

Jean Luca Colombo

**MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

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

Florianópolis
2016

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

COLOMBO, Jean Luca

Monitoração em tempo real de sistemas de distribuição considerando os efeitos de geração distribuída / Jean Luca COLOMBO ; orientador, Antônio José Alves Simões Costa - Florianópolis, SC, 2016.
157 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 3. Geração distribuída. 4. Estimação de estados em sistemas de potência. 5. Testes geométricos de colinearidade. I. Simões Costa, Antônio José Alves. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Jean Luca Colombo

**MONITORAÇÃO EM TEMPO REAL DE SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO OS EFEITOS DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Esta dissertação foi julgada adequada para o obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Santa Catarina, 4 de Agosto de 2016

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

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

Orientador

Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph.D.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof^a. Katia Campos de Almeida, Ph.D.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jorge Coelho, D.Sc.

Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico a todos que não desistem dos seus sonhos, ou dos seus carros.

Agradecimentos

Agradeço ao carinho e compreensão da máquina de café do labspot. Agradeço ao Prof. Simões, pela orientação, comentários, aulas, discussões e conversas, ao longo desta trajetória. Agradeço também ao Prof. Issicaba, o qual conheço por Diego, e cujo apoio e suporte me foram essenciais.

Agradeço aos demais professores da pós-graduação, em especial ao Prof. Salgado, Prof. Erlon, Prof. Mauro e, mais uma vez, Prof. Simões. Vocês me ensinaram valiosas lições, tanto dentro, como fora de sala de aula.

Agradeço aso colegas de tralho do labspot, Estone, Edwin, Guido, Zé e Bráulio, pelas inúmeras conversas, almoços, bons dias e boas noites, ao longo destes dois anos de mestrado.

Agradeço aos meus amigos Johni, pelas aulas de violão, Fernando, pelas conversas acaloradas, Camila, pelas segundas mau humoradas, e Günther, pela companhia nas baladas. Vocês fizeram estes últimos dois anos serem mágicos.

Agradeço à minha mãe, Marisa, pelos inúmeros conselhos, conversas e puxões de orelha, assim como pelo seu amor incondicional de mãe, que tanto me dá forças.

Agradeço também ao CAPES, pelo suporte financeiro, assim como à pós-graduação em engenharia elétrica, e toda a sua equipe.

Por fim, agradeço a Deus, por acreditar em mim mesmo nos meus momentos mais íntimos de dúvida.

Muito obrigado!

Resumo

Este trabalho apresenta um algoritmo de estimação de estados com capacidade de monitoramento de fontes de geração distribuída para aplicação a sistemas de distribuição ativos. Técnicas de análise de erros grosseiros são utilizadas para detectar e identificar erros de modelagem destas fontes, mediante o uso de multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de colinearidade. Uma modelagem trifásica precisa de redes de distribuição é utilizada, de forma a obter resultados de alta confiança. Também são contemplados os paradigmas de microrredes e redes inteligentes, assim como a aplicação da metodologia de monitoramento nestes sistemas. Simulações são conduzidas nos sistemas-teste *IEEE 13* nós e *IEEE 37* nós, modificados para que haja a inclusão de fontes de geração distribuída. Diversos estudos de caso são apresentados com o objetivo de validar a metodologia e fornecer base e justificativas para aplicação em centros de operação de sistemas de distribuição.

Palavras-chave: Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica; Geração Distribuída; Estimação de Estados em Sistemas de Potência; Testes Geométricos de Colinearidade.

Abstract

This work presents a state estimation algorithm for distribution systems with distributed generation monitoring capabilities. Gross error analysis techniques are utilized to detect and identify modeling errors of these sources, by using normalized Lagrange multipliers and collinearity tests, supplying compensation mechanisms for possible lack of information about the generation profile *status*. A precise distribution system modeling is utilized, in order to obtain highly reliable results. Microgrids and smart grids are also contemplated, as well as the monitoring methodology application to those systems. Simulations are conducted in test-feeders *IEEE 13 nodes* and *IEEE 37 nodes*, both modified to include distributed generation sources. Several case studies are presented, whose purpose is to validate the methodology and provide basis and justifications for application in real-time operation centers.

Keywords: Power Distribution Systems; Distributed Generation; Power Systems State Estimation; Collinearity Geometric Tests.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Introdução	1
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.2.1	Geração Distribuída	3
1.2.2	Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição	4
1.2.3	Tratamento de Erros Grosseiros	6
1.2.3.1	Testes Bayesianos de Hipóteses	6
1.2.3.2	Testes Geométricos de Colinearidade	7
1.3	Revisão do Estado da Arte	7
1.4	Contribuições à Linha de Pesquisa	9
1.5	Organização Deste Documento	10
2	Geração Distribuída e Redes Inteligentes	11
2.1	Introdução	11
2.2	Geração Distribuída	11
2.2.1	Vantagens da Inclusão de GD	12
2.2.2	Desvantagens da Inclusão de GD	13
2.2.3	Estimação de Estados e o Monitoramento da GD	14
2.2.4	Pontos de Acoplamento Comum	14
2.3	Microrredes e Redes Inteligentes	15
2.4	Conclusões	17
3	Modelagem de Sistemas de Distribuição	19
3.1	Introdução	19
3.2	Estrutura Padrão de Sistemas de Distribuição	19
3.3	Modelagem Trifásica de Sistemas de Distribuição	21
3.3.1	Elemento Genérico do SD	21
3.3.2	Modelagem por Matrizes Generalizadas	23
3.3.2.1	Linhas de Distribuição	23
3.3.2.1.1	Modelo Exato da LD	24
3.3.2.1.2	Modelo Simplificado da LD	25
3.3.2.1.3	LD Bifásicas e Monofásicas	26
3.3.2.2	Transformadores de Distribuição	26

3.3.2.2.1	Conexão Estrela aterrado - Estrela aterrado	27
3.3.2.2.2	Conexão Delta - Delta	29
3.3.2.3	Reguladores de Tensão	32
3.3.2.3.1	Conexão Estrela aterrado	33
3.3.2.3.2	Conexão Delta aberto	34
3.3.2.4	Modelagem da carga	36
3.3.2.4.1	Cargas com conexão estrela	37
3.3.2.4.2	Cargas com conexão delta	38
3.3.2.4.3	Cargas monofásicas e bifásicas	40
3.3.2.4.4	Cargas distribuídas	40
3.4	Fluxo de potência	41
3.4.1	Método de varredura para uma rede monofásica	41
3.4.2	Método de varredura para a modelagem trifásica	44
3.4.2.1	Varredura em avanço	44
3.4.2.2	Atualização das correntes de carga	45
3.4.2.3	Varredura em retrocesso	46
3.5	Comentários sobre a modelagem de SD	48
3.5.1	Modelo em <i>Por Unidade</i>	48
3.5.2	Extinção de nós e aglutinação de ramos	49
3.5.3	Bancos de capacitores	49
3.6	Conclusões	50
4	Estimador de estados para sistemas de distribuição	51
4.1	Introdução	51
4.2	Composição do plano de medição	51
4.2.1	Observabilidade do plano de medição	52
4.2.2	Medidores de supervisão	53
4.2.3	Pseudomedidas de injeção	54
4.2.4	Restrições de igualdade	55
4.3	Representação das informações	55
4.3.1	Modelagem das informações probabilísticas	56
4.3.2	Modelagem das informações determinísticas	57
4.3.2.1	Restrições <i>Estruturais</i>	57
4.3.2.2	Restrições <i>Operacionais</i>	58
4.3.2.3	Modelagem do nível de incerteza das restrições	59
4.4	Formulação matemática do estimador de estados	61

4.4.1	Resolução do Problema de Otimização	62
4.5	Vetor de Equações e Matriz Jacobiana	65
4.5.1	Natureza Trifásica das Informações	65
4.5.2	Cálculo de Elementos de $h(x)$ e $H(x)$	66
4.5.2.1	Magnitude de Tensão	67
4.5.2.2	Magnitude de Corrente ao Quadrado	68
4.5.2.2.1	Medidor a Jusante do Elemento	69
4.5.2.2.2	Medidor a Montante do Elemento	71
4.5.2.2.3	Matriz $[B]$ Singular	71
4.5.2.3	Fluxo de Potência	72
4.5.2.3.1	Medidor a Jusante do Elemento	72
4.5.2.3.2	Medidor a Montante do Elemento	73
4.5.2.4	Injeção de Potência	74
4.6	Conclusões	75
5	Monitoramento da Geração Distribuída	77
5.1	Introdução	77
5.2	Modelagem de Fontes de GD	78
5.2.1	Fluxo de Potência	78
5.2.2	Estimação de Estados	78
5.3	Multiplicadores de Lagrange Normalizados	79
5.4	Técnicas de Identificação de Erros Grosseiros	80
5.4.1	Testes Geométricos de Colinearidade	81
5.4.1.1	Uma Única Informação Errônea	81
5.4.1.2	Múltiplas Informações Errôneas	82
5.4.1.3	Expansão de \mathcal{S} por Redução de λ_t	86
5.4.1.4	Refinamento de \mathcal{S} por Remoção de Informações	87
5.4.1.5	Atualização do Plano de Medição	88
5.5	Monitoração de Sistemas de Distribuição	89
5.5.1	Simulação da Condição Operativa do SD	90
5.5.2	Algoritmo de Monitoramento	90
5.6	Conclusões	93
6	Simulações e Resultados	95
6.1	Introdução	95
6.2	Sistema <i>IEEE 13</i> Nós	95
6.2.1	Análise do Fluxo de Potência	99

6.2.2	Caso A - Nenhuma GD Modelada Incorretamente . . .	101
6.2.3	Caso B - Duas GDs Modeladas Incorretamente . . .	102
6.2.4	Caso C - Todas as GDs Modeladas Incorretamente . . .	105
6.3	Sistema <i>IEEE 37</i> Nós	107
6.3.1	Análise do Fluxo de Potência	111
6.3.2	Caso A - Nenhuma GD Modelada Incorretamente . . .	113
6.3.3	Caso B - Uma GD Modelada Incorretamente	114
6.3.4	Caso C - Duas GDs Modeladas Incorretamente . . .	116
6.3.5	Caso D - Três GDs Modeladas Incorretamente . . .	119
6.3.5.1	Nenhuma Informação Sobre as Fontes de GD	119
6.3.5.2	Variação das Informações Relativas à Fonte de GD 4 . . .	121
6.4	Conclusões	124
7	Conclusão	127
7.1	Introdução	127
7.2	Resultados Alcançados	127
7.3	Sugestões de Trabalhos Futuros	129
7.4	Conclusões	130

Referências	131
------------------------------	------------

Apêndices	141
----------------------------	------------

APÊNDICE A – Matrizes Generalizadas em Por Unidade	143
---	------------

APÊNDICE B – Aglutinação de Elementos em Cascata	147
---	------------

APÊNDICE C – Simulação de Medidas	151
--	------------

Anexos	153
-------------------------	------------

ANEXO A – Tensões de Linha e de Fase em Sis- temas Desequilibrados	155
---	------------

Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de Rede de Distribuição	20
Figura 2 – Ramo Genérico da Rede de Distribuição	22
Figura 3 – Modelo de Quadripolo Genérico	22
Figura 4 – Modelo Exato da Linha de Distribuição	24
Figura 5 – Modelo Simplificado da Linha de Distribuição	25
Figura 6 – Conexão Estrela Aterrado - Estrela Aterrado	27
Figura 7 – Conexão Delta - Delta	29
Figura 8 – Regulador de Tensão com Conexão Tipo “B”	33
Figura 9 – Banco de Reguladores com Conexão Delta Aberto	35
Figura 10 – Carga Conectada em Estrela	38
Figura 11 – Carga Conectada em Delta	39
Figura 12 – Equivalente Monofásico de um Alimentador Simples	42
Figura 13 – Projeção de λ no Espaço Colunas de W_S	84
Figura 14 – Sistema-Teste <i>IEEE 13</i> Nós	96
Figura 15 – <i>IEEE 13</i> Nós - Fluxo de Potência	100
Figura 16 – Sistema-Teste <i>IEEE 37</i> Nós	108
Figura 17 – <i>IEEE 37</i> Nós - Fluxo de Potência	112
Figura 18 – <i>IEEE 37</i> Nós - Caso <i>D</i> : Resposta do Algoritmo Face à Variações nas Informações sobre GDs	123
Figura 19 – Elementos do SD em Cascata	147
Figura 20 – Quadripolo Equivalente de Ramais Aglutinados	148

Lista de Tabelas

Tabela 1	– Redes Inteligentes em Comparação ao SD Tradicional	17
Tabela 2	– <i>IEEE 13</i> Nós - Informações Gerais	97
Tabela 3	– <i>IEEE 13</i> Nós - Plano de Medidas	98
Tabela 4	– <i>IEEE 13</i> Nós - Resumo dos Estudos de Caso	99
Tabela 5	– <i>IEEE 13</i> Nós - Fluxo de Potência: Diferenças nas Tensões	99
Tabela 6	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso A: Multiplicadores de Lagrange	101
Tabela 7	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso B: Multiplicadores de Lagrange	102
Tabela 8	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso B: Expansão de \mathcal{S}	103
Tabela 9	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso B: Refinamento de \mathcal{S}	104
Tabela 10	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso B: Perfil Estimado da Geração	104
Tabela 11	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso C: Multiplicadores de Lagrange	105
Tabela 12	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso C: Expansão de \mathcal{S}	106
Tabela 13	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso C: Refinamento de \mathcal{S}	106
Tabela 14	– <i>IEEE 13</i> Nós - Caso C: Perfil Estimado da Geração	107
Tabela 15	– <i>IEEE 37</i> Nós - Informações Gerais	108
Tabela 16	– <i>IEEE 37</i> Nós - Plano de Medidas	109
Tabela 17	– <i>IEEE 37</i> Nós - Resumo dos Estudos de Caso	110
Tabela 18	– <i>IEEE 37</i> Nós - Estudo de Caso Especial	110
Tabela 19	– <i>IEEE 37</i> Nós - Fluxo de Potência: Diferenças nas Tensões	111
Tabela 20	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso A: Multiplicadores de Lagrange	113
Tabela 21	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso B: Multiplicadores de Lagrange	114
Tabela 22	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso B: Expansão de \mathcal{S}	114
Tabela 23	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso B: Refinamento de \mathcal{S}	115
Tabela 24	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso B: Perfil Estimado da Geração	116
Tabela 25	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso C: Multiplicadores de Lagrange	116
Tabela 26	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso C: Expansão de \mathcal{S}	117
Tabela 27	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso C: Refinamento de \mathcal{S}	118
Tabela 28	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso C: Perfil Estimado da Geração	118
Tabela 29	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso D: Multiplicadores de Lagrange	119
Tabela 30	– <i>IEEE 37</i> Nós - Caso D: Expansão de \mathcal{S}	120

Tabela 31 – *IEEE 37* Nós - Caso *D*: Refinamento de \mathcal{S} 121
Tabela 32 – *IEEE 37* Nós - Caso *D*: Perfil Estimado da Geração 121

Lista de Símbolos

Grandezas Elétricas

V	Tensão elétrica complexa;
E	Magnitude de tensão elétrica;
δ	Fase de tensão elétrica;
I	Corrente elétrica complexa;
α	Fase de corrente elétrica;
S	Potência aparente complexa;
P	Potência ativa;
Q	Potência reativa;
θ	Ângulo do fator de potência da carga;
z	Impedância série;
y	Admitância <i>shunt</i> ;
n_t	Razão de transformação ideal da bobina de um transformador;
a_R	Razão de regulação de um regulador de tensão;
ϵ	Tolerância de convergência de um processo iterativo;

Estimação de Estados

n_b	Número de barras e nós de um sistema de potência;
n_e	Número de variáveis de estados;

m	Número de medidas e pseudomedidas de um plano de medição;
n_s	Número de restrições <i>estruturais</i> ;
n_o	Número de restrições <i>operacionais</i> ;
n_{GD}	Número de fontes de geração distribuída;
n_{GD}^S	Número de fontes de geração distribuída suspeitas de erros;
$n_{\mathcal{H}}$	Número de hipóteses operativas válidas;
ρ	Redundância global do plano de medidas;
x	Vetor $n_e \times 1$ de estados reais;
\hat{x}	Vetor $n_e \times 1$ de estados estimados;
$\Delta\hat{x}$	Vetor $n_e \times 1$ da variação linear do vetor de estados estimados;
σ	Desvio padrão de uma determinada informação;
$J(x)$	Função objetivo do problema de estimação de estados;
$\mathcal{L}(x)$	Função Lagrangiana do problema de estimação de estados;
λ	Vetor com os multiplicadores de Lagrange;
λ^N	Vetor com os multiplicadores de Lagrange normalizados;
λ_t	Limiar do multiplicador de Lagrange normalizado;
$\mathcal{P}(\mathcal{H}_i v)$	Probabilidade condicional <i>a posteriori</i> de \mathcal{H}_i ;
$\mathcal{P}(\mathcal{H}_i)$	Probabilidade <i>a priori</i> de \mathcal{H}_i ;

$f(v \mathcal{H}_i)$	Função densidade de probabilidade de v , dado que \mathcal{H}_i é verdadeiro;
θ	Ângulo da projeção de λ em algum espaço coluna de W ;
ϵ_{erro}	Tolerância do teste do cosseno de θ ;

Indexação

$\{\cdot\}_{abc}$	Grandeza elétrica de fase, relativa às fases a , b e c ;
$\{\cdot\}_L$	Grandeza elétrica de linha;
$\{\cdot\}_{012}$	Grandeza elétrica de fase, relativa às componentes simétricas de sequência zero, positiva e negativa;
$\{\cdot\}_i$	Grandeza elétrica relativa à fase i ;
$\{\cdot\}_{ii}$	Grandeza elétrica que relaciona a fase i consigo mesma;
$\{\cdot\}_{ik}$	Grandeza elétrica que relaciona a fase i com a fase k ;
$\{\cdot\}_{sub}$	Grandeza elétrica relativa à subestação do sistema de distribuição;
$\{\cdot\}_u$	Grandeza elétrica relativa ao nó a montante ¹ de um ramo;
$\{\cdot\}_d$	Grandeza elétrica relativa ao nó a jusante ² de um ramo;
$\{\cdot\}_t$	Grandeza elétrica relativa a um transformador;
$\{\cdot\}_{ti}$	Grandeza elétrica relativa à fase i de um transformador;

¹ Do inglês, *Upstream*.

² Do inglês, *Downstream*.

$\{\cdot\}_r$	Grandeza elétrica relativa a um regulador de tensão;
$\{\cdot\}_1$	Grandeza elétrica relativa ao primário de um transformador;
$\{\cdot\}_2$	Grandeza elétrica relativa ao secundário de um transformador;
$\{\cdot\}_{pu}$	Grandeza elétrica ou Arranjo, apresentado em <i>por unidade</i> ;
$\{\cdot\}_{base}$	Grandeza elétrica de base;
$\{\cdot\}^\ell$	Grandeza elétrica relativa à iteração ℓ ;
$\{\cdot\}^{\ell-\frac{1}{2}}$	Grandeza elétrica relativa à meia iteração, durante a uma dada iteração ℓ ;
$\{\cdot\}_m$	Grandeza relativa às medidas e pseudomedidas;
$\{\cdot\}_s$	Grandeza relativa às restrições <i>estruturais</i> ;
$\{\cdot\}_o$	Grandeza relativa às restrições <i>operacionais</i> ;
$\{\cdot\}_{GD}$	Grandeza elétrica relativa à geração distribuída;
$\{\cdot\}_{load}$	Grandeza elétrica relativa à carga;
$\mathcal{E}\{\cdot\}$	Função esperança matemática de uma variável aleatória;
$\{\cdot\}_{(i)}$	Elemento (i) de um determinada vetor;
$\{\cdot\}_{(i,j)}$	Elemento (i,j) de uma determinada matriz;
$\{\cdot\}^*$	Complexo conjugado de um vetor ou matriz;
$\Re\{\cdot\}$	Parte real de um vetor ou matriz;
$\Im\{\cdot\}$	Parte imaginária de um vetor ou matriz;
$ \cdot $	Módulo de uma variável;

$\ \cdot\ _2$	Norma euclidiana de um vetor ou matriz;
$\ \cdot\ _\infty$	Norma infinita de um vetor ou matriz;
$\{\cdot\}^\dagger$	Pseudoinversa de Moore-Penrose de uma matriz;
$diag\{\cdot\}$	Função que gera uma matriz diagonal, a partir de um dado vetor de entrada;
P .	Operação projeção sobre um espaço vetorial;
$\{\cdot\}_{E_i}$	Equação ou informação, relativa à magnitude de tensão trifásica no nó i ;
$\{\cdot\}_{I_{ij}^2}$	Equação ou informação, relativa ao quadrado da magnitude de corrente trifásica, a montante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{I_{ji}^2}$	Equação ou informação, relativa ao quadrado da magnitude de corrente trifásica, a jusante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{s_{ij}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência aparente complexa trifásica, a montante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{p_{ij}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência ativa trifásica, a montante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{q_{ij}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência reativa trifásica, a montante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{s_{ji}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência aparente trifásica, a jusante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{p_{ji}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência ativa trifásica, a jusante do ramal que conecta os nós i e j ;

$\{\cdot\}_{q_{ji}}$	Equação ou informação, relativa ao fluxo de potência reativa trifásica, a jusante do ramal que conecta os nós i e j ;
$\{\cdot\}_{S_i}$	Equação ou informação, relativa à injeção de potência aparente complexa trifásica no nó i ;
$\{\cdot\}_{P_i}$	Equação ou informação, relativa à injeção de potência ativa trifásica no nó i ;
$\{\cdot\}_{Q_i}$	Equação ou informação, relativa à injeção de potência reativa trifásica no nó i ;

Arranjos

Z	Matriz 3×3 de impedância série de um ramo;
Y	Matriz 3×3 de admitância <i>shunt</i> de um ramo;
U	Matriz identidade de ordem n , sendo n a dimensão apropriada;
0	Matriz nula de ordem $n \times o$, sendo n e o as dimensões apropriadas;
1	Matriz unitária de ordem $n \times o$, sendo n e o as dimensões apropriadas;
α	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona as tensões a montante e a jusante do mesmo. Adimensional;
b	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona a tensão a montante com a corrente a jusante do mesmo. Dada em Ω ou <i>p.u.</i> ;
c	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona a corrente a montante com a tensão e a jusante do mesmo. Dada em S ou <i>p.u.</i> ;

