000
16	1	0	0,0350	0,0180	0,0000	0,0000
17	1	0	0,0900	0,0580	0,0000	0,0000
18	1	0	0,0320	0,0090	0,0000	0,0000
19	1	0	0,0950	0,0340	0,0000	0,0000
20	1	0	0,0220	0,0070	0,0000	0,0000
21	1	0	0,1750	0,1120	0,0000	0,0000
22	1	0	0,0000	0,0000	0,2160	0,0000
23	1	0	0,0320	0,0160	0,1920	0,0000
24	1	0	0,0870	0,0670	0,0000	0,0000
25	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
26	1	0	0,0350	0,0230	0,0000	0,0000
27	1	0	0,0000	0,0000	0,2690	0,0000
28	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
29	1	0	0,0240	0,0090	0,0000	0,0000
30	1	0	0,1060	0,0190	0,0000	0,0000
31	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
32	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
33	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
34	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
35	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
36	1	0	0,1000	0,0500	0,0000	0,0000
37	1	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

## ANEXO 2 - DADOS DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

DADOS DE LINHA - 141 BARRAS			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
1	2	0,0577	0,0409
2	3	0,1725	0,1223
3	4	0,0009	0,0006
4	5	0,0092	0,0065
5	6	0,0068	0,0049
6	7	0,0469	0,0625
7	8	0,0736	0,0981
8	9	0,0649	0,0459
9	10	0,0507	0,0359
10	11	0,0116	0,0082
11	12	0,1291	0,0913
12	13	0,1227	0,0866
13	14	0,0488	0,0345
14	15	0,0957	0,0677
15	16	0,086	0,0609
16	17	0,0398	0,0282
17	18	0,0828	0,0566
18	19	0,0186	0,0132
19	20	0,0559	0,0395
20	21	0,0365	0,0246
21	22	0,0573	0,0307
22	23	0,0263	0,0191
23	24	0,0683	0,0497
24	25	0,0398	0,0282
25	26	0,0729	0,053
26	27	0,0335	0,0244
27	28	0,0584	0,0414
28	29	0,0655	0,0463
61	62	0,0411	0,0291
60	63	0,0353	0,025
63	64	0,1047	0,0741
64	65	0,0674	0,0477
65	66	0,0302	0,0214
66	67	0,0456	0,0323
67	68	0,0218	0,0154
70	72	0,07	0,0495
42	73	0,0231	0,0164
73	74	0,003	0,0064
43	75	0,0379	0,0268
44	76	0,0552	0,0391

DADOS DE LINHA - 141 BARRAS			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
46	77	0,0516	0,0436
76	78	0,0167	0,011
78	79	0,0415	0,0101
79	80	0,1003	0,0244
79	81	0,1513	0,037
81	82	0,0033	0,0008
47	83	0,0085	0,0062
49	84	0,0517	0,0449
50	85	0,0147	0,0036
85	86	0,0037	0,0016
86	87	0	0,00001
7	88	0,0174	0,0231
88	89	0,0469	0,0625
89	90	0,0299	0,0398
90	91	0,0212	0,0283
91	92	0,0315	0,042
92	93	0,028	0,0373
93	94	0,0206	0,0274
94	95	0,0206	0,0274
89	96	0,0687	0,0486
96	97	0,097	0,0686
97	98	0,0902	0,0196
97	99	0,0033	0,0008
131	132	0,0347	0,0245
131	133	0,092	0,0669
121	134	0,0841	0,0612
16	135	0,0527	0,0373
16	136	0,0302	0,0214
18	137	0,0584	0,0414
23	138	0,0769	0,0559
29	30	0,0342	0,0248
30	31	0,0128	0,0091
31	32	0,0347	0,0245
2	33	0,0443	0,0314
33	34	0,002	0,0009
5	35	0,2274	0,0554
5	36	0,1265	0,1565
6	37	0,0055	0,0073
37	38	0,2036	0,144
38	39	0,0938	0,0663
39	40	0,0347	0,0245
40	41	0,0918	0,065
41	42	0,2318	0,164