δ	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona as correntes a montante e a jusante do mesmo. Adimensional;
A	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona as tensões a jusante e a montante do mesmo. Adimensional;
B	Matriz 3×3 generalizada de um ramo, que relaciona a tensão a jusante com a corrente a jusante do mesmo. Dada em Ω ou <i>p.u.</i> ;
Ω_k	Conjunto de ramos a jusante do nó k ;
v	Vetor $n \times 1$, contendo as quantidades de uma medição ou restrição, sendo n a dimensão apropriada;
v_{real}	Vetor $m \times 1$ contendo os valores verdadeiros das medidas e pseudomedidas;
η	Vetor $n \times 1$ contendo os erros aleatórios associados a um determinado tipo de informação, sendo n a dimensão apropriada;
$\eta_{\mathcal{S}}$	Vetor $n \times 1$ contendo os erros aleatórios associados às informações inclusas em \mathcal{S} , sendo n a dimensão apropriada;
h	Vetor $n \times 1$ de equações não-lineares de um determinado tipo de medição ou restrição, sendo n a dimensão apropriada;
H	Matriz Jacobiana, de dimensão $n \times n_e$, do vetor h , em relação às variáveis de estado, x , sendo n a dimensão apropriada;
R	Matriz $n \times n$ de covariância, associada à um determinado tipo de medição ou restrição, sendo n a dimensão apropriada;

R_i	Matriz $n \times n$ de covariância atualizada, pós identificação de erros grosseiros, sendo n a dimensão apropriada;
ΔR_i	Matriz $n \times n$ de atualização das covariâncias, pós identificação de erros grosseiros, sendo n a dimensão apropriada;
W	Matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange;
W_j	j -ésima coluna de W , relativa à informação j ;
W_S	Submatriz de W , constituída das colunas linearmente independentes relativas às informações inseridas em S
$W_{\mathcal{T}}$	Submatriz de W , constituída das colunas relativas às informações inseridas em \mathcal{T} ;
$\mathcal{C}\{W_S\}$	Espaço vetorial formado pelas colunas da matriz W_S ;
p_λ	Projeção de $R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda$ em $\mathcal{C}\{R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S\}$;
q_λ	Projeção de $R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda$ no espaço ortogonal à $\mathcal{C}\{R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S\}$;
\mathcal{H}_0	Vetor $n_{GD} \times 1$ da hipótese operativa inicial;
\mathcal{H}_i	Vetor $n_{GD} \times 1$ da hipótese operativa i válida;
S	Conjunto suspeito, que contém todas as informações susceptíveis a erro;
\mathcal{T}	Conjunto verdadeiro, que contém todas as informações livres de erro;

Lista de abreviaturas e siglas

SD	Sistema de Distribuição;
GD	Geração Distribuída;
LD	Linha de Distribuição;
EESD	Estimação de Estados para Sistemas de Distribuição;
SCADA	Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados ³ ;
PCC	Pontos de Acoplamento Comum ⁴ ;
DIT	Demais Instalações de Transmissão;
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ;
CIREN	<i>International Conference and Exhibition on Electricity Distribution</i> ;
AMI	Infraestrutura Avançada de Medição ⁵ ;

³ Em inglês, *Supervisory Control And Data Acquisition* - **SCADA**

⁴ Em inglês, *Points of Common Coupling* - **PCC**

⁵ Em inglês, *Advanced Metering Infrastructure* - **AMI**

*“Once you free your mind about a
concept of harmony and music
being correct, you can do whatever
you want.”*

(Giorgio by Moroder, Daft Punk)

1 Introdução

1.1 Introdução

A crescente penetração de geração distribuída (GD) no setor elétrico acarreta vantagens pronunciadas e desafios interessantes, tanto para o planejamento e a pré-operação, mas principalmente para a operação de sistemas de distribuição (SD). Sem a presença destes geradores, bastava às distribuidoras garantir níveis de tensão e confiabilidade seguros, conforme determinado pela legislação vigente. A inclusão de GD não pode ser tratada com mesma simplicidade.

Além de dificuldades na regulação da tensão no sistema (BROWN; FREEMAN, 2001), a operação em tempo real é fustigada por uma plethora de problemas relativos à inclusão de geradores nos alimentadores do SD. Fontes renováveis de energia, sujeitas a intermitências operativas e climáticas, assim como problemas de comunicação entre o operador do sistema e os produtores de energia, podem acarretar situações danosas, até mesmo catastróficas, para a operação segura e o fornecimento adequado de energia aos consumidores.

Entretanto, as vantagens da inclusão de GD são demasiadas: aumento da segurança e da confiabilidade do sistema, possibilidade de operação em ilhamento, melhoria da economia local com a inclusão de geradores independentes, explorando os conceitos de Autoprodutor e Produtor Independente (ANEEL, 1996).

Para um maior aproveitamento das vantagens da GD, ferramentas precisam ser estudadas e aprimoradas, de forma que as barreiras impostas sejam contornadas. Isto é particularmente verdadeiro no âmbito da operação do sistema, que fica comprometida pela presença não monitorada de geradores independentes.

Como ferramenta definitiva de operação em tempo real e monitoração de sistemas de potência, a estimação de estados surge como solução para o presente problema. Colhendo informações espalhadas ao longo dos alimentadores, é possível determinar a condição operativa do SD.

Além disso, fontes de GD insuficientemente monitoradas, para as

quais não há informações concretas quanto a seu *status* e/ou despacho, podem ser monitoradas através das intercorrelações entre as quantidades medidas, permitindo que técnicas de análise de erros grosseiros sejam utilizadas.

O tratamento adequado da modelagem permite obter resultados condizentes com a realidade os quais, associados a um estimador dedicado à distribuição de energia, permitem que testes de colinearidade possam ser aplicados durante o processo de estimação de estados. Desta maneira, não apenas os estados do SD são monitorados, como também os *status* das fontes de GD alocadas no sistema.

Este trabalho aborda os quesitos da modelagem de sistemas de distribuição (KERSTING, 2012), assim como propõe o uso de um estimador dedicado baseado nesta modelagem. São discutidos as vantagens e desafios do processo de estimação, assim como as estratégias utilizadas para superar algumas das suas dificuldades, como a escassa presença de medidores, utilização de medidas de correntes (GEISLER, 1984), modelagem de fontes de GD, etc. Um paralelo com o conceito de microrredes é traçado, buscando enfatizar a importância das técnicas aqui descritas, assim como de trabalhos na área.

Também são apresentadas técnicas de análise de erros grosseiros, utilizadas para detectar problemas na modelagem de fontes de GD e detectar seus *status*. Comentários sobre as duas técnicas usuais são apresentados, embora o foco deste trabalho se concentre sobre uma delas, baseada em testes de colinearidade. Esta metodologia permite o monitoramento das fontes de GD inclusive nos casos onde não há informações sobre os *status* das mesmas.

O capítulo introdutório é estruturado da seguinte maneira: primeiramente, é feita uma revisão bibliográfica, destacando os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos nos tópicos de interesse deste trabalho. Em seguida é apresentada uma revisão do estado da arte da presente linha de pesquisa. Os objetivos da dissertação são discutidos na sequência, dentro da perspectiva da linha de pesquisa. Por fim, uma conclusão é apresentada, descrevendo a apresentação da dissertação.

1.2 Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica desta dissertação aborda três temas centrais, importantes para uma melhor compreensão do trabalho realizado: Geração distribuída; Estimação de estados; técnicas usuais para a detecção e identificação de erros grosseiros.

1.2.1 Geração Distribuída

A inclusão de fontes de GD em SDs traz consigo todo um conjunto de soluções e desafios. Ao longo das últimas décadas, diversos autores vem trabalhando no tema. Devido à amplitude do assunto, assim como diferentes opiniões, ainda não existe uma definição unificada de GD, que considere sua capacidade de geração, as tecnologias envolvidas, além das responsabilidades sobre o seu despacho e operação.

Tecnologias em fontes de GD são descritas na referência (PRESTON; RASTLER, 1996), que também comenta acerca de aspectos comerciais e financeiros da inclusão de GD e resume as análises de mercado feitas pelo *Electric Power Research Institute*.

A referência (GOMES et al., 1999) analisa uma série de desafios impostos pela presença de GD no que tange à modelagem do SD, assim como efeitos da inserção de GD no regime transitório e dificuldades operacionais trazidos pela mesma.

Em (ACHERMANN, 1999) e (WRIGHT; FORMBY; NEW, 2000), são apresentadas análises da influência da GD no planejamento e na operação do SD. Uma correlação entre as perspectivas futuras da GD e do mercado de energia é discutida, além da regulamentação da GD e do mercado.

Uma definição para GD é apresentada por (TURKSON; WOHLGEMUTH, 2001), que discute ainda a inclusão de GD como mecanismo de expansão do setor energético, nos países da África subsaariana. (ACKERMANN; ANDERSSON; SÖDER, 2001) também aborda o assunto da conceituação da GD, principalmente dentro do ambiente de mercados de energia competitivos.

Dentro do universo da GD, (BROWN; FREEMAN, 2001) discute o impacto da GD e como ela pode afetar a confiabilidade do sistema,

enquanto (DUGAN; MCDERMOTT, 2001) apresenta uma análise da proteção do SD na presença de fontes de GD.

A referência (BROWN et al., 2001) faz uma análise infraestrutural da expansão do setor elétrico, considerando a inclusão de GD. Um algoritmo é apresentado, o qual, na necessidade de aumento da carga, minimiza os custos de expansão da rede, considerando investimentos nos sistemas de transmissão e distribuição, além da alocação ótima de fontes de GD.

Ackermann e Knyazkin sumarizam aspectos da interação entre GD e SDs, como: diminuição das perdas; melhorias no perfil de tensão; ocorrências de sobretensão, causada pela variação nos níveis de tensão; inversão de fluxo e problemas de proteção decorrentes; etc (ACKERMANN; KNYAZKIN, 2002).

Em 2003, o IEEE apresenta um procedimento padronizado para a interconexão de fontes de GD em sistemas de energia (IEEE, 2003).

Técnicas analíticas para a alocação ótima de fontes de GD são discutidas em (WANG; NEHRIR, 2004).

Em (PEPERMANS et al., 2005) e (LOPES et al., 2007), fontes de GD são discutidas e sumarizadas, num aspecto global, retratando suas características, vantagens, assim como suas peculiaridades e desafios impostos.

1.2.2 Estimação de Estados em Sistemas de Distribuição

O processo de estimação de estados permite ao operador do sistema obter os valores estimados das magnitudes e fases das tensões complexas, nas barras e nós do sistema de potência, supondo que são fornecidas informações e medições suficientes. Entretanto, os alimentadores do SD possuem um conjunto muito escasso de medidas, podendo alguns deles até mesmo não possuir nenhum medidor. Essa característica torna a estimação de estados em sistemas de distribuição (EESD) um desafio a parte, já contemplado por muitos autores.

Em (BARAN; KELLEY, 1994) e (LI, 1996), estimadores de estados são desenvolvidos para SDs. As características de desequilíbrio de carga são levadas em consideração, um fator muito comum nestes sistemas de energia. A pouca quantidade de medidores pode ser abordada com o

uso de pseudomedidas de injeção de potência complexa, resultantes de estudos de previsão de carga.

O posicionamento de medidores ao longo dos alimentadores é discutido em (BARAN; ZHU; KELLEY, 1996). Verifica-se que um plano de medição bem distribuído pode melhorar a confiabilidade dos resultados.

Um fator importante em SDs é que, diferentemente da transmissão, tende a ser grande a presença de medidores de magnitude de corrente. Estas medidas, consideradas em (BARAN; KELLEY, 1994), assim como em outros trabalhos, (ABUR; EXPOSITO, 1997), (TENG, 2000), (JAEN; EXPÓSITO et al., 2005), etc, podem acarretar problemas de observabilidade e numéricos, principalmente no que diz respeito à partida plana das tensões (magnitude de tensão unitária, e ângulos nulos, para todas as barras e nós do sistema). A referência (GEISLER, 1984) aborda este tema, e mostra que, ao utilizar a magnitude de corrente ao quadrado, há a eliminação dos problemas numéricos, contando que as medidas de corrente não sejam medidas críticas.

Outros estimadores de estados são explorados em (LIN; TENG; CHEN, 2001) e (WANG; SCHULZ, 2004), nos quais as variáveis de estado não são as tensões nas barras e nós, mas sim as correntes nos ramais do SD. A grande quantidade de medidas de correntes facilita a determinação da matriz Jacobiana.

Trabalhos mais atuais abordam diferentes aspectos do problema. (SHAFIU; JENKINS; STRBAC, 2005), (SINGH; PAL; VINTER, 2009) e (LIU et al., 2012) discutem a alocação apropriada de medidores, enquanto (GOMEZ-QUILES; GÓMEZ-EXPOSITO; JAÉN, 2012) aplica estimação de estados no nível de seção de barra e (MIRANDA et al., 2012) apresenta a reconstrução de dados perdidos de sistemas SCADA.

O uso de técnicas de inteligência artificial e algoritmos genéticos, aplicados à EESD, também vêm sendo abordado por diversos autores. São exemplos destas metodologias: otimização híbrida por enxames de partículas, (NAKA et al., 2001) e (NAKA et al., 2003); otimização por cruzamento de abelhas¹ (NIKNAM, 2008); e aprendizado de máquina² aplicado a um estimador de média tensão (WU; HE; JENKINS, 2013).

¹ Em inglês, *Honey-bee Mating*

² Em inglês, *Machine Learning*

O advento de redes inteligentes, assim como a presença de medidores inteligentes³, podem ser muito vantajosos para a EESD. Abdel-Majeed et al. desenvolvem um estimador de estados que considera a presença destes componentes (ABDEL-MAJEED et al., 2013).

1.2.3 Tratamento de Erros Grosseiros

Para o tratamento de erros grosseiros, duas técnicas diferentes são apresentadas: os testes de hipóteses, a partir do teorema de Bayes; e os testes geométricos de colinearidade.

1.2.3.1 Testes Bayesianos de Hipóteses

Testes de hipóteses baseados no teorema de Bayes são uma ferramenta para a identificação de erros grosseiros. Dentro do processo de estimação de estados, na presença de erros de modelagem de informações e/ou restrições, e a partir de uma pré seleção de restrições suspeitas, cria-se um conjunto de hipóteses operativas plausíveis, que são subsequentemente testadas, de forma a se identificar qual dentre elas é a mais bem respaldada pelo plano de medições.

Embora tenha sido originalmente utilizado para a identificação de transações bilaterais não-reveladas, em ambientes desregulamentados (AGUDELO et al., 2000) e (CLEMENTS; SIMÕES COSTA; AGUDELO, 2006), este procedimento é mais comumente aplicado na identificação de erros topológicos em sistemas de transmissão, através das estimação à nível de seção de barra, e identificação dos *status* dos disjuntores (CLEMENTS; SIMÕES COSTA et al., 1998), (SIMÕES COSTA; LOURENÇO, 2000), (LOURENÇO, 2001), (SIMÕES COSTA; VIEIRA, 2001) e (LOURENÇO; SIMÕES COSTA, 2003).

Outro uso para este procedimento é a identificação dos *status* de geradores distribuídos no SD, dentro do processo de estimação de estados, permitindo o monitoramento em tempo real destes sistemas, considerando a presença de GD (SANTOS, 2006), (SIMÕES COSTA; SANTOS, 2007), (COLOMBO, 2012) e (COLOMBO, 2013).

³ Em inglês, *Smart Metering*

1.2.3.2 Testes Geométricos de Colinearidade

A metodologia dos testes geométricos de colinearidade, proposta inicialmente por (CLEMENTS; DAVIS, 1986), se baseia em conceitos de álgebra linear. Na presença de erros grosseiros, nas medidas e/ou restrições de um processo de estimação de estados, a análise das propriedades geométricas dos resíduos normalizados permite a detecção, e posterior identificação, destes erros.

Esta metodologia foi adaptada para identificação de erros topológicos em (SIMÕES COSTA; LOURENÇO; VIEIRA, 2005), através de estimadores de estados por rotações de Givens. A técnica é utilizada como forma de assegurar que o conjunto de informações suspeitas contenha todas os disjuntores com *status* errôneos. Ainda no escopo da análise topológica, os testes de colinearidade, utilizando a correlação entre o vetor dos multiplicadores de Lagrange e a matriz de covariância dos erros de medição, são utilizados para identificação de erros de topologia em (LOURENÇO; CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 2002), (LOURENÇO et al., 2006).

O uso da técnica dos testes de colinearidade pode também abranger a identificação dos *status* de fontes de GD, conforme desenvolvido em trabalhos anteriores (SOUZA, 2008), (SOUZA; LOURENÇO; SIMÕES COSTA, 2010), (STOCK; SIMÕES COSTA; SOUZA, 2012) e (COLOMBO, 2013).

1.3 Revisão do Estado da Arte

Conforme discutido na Seção 1.2, a temática desta dissertação foi abordada em trabalhos anteriores, porém utilizando modelos simplificados para o sistema de distribuição e considerando condições de monitoração mais favoráveis do que se encontra usualmente na prática. Para compreender o estado atual da arte desta linha de pesquisa, é importante comentar a respeito do que vêm sendo desenvolvido nos últimos anos.

O trabalho pioneiro foi desenvolvido em (SANTOS, 2006), e posteriormente divulgado na *IEEE Power Tech* (SIMÕES COSTA; SANTOS, 2007). As fontes de GD são modeladas como restrições de igualdade determinísticas, e uma hipótese operativa inicial é utilizada para a ini-

cialização do processo de estimação de estados. Na presença de erros grosseiros na hipótese inicial, testes de multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de hipóteses são utilizados, de forma a se identificar a condição operativa correta. A ferramenta básica utilizada é o Teorema de Bayes, para a determinação de probabilidades associadas a todas as possíveis combinações de *status* das fontes de geração distribuída. Embora os resultados obtidos tenham sido satisfatórios, a modelagem do SD utilizada não é a mais adequada, considerando o equivalente monofásico da rede, e tratando o mesmo como um caso particular de sistemas de transmissão.

A monitoração de fontes de GD é abordada novamente em (SOUZA, 2008) e (SOUZA; LOURENÇO; SIMÕES COSTA, 2010). Embora estes trabalhos mantenham a modelagem de SD dos trabalhos anteriores, o processo de identificação de erros grosseiros é diferente. Testes de colinearidade são aplicados para a identificação dos *status* corretos da GD, trazendo uma abordagem diferenciada ao problema, novamente com bons resultados.

Ainda no escopo dos testes de colinearidade, o trabalho desenvolvido em (STOCK; SIMÕES COSTA; SOUZA, 2012) apresenta um estimador dedicado à SD, utilizando uma modelagem por matrizes generalizadas (KERSTING, 2012), desenvolvida especialmente para estes sistemas. Durante o processo de estimação, os testes de colinearidade são utilizados, permitindo a monitoração de fontes de GD. Embora os resultados sejam, novamente, satisfatórios, a modelagem ainda não é a ideal, posto que o SD ainda é modelado por seu equivalente monofásico.

Dando sequência na pesquisa, (COLOMBO, 2012) realiza um estudo comparativo das técnicas de testes de hipóteses e testes de colinearidade. Ambas apresentam desempenhos similares, embora os testes de hipóteses tenham se mostrado levemente mais robustos que os testes de colinearidade. A análise, entretanto, parte de um modelo linearizado para o SD, ou seja, uma condição não ideal para análise de SD.

O último trabalho desenvolvido antes do início desta dissertação foi em (COLOMBO, 2013). Neste trabalho, o SD é modelado através do uso de matrizes generalizadas, aplicadas juntamente com o equivalente monofásico, de forma idêntica à utilizada em (STOCK; SIMÕES COSTA; SOUZA, 2012). Adicionalmente, entretanto, testes de hipó-

teses são utilizados para a monitoração de fontes de GD. A técnica mantém a eficácia mesmo frente à modelagem mais precisa, embora, novamente, a hipótese simplificadora do equivalente monofásico possa acarretar resultados não muito condizentes com a realidade.

1.4 Contribuições à Linha de Pesquisa

Neste trabalho, um estimador de estados trifásico é desenvolvido para SD. Utilizando uma modelagem mais completa dos elementos, através de matrizes generalizadas (KERSTING, 2012), este estimador apresenta a vantagem de representar mais realisticamente estes sistemas. Dentre algumas características introduzidas neste trabalho, destacam-se:

- Acoplamento mútuo entre fases;
- Modelagem de diferentes elementos do SD, de acordo com a sua configuração/conexão;
- Presença de cargas desequilibradas, muito comuns em SD;
- Modelagem de ramos bifásicos e monofásicos, também comuns.

A possibilidade de modelagem de cargas desequilibradas também permite a representação de fontes de GD conectadas em uma ou duas fases do sistema, permitindo a representação de injeções monofásicas, bifásicas, ou até mesmo desequilibradas. Desta forma, aumenta-se o escopo de possibilidades operativas, gerando cenários até então inexplorados dentro desta linha de pesquisa.

Testes de colinearidade são então aplicados, durante o processo de estimação de estados, de forma a monitorar estas fontes de GD. Adicionalmente, busca-se uma aplicação mais abrangente da metodologia, já que a técnica tinha sido até então aplicada apenas às restrições de igualdade referentes à geração de potência ativa das fontes de GD. Neste trabalho, aplica-se a metodologia de erros grosseiros também às restrições de igualdade de potência reativa. Este uso mais amplo dos testes de colinearidade aumenta a abrangência do processo de monitoração, já que estas restrições também são afetadas pela presença de erros grosseiros.

1.5 Organização Deste Documento

Para que haja um desenvolvimento mais claro da metodologia estudada, este trabalho é estruturado da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 faz uma revisão das características de GD, considerando a aplicação do processo de estimação de estados como ferramenta de monitoração. Uma breve discussão sobre microrredes é apresentada, que inclui argumentos a respeito de como a técnica proposta pode ser vantajosa, dentro deste novo paradigma;
- O Capítulo 3 apresenta a modelagem por matrizes generalizadas para SDs utilizada neste trabalho. Um fluxo de potência dedicado é também descrito, posto que, na temática da proposta, esta ferramenta é utilizada para a simulação do SD sob diferentes condições operativas de GD;
- O estimador de estados proposto é descrito no Capítulo 4, incluindo também as características de formação do plano de medição, assim como a modelagem de fontes de GD;
- A metodologia de análise de erros grosseiros pelos testes de colinearidade é apresentada no Capítulo 5. Uma síntese dos testes de hipóteses também é apresentada, para efeito de comparação. É discutido a inclusão destas técnicas dentro do processo de estimação de estados previamente proposto;
- Os resultados das simulações numéricas são apresentados no Capítulo 6. Diversas características para um monitoramento mais abrangente são exploradas;
- Finalmente, o Capítulo 7 sintetiza o trabalho realizado, os resultados obtidos, e discute as possíveis abordagens para trabalhos futuros.