DADOS DE LINHA - 141 BARRAS			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
42	43	0,1207	0,0854
43	44	0,0443	0,0314
44	45	0,0405	0,0288
45	46	0,016	0,0127
46	47	0,0636	0,045
47	48	0,0417	0,0295
48	49	0,0732	0,051
49	50	0,0828	0,0556
50	51	0,0398	0,0282
51	52	0,0225	0,0159
38	53	0,0841	0,0595
42	54	0,0161	0,0114
54	55	0,0527	0,0373
55	56	0,0893	0,0632
56	57	0,0867	0,0613
57	58	0,0674	0,0477
58	59	0,0469	0,0332
55	60	0,0334	0,0236
60	61	0,0327	0,0232
63	69	0,0366	0,0259
55	70	0,0231	0,0164
70	71	0,012	0,0029
99	100	0,0033	0,0008
91	101	0,0231	0,0164
101	102	0,0578	0,0409
102	103	0,0889	0,0217
103	104	0,0629	0,0153
104	105	0,117	0,0285
104	106	0,0114	0,0026
92	107	0,0849	0,0207
94	108	0,0612	0,026
108	109	0,0452	0,0192
94	110	0,0033	0,0008
7	111	0,0719	0,0509
10	112	0,107	0,0261
11	113	0,0347	0,0245
13	114	0,0623	0,0441
114	115	0,0668	0,0473
115	116	0,004	0,001
14	117	0,0506	0,0366

DADOS DE LINHA - 141 BARRAS			
De	Para	Resistência [pu]	Reatância [pu]
15	118	0,0161	0,0114
118	119	0,0462	0,0327
119	120	0,0424	0,03
120	121	0,0507	0,0359
121	122	0,0732	0,0518
122	123	0,0584	0,0414
123	124	0,061	0,0432
124	125	0,0783	0,0554
125	126	0,0834	0,0607
126	127	0,0347	0,0245
127	128	0,057	0,042
128	129	0,0585	0,0425
129	130	0,0103	0,0073
119	131	0,0355	0,0253
25	139	0,095	0,0673
30	140	0,0519	0,0377
31	141	0,0584	0,0414

DADOS DE BARRA - SISTEMA 141 BARRAS						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
1	1	0	0	0	0,2755	1,4579
2	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0
8	1	0	0,0014	0,0074	0	0
9	1	0	0,0002	0,001	0	0
10	1	0	0	0	0	0
11	1	0	0	0	0	0
12	1	0	0,0005	0,0025	0	0
13	1	0	0,0014	0,0074	0	0
14	1	0	0	0	0	0
15	1	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	0	0
17	1	0	0,0028	0,0147	0	0
18	1	0	0	0	0	0
19	1	0	0	0	0	0
20	1	0	0,0014	0,0074	0	0
21	1	0	0,0014	0,0074	0	0
22	1	0	0	0	0	0
23	1	0	0,0014	0,0074	0	0
24	1	0	0	0	0	0
25	1	0	0	0	0	0
26	1	0	0,0028	0,0147	0	0
27	1	0	0,0014	0,0074	0	0
28	1	0	0	0	0	0
29	1	0	0,0014	0,0074	0	0
30	1	0	0	0	0	0
31	1	0	0	0	0	0
32	1	0	0,0028	0,0147	0	0
33	1	0	0	0	0	0
34	1	0	0,0028	0,0147	0	0
35	1	0	0,0057	0,0295	0	0

DADOS DE BARRA - SISTEMA 141 BARRAS						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
36	1	0	0,0028	0,0147	0	0
37	1	0	0,0009	0,0049	0	0
38	1	0	0	0	0	0
39	1	0	0,0004	0,002	0	0
40	1	0	0	0	0	0
41	1	0	0,0014	0,0074	0	0
42	1	0	0	0	0	0
43	1	0	0	0	0	0
44	1	0	0,0009	0,0049	0	0
45	1	0	0	0	0	0
46	1	0	0	0	0	0
47	1	0	0	0	0	0
48	1	0	0,0024	0,0123	0	0
49	1	0	0,0028	0,0147	0	0
50	1	0	0	0	0	0
51	1	0	0,0024	0,0123	0	0
52	1	0	0,0014	0,0074	0	0
53	1	0	0,0019	0,0098	0	0
54	1	0	0	0	0	0
55	1	0	0	0	0	0
56	1	0	0,0005	0,0025	0	0
57	1	0	0	0	0	0
58	1	0	0,0057	0,0295	0	0
59	1	0	0,0028	0,0147	0	0
60	1	0	0	0	0	0
61	1	0	0,0057	0,0295	0	0
62	1	0	0,0038	0,0196	0	0
63	1	0	0	0	0	0
64	1	0	0,0057	0,0295	0	0
65	1	0	0,0028	0,0147	0	0
66	1	0	0,0043	0,0221	0	0
67	1	0	0,0009	0,0049	0	0
68	1	0	0,0019	0,0098	0	0
69	1	0	0,0057	0,0295	0	0
70	1	0	0	0	0	0
71	1	0	0,0057	0,0295	0	0
72	1	0	0,0028	0,0147	0	0
73	1	0	0,0057	0,0295	0	0
74	1	0	0,0057	0,0295	0	0
75	1	0	0,0009	0,0044	0	0