2 Geração Distribuída e Redes Inteligentes

2.1 Introdução

A operação em tempo real de sistemas de distribuição ativos não requer apenas o desenvolvimento matemático de modelos, e implementação de técnicas. É preciso compreender as particularidades da inclusão de GD, pois estas fontes moldam as propriedades das ferramentas de monitoração mais necessárias.

Neste capítulo são discutidas as características mais importantes da GD bem como suas vantagens e os problemas que ela acarreta. São feitos comentários acerca da importância do monitoramento da GD dentro do processo de estimação de estados. Também são discutidas as semelhanças e diferenças entre os monitoramentos de fontes de GD e de pontos de acoplamento comum (PCC).

Outra questão abordada neste capítulo é a penetração de microrredes e redes inteligentes em sistemas de distribuição ativos. Além de suas características intrínsecas, ideias são discutidas sobre como o paradigma das microrredes pode se beneficiar da metodologia proposta, principalmente quando considerada a inclusão de fontes de GD.

2.2 Geração Distribuída

A principal característica da GD é a geração de energia elétrica próximo aos centros de consumo. Embora diferentes definições de GD tenham sido propostas, todas apresentam esta característica em comum.

Geração distribuída consiste na inclusão de fontes de energia, geralmente de pequeno porte, em ramais e alimentadores de concessionárias de distribuição. Esta característica acaba influenciando bastante as diferentes definições, devido a variações técnicas e distintos marcos legais em diferentes partes do mundo.

Alguns autores definem uma fonte de GD como uma planta de 20 MW ou menos, próxima ao centro de carga, e que produz eletricidade no nível de tensão do SD (TURKSON; WOHLGEMUTH, 2001).

Outros ainda permitem, em suas definições, um alcance maior na capacidade de geração, como ACKERMANN et al. (2001), para quem a GD indica um sistema isolado ou integrado de eletricidade, em pequenas plantas modulares, capazes de gerar até 100 MW de energia.

Na definição mais abrangente do IEEE, GD é a geração de energia por instalações que sejam suficientemente menores que as plantas centrais de geração, de forma que sua interconexão possa ser efetuada em quase qualquer ponto de um sistema de potência (DONDI et al., 2002).

Apesar de abordarem o quesito da localização e da capacidade de geração da GD, as definições acima não abrangem as responsabilidades. Na definição do CIRED são consideradas fontes de GD quaisquer unidades geradoras, com máxima capacidade entre 50 MW e 100 MW, conectadas ao SD, e que não sejam despachadas centralizadamente (CIRED, 1999). Ou seja, essas unidades estão além do controle do operador da rede de transmissão (PEPERMANS et al., 2005). Esta definição encaixa-se na proposta deste trabalho, posto que o operador do sistema pode não possuir informações acerca do perfil de geração das fontes de GD.

2.2.1 Vantagens da Inclusão de GD

Do ponto de vista da segurança do SD, a maior vantagem da inclusão de fontes de GD é, sem dúvida, o aumento da confiabilidade do sistema, no que tange à demanda não suprida. A presença da GD permite que os fluxos de potência nos alimentadores não dependam exclusivamente do suprimento proveniente da subestação, e conseqüentemente dos sistemas de geração e transmissão de energia.

No caso da ocorrência de um evento na transmissão ou geração que possa acarretar um desligamento do SD, parte da carga demandada pode ser suprida pela geração local. Mesmo em situações que ofereçam riscos ao SD, como no caso de curtos e desligamentos de linhas, parte do sistema pode operar isoladamente sendo suprida pelas fontes de GD mais próximas.

Além disso, projetos de expansão podem ter seus custos otimizados através da inclusão de GD (BROWN et al., 2001). Esta é uma característica atrativa para novos investidores e produtores independentes, que já são regulamentados no Brasil pela ANEEL (ANEEL, 1996).

A inclusão de GD também trás um viés sustentável para o sistema. Muitas tecnologias de GD incluem: pequenas centrais hidrelétricas (PCH), eólicas, solares, além de térmicas movidas a biomassa e bio-combustível.

Outras vantagens da GD incluem (BROWN; FREEMAN, 2001): aumento da independência entre os sistemas de geração e distribuição; recursos adicionais para compensação de potência reativa; prazos relativamente curtos para a compra/instalação de GD, e a possibilidade de operação de partes do sistema de distribuição em modo isolado.

2.2.2 Desvantagens da Inclusão de GD

Uma das principais desvantagens da presença de DG é a possibilidade de inversão de fluxo nos alimentadores radiais, que tende a afetar os ajustes da proteção do SD. Tais ajustes levam em conta a radialidade dos SDs assim como a unidirecionalidade do fluxo, para realizar a coordenação da proteção. A presença de GD, entretanto cria condições para a operação com fluxos invertidos, o que pode comprometer a proteção do sistema.

Além disso, a falta de informações sobre a condição operativa de fontes de GD pode comprometer a operação do alimentador. Muitas das tecnologias de geração distribuída estão sujeitas à variabilidade na sua geração, como no caso das usinas eólicas (intensidade do vento), e solares (intensidade da radiação do sol). A transferência de responsabilidades sobre a operação da GD, explorada pela definição da referência (CIRED, 1999), pode também causar problemas de comunicação, fazendo com que informações precisas sobre o *status* das fontes dispersas não cheguem ao operador do sistema de distribuição.

Algumas outras desvantagens da GD são enumeradas em (BROWN; FREEMAN, 2001): maior complexidade no controle da regulação de tensão; efeito *flicker* devido à comutação da GD; alteração das características de curto-circuito do SD; possível aumento do desequilíbrio entre fases do sistema; possível falta de controle no despacho da GD, e dificuldade no monitoramento da sua condição operativa.

2.2.3 Estimação de Estados e o Monitoramento da GD

Tendo em conta os pontos abordados na Subseção anterior, fica evidente a importância do monitoramento de fontes de GD para a operação de sistemas de distribuição ativos. O operador do sistema não pode mais depender apenas de análises de fluxo de potência, e da presença de medidores na subestação. A presença de intermitências climáticas e possíveis problemas de comunicação entre produtores independentes e operador do SD, requerem uma ferramenta de monitoração capaz de determinar automaticamente um modelo confiável do sistema de distribuição, incluindo suas fontes ativas de GD. A estimação de estados fornece os meios para resolver este problema.

Adquirindo informações de diversos medidores instalados ao longo de alimentadores e ramais do SD, de maneira a formar uma rede de supervisão similar à de sistemas SCADA utilizados em sistemas de transmissão, a estimação de estados para sistemas de distribuição (EESD) permite ao operador determinar a condição atual do sistema, independente de outros sistemas acoplados ao SD sob sua responsabilidade. Mais ainda, explorando a capacidade de processar erros grosseiros em seu plano de medição, a EESD permite o monitoramento das injeções demandadas pelas diversas fontes de GD espalhadas pela rede. Mesmo sem a presença de fontes de GD no SD, a EESD possibilita um maior controle e segurança de operação da rede.

Esse conjunto de vantagens constituem a base da motivação desta dissertação.

2.2.4 Pontos de Acoplamento Comum

Um ponto de acoplamento comum (PCC) pode ser definido como um ponto do SD, ao qual se conecta um sistema de potência local (IEEE, 2003). Assim sendo, por definição, além de todas as conexões necessárias, presentes no PCC, há também o fator da troca de responsabilidades. Diferentes operadores e/ou produtores independentes operam cada um destes sistemas, o que pode levar a problemas de comunicação, principalmente no que tange ao intercâmbio de potência entre o SD e o sistema local.

Esta condição impossibilita o operador do SD de comandar os despa-

chos (e as demandas) no sistema conectado ao PCC. Esta característica é coincidente com o problema de despacho das fontes de GD, discutido na Subseção 2.2.2, e pode gerar dificuldades no monitoramento do SD como um todo. As próprias fontes de GD também podem sofrer com a eventual troca de responsabilidades na sua operação, de acordo com a definição do CIRED (CIRED, 1999).

O monitoramento de fontes de GD abordado neste trabalho consiste na identificação das injeções de potência ativa e reativa nos nós onde estas fontes estão presentes. Essa característica não considera a modelagem das fontes, uma condição atrativa para o operador, que não possui responsabilidades sobre aquele despacho. Do seu ponto de vista, é importante apenas a contribuição das fontes de GD, na forma de suas potências injetadas na rede.

Assim sendo, é possível expandir a metodologia de monitoramento de fontes de GD, de modo a incluir o monitoramento de PCC's. Por não serem operadas e despachadas pelo operador do SD, não interessa a este modelar em detalhes o subsistema conectado ao PCC, mas apenas obter informações acerca do consumo (ou injeção) de potência no nó onde o PCC se encontra.

2.3 Microrredes e Redes Inteligentes

Uma microrrede é conceitualizada como um conjunto de consumidores e micro geradores, operando como um sistema único e controlável (LASSETER, 2002). Assim sendo, uma microrrede assemelha-se a um SD, com fontes de GD incorporadas, associado a um sistema de controle, que utiliza eletrônica de potência para conectar os diversos dispositivos de geração e armazenagem de energia à rede. Um aspecto distinto das microrredes, entretanto, é a sua capacidade de operar autonomamente em modo isolado, isto é, desconecta da rede de média tensão. Além disso, pelo menos parte de suas cargas devem ser controláveis, para proporcionar adequado contro de frequência em condições desfavoráveis de carregamento (LASSETER, 2002). Microrredes também fortalecem o conceito de eficiência energética, o uso prático de técnicas de otimização (LASSETER, 2002), (LASSETER; PAIGI, 2004), além da permissividade da operação em ilha (LOPES et al., 2005),

(LOPES; MOREIRA; MADUREIRA, 2006).

Por seu paradigma ser tão intrinsecamente associado ao conceito abordado neste trabalho, é importante comentar a respeito de como as ferramentas desenvolvidas podem ser adaptadas para o uso em microrredes, não apenas no que tange ao monitoramento das variáveis de estado e *status* das GDs, como também na possibilidade de realimentar estas informações como entradas auxiliares nos sistemas de controle e proteção destes sistemas.

Embora o controle da micro geração local esteja associado a esquemas de *Plug and Play*¹, o qual estas fontes podem ser adicionadas à rede sem mudanças nos esquemas de proteção e controle (LASSETER, 2002), a possibilidade do uso da metodologia de monitoramento nesses sistemas apenas reforça a importância das ferramentas desenvolvidas nesta dissertação.

Entretanto, microrredes não necessariamente são equipadas com medidores. A adição de um esquema de medição, com a utilização de arquiteturas AMI e medidores inteligentes, alia o conceito de microrrede à ideia de redes inteligentes (FARHANGI, 2010).

Outras estruturas que se beneficiariam das técnicas apresentadas neste trabalho são as redes inteligentes. Estes sistemas nada mais são do que um conjunto de alimentadores e microrredes, monitorados centralizadamente por uma infraestrutura avançada de medição (AMI²) composta de medidores inteligentes (FARHANGI, 2010).

A Tabela 1 apresenta uma comparação simplificada entre uma rede de distribuição convencional e uma rede inteligente. Além de possuir algumas das vantagens intrínsecas de microrredes, o conceito de uma rede auto-monitorada também se alinha com a metodologia proposta.

A presença de medidores inteligentes vai além do monitoramento dos consumidores. Pode-se citar algumas características dessa tecnologia (GERWEN; JAARSMA; WILHITE, 2006):

- Registro em tempo real ou quase tempo real do consumo, e possivelmente da geração;
- A possibilidade de leitura da medição, tanto local quanto remota;

¹ Em português, Conectar e Acionar

² Em Inglês, *Advanced Metering Infrastructure* - AMI.

Tabela 1 – Redes Inteligentes em Comparação ao SD Tradicional

Rede Tradicional	Rede Inteligente
Medidor Eletromecânico	Medidor Digital (Inteligente)
Comunicação em Via Única	Comunicação em duas Vias
Poucos Sensores	Sensores Espalhados
Pouco Monitoramento	Auto-Monitorada
Falhas e Apagões	Adaptativa e com Ilhamentos
Poucas Opções ao Consumidor	Muitas Opções ao Consumidor

Fonte (FARHANGI, 2010). Modificado pelo autor.

- Interconexão de redes e dispositivos alheios à rede, como a GD.

Estas características permitem que a infraestrutura AMI de medidores inteligentes possa construir uma rede de supervisão, juntamente com a medição eletromecânica típica dos SDs. A disponibilidade de medidores inteligentes apresenta portanto o potencial de (a) contornar possíveis problemas de observabilidade e falta de informação conforme discutido na Subseção 4.2.1, e (b) melhorar a qualidade dos resultados da estimação de estados, bem como a eficácia de técnicas de análise de erros grosseiros e monitoramento de GD.

2.4 Conclusões

Dificuldades de informação e comunicação entre operadores de sistemas de distribuição e produtores independentes enfatizam a necessidade do desenvolvimento de técnicas de monitoramento de SDs dotados de mecanismos para o acompanhamento do *status* de fontes de GD.

Este capítulo discorre sobre as vantagens e desvantagens da inclusão de GD e faz um paralelo entre microrredes inteligentes e redes de distribuição tradicionais. O intuito é revelar como as técnicas expostas nesta dissertação podem ser aplicadas a estas novas arquiteturas de sistemas elétricos, que podem igualmente se beneficiar de um ambiente mais ricamente supervisionado.

3 Modelagem de Sistemas de Distribuição

3.1 Introdução

Devido às suas características intrínsecas como operação comumente radial, baixa relação X/R , cargas desbalanceadas, etc, SDs requerem ferramentas de análise diferenciadas. Embora possam ser modelados com um viés remanescente de sistemas de transmissão, conforme os trabalhos descritos na Seção 1.3, hipóteses simplificadoras aplicadas à modelagem desses sistemas podem acarretar em erros não negligenciáveis.

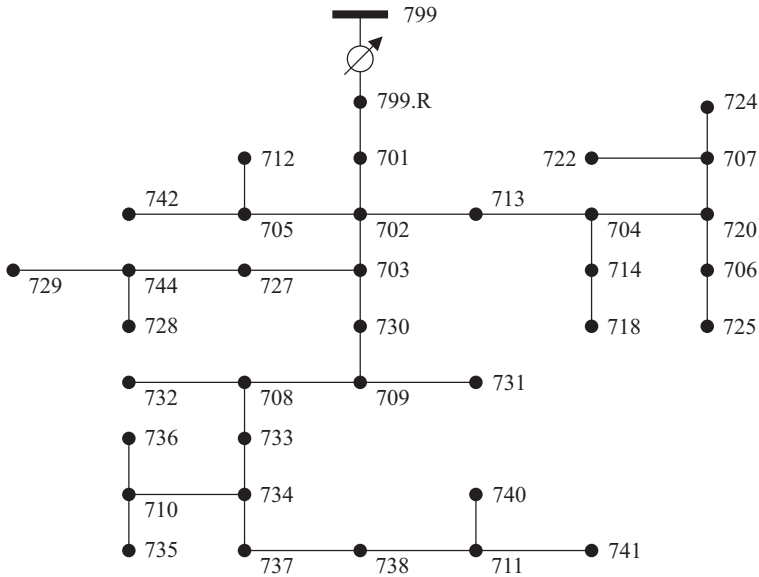
De forma a enriquecer e expandir a metodologia de monitoramento de fontes de GD, assim como o próprio processo de estimação de estados, o uso de uma modelagem própria de sistemas de distribuição é empregada neste trabalho. A modelagem por matrizes generalizadas, proposta por (KERSTING, 2012), permite uma representação trifásica dos elementos de um SD considerando impedâncias mútuas, ramos bifásicos e monofásicos, presença de cargas desbalanceadas, etc. Por ser uma abordagem adequada à representação de SDs, no Capítulo 4, um estimador de estados baseado na mesma é desenvolvido.

Neste capítulo, uma abordagem generalista das matrizes generalizadas é apresentada. Em seguida, o equacionamento de matrizes generalizadas dos elementos mais comuns de um SD é apresentado, seguido pela modelagem de cargas. Após, um método de fluxo de potência em varredura, dedicado a SDs operados radialmente é exposto. Por fim, alguns aspectos específicos da implementação da modelagem são discutidos.

3.2 Estrutura Padrão de Sistemas de Distribuição

Sistemas de distribuição são estruturas responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica ao nível de consumo, tanto residencial quanto industrial. Para desenvolver melhor função, esses sistemas podem cobrir grandes áreas, de forma a alimentar, por exemplo, uma cidade.

A Figura 1 mostra o diagrama unifilar do SD IEEE 37 nós, no qual é possível identificar a radialidade comumente empregada na operação desses sistemas;



Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

Figura 1 – Exemplo de Rede de Distribuição

Algumas características de SDs são:

- Sistema fracamente malhado, geralmente operado de maneira radial;
- Linhas de distribuição mais curtas, com baixa relação X/R ;
- Presença de elementos característicos, como reguladores de tensão;
- Níveis de tensão geralmente mais baixos do que em sistemas de transmissão.

No Brasil, os SDs são divididos entre rede primária ou de média tensão, e rede secundária, ou de baixa tensão, sendo que a rede primária

fornece energia à uma tensão que varia entre 1 kV e 36.2 kV (ABNT, 2003), enquanto para a rede secundária, esta tensão encontra-se na faixa de 110 V à 1000 V (ABNT, 2004). Ainda existem as Demais Instalações de Transmissão (DIT), correspondentes a do sistema de transmissão, com tensão de fornecimento entre 69 kV e 138 kV, também chamadas de subtransmissão, e que são de responsabilidade das empresas de distribuição.

3.3 Modelagem Trifásica de Sistemas de Distribuição

A modelagem de SDs por matrizes generalizadas possui uma caracterização diferenciada, na qual, para cada elemento da rede é possível determinar um conjunto de matrizes que carregam informações acerca das suas características intrínsecas. Essas matrizes, por sua vez, relacionam as grandezas elétricas a jusante e a montante de cada elemento, através de equações derivadas de um modelo quadripolo genérico.

As matrizes generalizadas podem ser deduzidas para cada elemento da rede a partir dessas equações genéricas, com base na aplicação da teoria de circuitos. A modelagem se diferencia posto que, a partir da determinação dessas matrizes, as equações genéricas podem ser aplicadas para qualquer elemento do sistema, fazendo com que esta abordagem seja compacta e intuitiva.

3.3.1 Elemento Genérico do SD

Considere a Figura 2, na qual um ramo qualquer do SD é representado. Esse ramo pode ser representado através de um modelo quadripolo, por matrizes generalizadas, conforme a Figura 3 (KERSTING, 2012).

Nesta representação, as matrizes generalizadas $[a]$, $[b]$, $[c]$ e $[d]$, de dimensão 3×3 , relacionam as tensões de fase e correntes de linha dos nós a montante e a jusante do ramo, através da Equação (3.1):

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_u \\ [I_{abc}]_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a] & [b] \\ [c] & [d] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_d \\ [I_{abc}]_d \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

sendo $[V_{abc}]$ e $[I_{abc}]$ dados por:

$$[V_{abc}] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T \quad (3.2)$$

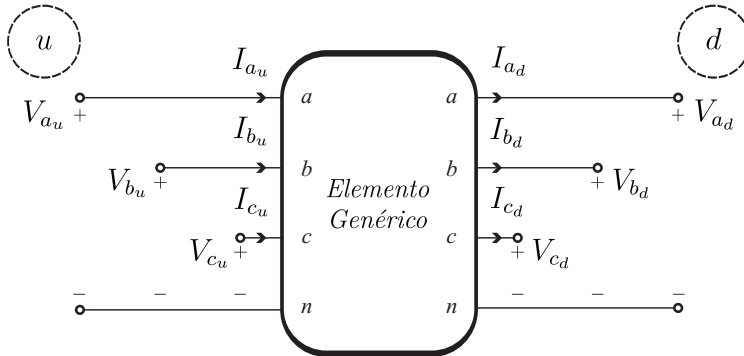


Figura 2 – Ramo Genérico da Rede de Distribuição

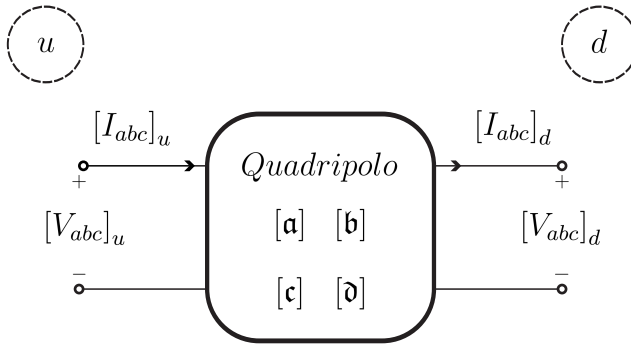


Figura 3 – Modelo de Quadripolo Genérico

$$[I_{abc}] = [I_a \ I_b \ I_c]^T \quad (3.3)$$

As equações generalizadas podem ser obtidas pelo desenvolvimento da Equação (3.1) (KERSTING, 2012):

$$[V_{abc}]_u = [\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d + [\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.4)$$

$$[I_{abc}]_u = [\mathbf{c}] \cdot [V_{abc}]_d + [\mathbf{d}] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.5)$$

As Equações (3.4) e (3.5) modelam as tensões de fase do nó a montante e as correntes de linha injetadas no elemento genérico, relacionando-as com as tensões a jusante e as correntes que saem do elemento, através das suas matrizes generalizadas.

É possível se determinar as tensões de fase a jusante a partir das correntes de linha a jusante e das tensões de fase a montante, através da equação (KERSTING, 2012):

$$[V_{abc}]_d = [\mathcal{A}] \cdot [V_{abc}]_u - [\mathcal{B}] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.6)$$

onde $[\mathcal{A}]$ e $[\mathcal{B}]$ são também matrizes generalizadas de dimensão 3×3 as quais, para a maioria dos elementos do SD, podem ser determinadas por (KERSTING, 2012):

$$[\mathcal{A}] = [\mathbf{a}]^{-1} \quad (3.7)$$

$$[\mathcal{B}] = [\mathbf{a}]^{-1} \cdot [\mathbf{b}] \quad (3.8)$$

A partir das Equações Generalizadas (3.4), (3.5) e (3.6), é possível se determinar quaisquer variáveis elétricas do SD na vizinhança de um elemento. Na próxima seção, é apresentada a determinação das matrizes generalizadas para alguns elementos comuns do SD.