DADOS DE BARRA - SISTEMA 141 BARRAS						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
76	1	0	0,0014	0,0074	0	0
77	1	0	0,0028	0,0147	0	0
78	1	0	0	0	0	0
79	1	0	0,0095	0,0493	0	0
80	1	0	0,0142	0,0736	0	0
81	1	0	0	0	0	0
82	1	0	0,0028	0,0147	0	0
83	1	0	0,0014	0,0074	0	0
84	1	0	0,0043	0,0221	0	0
85	1	0	0	0	0	0
86	1	0	0,0095	0,0491	0	0
87	1	0	0,0028	0,0147	0	0
88	1	0	0,0014	0,0074	0	0
89	1	0	0,0012	0,0064	0	0
90	1	0	0	0	0	0
91	1	0	0	0	0	0
92	1	0	0	0	0	0
93	1	0	0	0	0	0
94	1	0	0,0021	0,0108	0	0
95	1	0	0	0	0	0
96	1	0	0,0028	0,0147	0	0
97	1	0	0	0	0	0
98	1	0	0,0057	0,0295	0	0
99	1	0	0	0	0	0
100	1	0	0,0057	0,0295	0	0
101	1	0	0,0003	0,0015	0	0
102	1	0	0	0	0	0
103	1	0	0,0024	0,0123	0	0
104	1	0	0	0	0	0
105	1	0	0,0057	0,0295	0	0
106	1	0	0,0028	0,0147	0	0
107	1	0	0,0095	0,0493	0	0
108	1	0	0	0	0	0
109	1	0	0,0142	0,0736	0	0
110	1	0	0,0142	0,0736	0	0
111	1	0	0,0005	0,0025	0	0
112	1	0	0,0095	0,0491	0	0
113	1	0	0,0014	0,0074	0	0
114	1	0	0	0	0	0
115	1	0	0	0	0	0

DADOS DE BARRA - SISTEMA 141 BARRAS						
Barra	Tensão [pu]	Ângulo [graus]	Potência Ativa Carga [pu]	Potência Reativa Carga [pu]	Potência Ativa Geração [pu]	Potência Reativa Geração [pu]
116	1	0	0,0057	0,0295	0	0
117	1	0	0,0012	0,0064	0	0
118	1	0	0	0	0	0
119	1	0	0,0021	0,0108	0	0
120	1	0	0	0	0	0
121	1	0	0	0	0	0
122	1	0	0	0	0	0
123	1	0	0,0019	0,0098	0	0
124	1	0	0,0024	0,0123	0	0
125	1	0	0	0	0	0
126	1	0	0	0	0	0
127	1	0	0,0014	0,0074	0	0
128	1	0	0,0014	0,0074	0	0
129	1	0	0,0021	0,0108	0	0
130	1	0	0,0021	0,011	0	0
131	1	0	0	0	0	0
132	1	0	0,0014	0,0074	0	0
133	1	0	0,0009	0,0044	0	0
134	1	0	0,0007	0,0034	0	0
135	1	0	0,0005	0,0025	0	0
136	1	0	0,0014	0,0074	0	0
137	1	0	0,001	0,0054	0	0
138	1	0	0,0009	0,0049	0	0
139	1	0	0,0009	0,0049	0	0
140	1	0	0,0028	0,0147	0	0
141	1	0	0,0014	0,0074	0	0