3.3.2 Modelagem por Matrizes Generalizadas

3.3.2.1 Linhas de Distribuição

Para a modelagem das matrizes generalizadas das linhas de distribuição (LD) são necessárias as matrizes de impedância série e admitância *shunt*, Z_{abc} e Y_{abc} respectivamente, determinadas de acordo com a geometria e posicionamento dos cabos, condutores utilizados e posicionamento das fases, através das Equações de Carson e redução de Kron (KERSTING, 2012). Esta metodologia não será apresentada posto que, para os sistemas-teste utilizados, esses dados são fornecidos (IEEE PES, 2015).

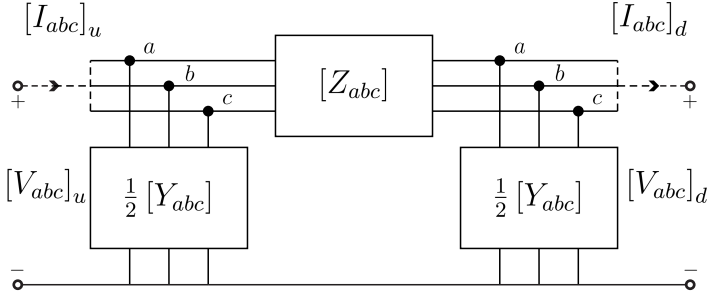
A partir de Z_{abc} e Y_{abc} , calculados conforme especificado pela referência (KERSTING, 2012), dois conjuntos de matrizes generalizadas serão expostos, com base nas seguintes considerações:

- Modelo exato do seguimento de linha;
- Modelo simplificado do seguimento de linha.

Em seguida, expostos feitos comentários acerca da modelagem de LDs bifásicas e monofásicas.

3.3.2.1.1 Modelo Exato da LD

O modelo exato da LD, semelhante à representação π das linhas, é apresentado na Figura 4.



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 4 – Modelo Exato da Linha de Distribuição

Para uma LD trifásica, matrizes de impedância série e admitância *shunt* são representadas como:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$Y_{abc} = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

onde os elementos das diagonais principais representam as impedâncias e as admitâncias próprias da LD, enquanto os elementos fora das diagonais principais representam as impedâncias e admitâncias mútuas.

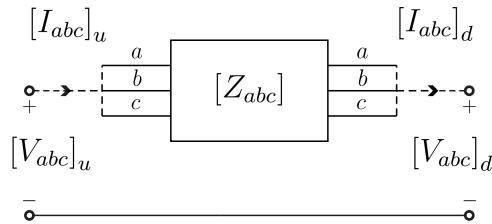
Aplicando as equações de Kirchhoff, as matrizes generalizadas da representação exata da LD podem ser definidas:

$$\begin{cases} [\mathbf{a}] = [U] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \\ [\mathbf{b}] = [Z_{abc}] \\ [\mathbf{c}] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4} \cdot [Y_{abc}] \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \\ [\mathbf{d}] = [U] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [Y_{abc}] \end{cases} \quad (3.11)$$

Por fim, substituindo a Equação (3.11) nas Equações (3.7) e (3.8), todas as matrizes generalizadas para a LD exata podem ser determinadas, possibilitando o uso das equações generalizadas.

3.3.2.1.2 Modelo Simplificado da LD

Em SDs, as admitâncias *shunt* de linhas aéreas tendem a assumir valores de ordem de grandeza inferior as impedâncias série, de forma que essas grandezas possam ser desconsideradas, no que tange a modelagem de LDs (KERSTING, 2012). Assim sendo, a partir dessa simplificação, é possível representar a LD conforme apresentado na Figura 5.



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 5 – Modelo Simplificado da Linha de Distribuição

Para determinar as matrizes generalizadas considerando essa hipótese simplificadora, basta aplicar a metodologia apresentada na Subseção 3.3.2.1.1, considerando $[Y_{abc}] = [0]$:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{a}] = [\mathbf{d}] = [\mathcal{A}] = [U] \\ \quad [\mathbf{b}] = [\mathcal{B}] = [Z_{abc}] \\ \quad \quad [\mathbf{c}] = [0] \end{array} \right. \quad (3.12)$$

Nesta dissertação as matrizes generalizadas das LDs são dadas pela Equação (3.12), considerando o modelo simples das linhas, posto que nos sistemas-teste utilizados, não se verificou impacto significativo do efeito *shunt* nas soluções do fluxo de potência e estimação de estados.

3.3.2.1.3 LD Bifásicas e Monofásicas

Conforme discutido, a modelagem das matrizes generalizadas para LDs requer a determinação das impedâncias série equivalente, Z_{abc} , através das Equações de Carson e redução de Kron. Entretanto, no que tange ramos bifásicos e monofásicos, estes procedimentos resultariam em matrizes Z_{abc} de dimensões 2×2 e 1×1 , respectivamente. Assim, a aplicação da Equação (3.12) resultaria em matrizes generalizadas sem a dimensão apropriada 3×3 , dificultando a manipulação posterior dessas matrizes para a modelagem de estimadores de estado.

Este problema de dimensão pode ser resolvido através da adição de fases imaginárias, relativas às fases inexistentes. Na prática, este procedimento é equivalente a adicionar colunas e linhas nulas às matrizes Z_{abc} de ramais bifásicos e monofásicos, ampliando-as para a dimensão 3×3 correta. Assim, esses ramos podem ser modelados como LDs trifásicas.

Para exemplificar, considere uma linha bifásica com as fases b e c , e um ramo monofásico, contendo apenas a fase a . Assim sendo, adicionado uma fase imaginária a para o primeiro, e as fases b e c para o último, as suas matrizes de impedância série equivalente podem ser re-escritas como:

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{bb} & z_{bc} \\ 0 & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

o que permite a análise desses elementos como ramais trifásicos.

A aplicação do procedimento, associado à Equação (3.12), permite a modelagem de todas as LDs da rede de distribuição, quer trifásicas, bifásicas ou monofásicas.

3.3.2.2 Transformadores de Distribuição

Além das LDs, outros componentes muito comuns ao SD são os transformadores. Diferentes níveis de tensão são requeridos em diferen-

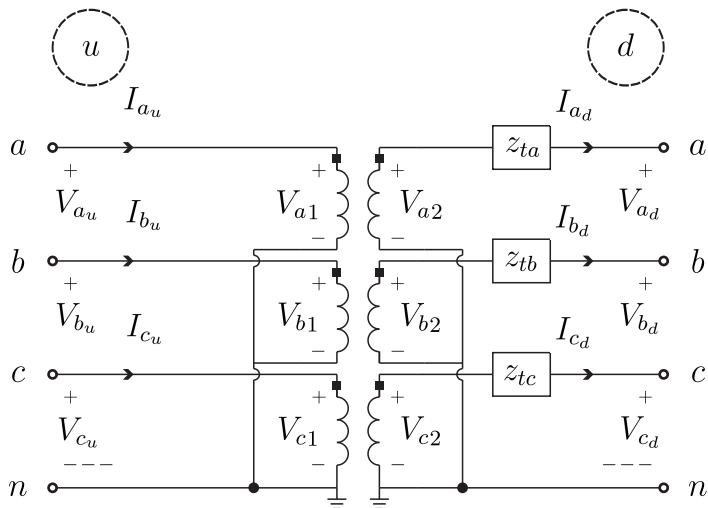
tes trechos dos alimentadores, principalmente no momento da troca da rede primária para a secundária. Entretanto, diferentemente da LD, a determinação das matrizes generalizadas desse elementos não depende apenas dos aspectos construtivos dos transformadores, mas também, da forma como estão conectados.

Neste trabalho, duas configurações de transformadores são modeladas:

- Configuração estrela aterrado - estrela aterrado;
- Configuração delta - delta.

3.3.2.2.1 Conexão Estrela Aterrado - Estrela Aterrado

A Figura 6 apresenta um banco de transformadores em configuração estrela aterrado - estrela aterrado, conectando os nós u e d . Considerando um banco composto por transformadores idênticos, as tensões de fase do lado primário e secundário de suas bobinas podem ser expressas



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 6 – Conexão Estrela Aterrado - Estrela Aterrado

através da sua relação de transformação n_t :

$$[V_{abc}]_1 = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \cdot [V_{abc}]_2 = n_t \cdot [U] \cdot [V_{abc}]_2 \quad (3.15)$$

De maneira análoga, as correntes a jusante e a montante também podem ser relacionadas:

$$[I_{abc}]_u = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_t} \end{bmatrix} \cdot [I_{abc}]_d = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.16)$$

Aplicando as leis de Kirchhoff do lado do primário e do secundário, de forma a obter $[V_{abc}]_1$ e $[V_{abc}]_2$, respectivamente, e utilizando Equação (3.15), é possível se relacionar as tensões a jusante e a montante através de (KERSTING, 2012):

$$[V_{abc}]_u = n_t \cdot [U] \cdot ([V_{abc}]_d + [Z_{tabc}] \cdot [I_{abc}]_d) \quad (3.17)$$

onde a matriz de impedâncias $[Z_{tabc}]$ inclui as impedâncias série dos enrolamentos do transformador:

$$[Z_{tabc}] = \begin{bmatrix} z_{ta} & 0 & 0 \\ 0 & z_{tb} & 0 \\ 0 & 0 & z_{tc} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Manipulando as Equações (3.16) e (3.17) é possível determinar as matrizes generalizadas utilizadas nas Equações (3.4) e (3.5):

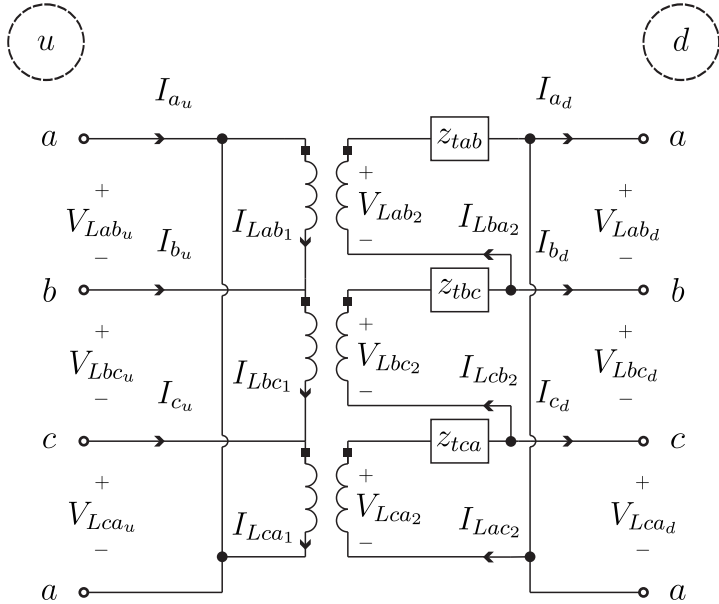
$$\begin{cases} [\mathbf{a}_t] = n_t \cdot [U] \\ [\mathbf{b}_t] = n_t \cdot [Z_{tabc}] \\ [\mathbf{c}_t] = [0] \\ [\mathbf{d}_t] = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \end{cases} \quad (3.19)$$

Por fim, as matrizes generalizadas $[\mathcal{A}_t]$ e $[\mathcal{B}_t]$ são determinadas através das Equações (3.7) e (3.8):

$$\begin{cases} [\mathcal{A}_t] = [\mathbf{a}_t]^{-1} = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \\ [\mathcal{B}_t] = [\mathbf{a}_t]^{-1} \cdot [\mathbf{b}_t] = [Z_{tabc}] \end{cases} \quad (3.20)$$

3.3.2.2.2 Conexão Delta - Delta

A Figura 7 mostra o diagrama de um banco de transformadores monofásicos conectado em delta-delta, situado entre os nós u e d .



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 7 – Conexão Delta - Delta

De maneira análoga à conexão estrela - estrela, considerando que os transformadores são idênticos, temos que as tensões de linha do primário e do secundário se relacionam por:

$$[V_{Labc}]_u = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \cdot [V_{Labc}]_2 = n_t \cdot [U] \cdot [V_{Labc}]_2 \quad (3.21)$$

onde:

$$[V_{Labc}] = [V_{Lab} \ V_{Lbc} \ V_{Lca}]^T \quad (3.22)$$

Uma atribuição similar pode ser aferida para as correntes de fase dentro da configuração delta:

$$[I_{Labc}]_1 = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \cdot [I_{Labc}]_2 \quad (3.23)$$

onde:

$$[I_{Labc}]_1 = \begin{bmatrix} I_{Lab_1} & I_{Lbc_1} & I_{Lca_1} \end{bmatrix}^T \quad (3.24)$$

$$[I_{Labc}]_2 = \begin{bmatrix} I_{Lba_2} & I_{Lcb_2} & I_{Lac_2} \end{bmatrix}^T \quad (3.25)$$

A modelagem por matrizes generalizadas relaciona tensões de fase e correntes de linha. Porém a Equação (3.23) trata das correntes de fase no delta da configuração. Entretanto, KERSTING mostra que a relação dada pela Equação (3.23) pode ser estendida para as correntes de linha a jusante e a montante (KERSTING, 2012):

$$[I_{abc}]_u = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.26)$$

Aplicando a Lei de Kirchhoff das tensões no lado do secundário da Figura 7, e utilizando a Equação (3.21), pode-se determinar as tensões de linha a montante em função das tensões de linha a jusante e correntes de fase do secundário do banco de transformadores:

$$[V_{Labc}]_u = n_t \cdot [U] \cdot [V_{Labc}]_d + n_t \cdot [U] \cdot [Z_{tabc}] \cdot [I_{Labc}]_d \quad (3.27)$$

onde:

$$[Z_{tabc}] = \begin{bmatrix} z_{tab} & 0 & 0 \\ 0 & z_{tbc} & 0 \\ 0 & 0 & z_{tca} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Aplicando um procedimento análogo, é possível determinar as tensões de linha a jusante do elemento:

$$[V_{Labc}]_d = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \cdot [V_{Labc}]_u - [Z_{tabc}] \cdot [I_{Labc}]_d \quad (3.29)$$

As Equações (3.27) e (3.29) se assemelham muito às Equações generalizadas (3.4) e (3.6), com a diferença residindo no fato de que no primeiro par as tensões expressas são de linha, e as correntes de fase.

Assim, para obtermos as matrizes generalizadas, pode-se determinar como as correntes e tensões de fase e linha se relacionam. Para esta configuração, as correntes de fase a jusante do elemento $[I_{Labc}]_d$ se relacionam com as correntes de linha $[I_{abc}]_d$ através de (KERSTING, 2012):

$$[I_{Labc}]_d = [G1] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.30)$$

sendo que:

$$[G1] = \frac{1}{z_{tab} + z_{tbc} + z_{tca}} \cdot \begin{bmatrix} z_{tca} & -z_{tbc} & 0 \\ z_{tca} & z_{tab} + z_{tca} & 0 \\ -z_{tab} - z_{tbc} & -z_{tbc} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

O Anexo A apresenta uma metodologia para a obtenção das tensões de fase $[V_{abc}]$ a partir das tensões de linha $[V_{Labc}]$ para sistemas desequilibrados. Substituindo a Equação (3.30) na Equação (3.27):

$$[V_{Labc}]_u = n_t \cdot [U] \cdot [V_{Labc}]_d + n_t \cdot [Z_{tabc}] \cdot [G1] \cdot [I_{Labc}]_d \quad (3.32)$$

e utilizando as Equações (A.4) e (A.13) do Anexo A, pode-se deduzir a equação generalizada (3.4) para a configuração delta-delta:

$$[V_{abc}]_u = n_t \cdot [F] \cdot [D] \cdot [V_{abc}]_d + n_t \cdot [F] \cdot [Z_{tabc}] \cdot [G1] \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.33)$$

onde as matrizes $[D]$ e $[F]$ são dadas pelas Equações (A.5) e (A.14) dos Anexos, re-escritas abaixo:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$[F] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Pode-se obter $[a_t]$ e $[b_t]$ a partir da comparação termo a termo da Equação (3.33) com a Equação (3.4):

$$\begin{cases} [a_t] = n_t \cdot [F] \cdot [D] \\ [b_t] = n_t \cdot [F] \cdot [Z_{tabc}] \cdot [G1] \end{cases} \quad (3.36)$$

Da Equação (3.26), chega-se às matrizes $[\mathbf{c}_t]$ e $[\mathbf{d}_t]$:

$$\begin{cases} [\mathbf{c}_t] = [0] \\ [\mathbf{d}_t] = \frac{1}{n_t} \cdot [U] \end{cases} \quad (3.37)$$

As demais matrizes generalizadas podem ser obtidas da Equação (3.29), aplicando-se o desenvolvimento necessário para a obtenção da Equação (3.33) Assim:

$$\begin{cases} [\mathcal{A}_t] = \frac{1}{n_t} \cdot [F] \cdot [D] \\ [\mathcal{B}_t] = [F] \cdot [Z_{tabc}] \cdot [G1] \end{cases} \quad (3.38)$$

Equações (3.36), (3.37) e (3.38) permitem a aplicação das equações generalizadas para um banco de transformadores com configuração delta-delta.

3.3.2.3 Reguladores de Tensão

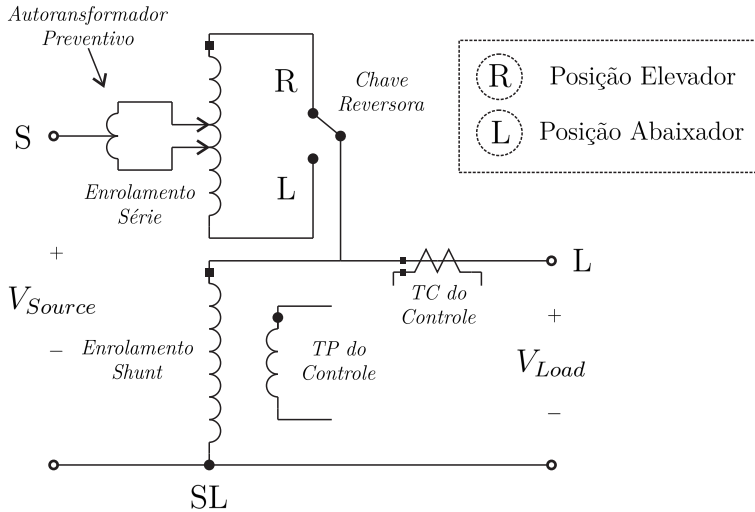
Reguladores de tensão são auto-transformadores capazes de alterar o seus *taps* de forma automatizada, de maneira a manter a magnitude de tensão de um determinado ponto do SD em um nível desejado. A posição do *tap* é determinada por um circuito compensador de controle. Reguladores padronizados permitem um chaveamento reverso, capaz de fornecer uma alteração de $\pm 10\%$ da tensão do regulador, em 32 posições.

Reguladores de tensão podem ser conectados em conexões Tipo A ou Tipo B (IEEE, 1988). A Figura 8 apresenta a conexão mais comum, Tipo B.

Para um regulador Tipo B com 32 posições de *tap*, com variação de $\pm 10\%$, a tensão aumenta em $5/8\%$, ou $0,00625$ por unidade (p.u.), para cada posição do *tap*. A regulação de tensão é dada por (KERSTING, 2012):

$$a_R = 1 \mp 0,00625 \cdot tap \quad (3.39)$$

onde o sinal negativo se aplica para o regulador na posição elevador, e o sinal positivo, na posição abaixador. A posição abaixador ou elevador é determinada pela chave reversora presente no regulador de tensão, conforme apresentado na Figura 8.



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 8 – Regulador de Tensão com Conexão Tipo “B”

Neste trabalho, reguladores de tensão são modelados como ideais, ou seja, suas impedâncias são consideradas nulas. Além disso, considera-se que as posições dos *taps* são informações conhecidas pelo operador do sistema. A partir dessas considerações, as matrizes generalizadas são então obtidas para bancos de reguladores de tensão Tipo B com base nas seguintes conexões:

- Conexão em estrela aterrado;
- Conexão em delta aberto.

3.3.2.3.1 Conexão Estrela Aterrado

Um banco de reguladores de tensão conectado em estrela possui uma conexão análoga ao banco de transformadores conectados em estrela aterrado - estrela aterrado, apresentado na Figura 6. Cada fase possui seu próprio regulador Tipo B, com neutro comum e aterrado,

com razões de regulação de tensão a_{R_a} , a_{R_b} e a_{R_c} relativas aos *taps* de cada fase, e determinadas através da Equação (3.39).

Por se tratar de uma conexão individual para cada fase, e levando em conta a idealidade de cada regulador, as matrizes generalizadas dessa configuração são dadas por (KERSTING, 2012):

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{a}_r] = \begin{bmatrix} a_{R_a} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_b} & 0 \\ 0 & 0 & a_{R_c} \end{bmatrix} \\ [\mathbf{b}_r] = [0] \\ [\mathbf{c}_r] = [0] \\ [\mathbf{d}_r] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{R_a}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{R_b}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{R_c}} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (3.40)$$

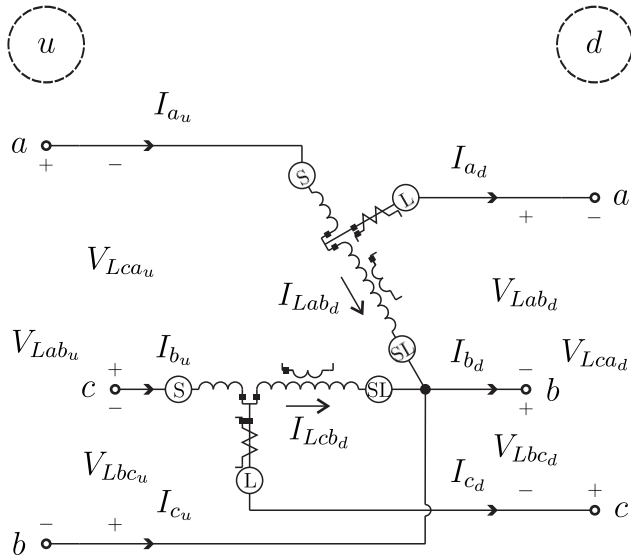
As matrizes $[\mathcal{A}_r]$ e $[\mathcal{B}_r]$ são então dadas pela aplicação das Equações (3.7) e (3.8).

3.3.2.3.2 Conexão Delta Aberto

Típica de alimentadores trifilares conectados em delta, a configuração em delta aberto conta com dois reguladores de tensão Tipo B conectados entre duas das fases do sistema. Na Figura 9 é apresentada essa conexão para o caso dos reguladores entre as fases *ab* e *cb*, da qual as matrizes generalizadas serão determinadas.

Devido à sua configuração diferenciada, as tensões de linha a montante e a jusante se relacionam por (KERSTING, 2012):

$$[V_{Labc}]_u = \begin{bmatrix} a_{R_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_{cb}} & 0 \\ -a_{R_{ab}} & -a_{R_{cb}} & 0 \end{bmatrix} \cdot [V_{Labc}]_d \quad (3.41)$$



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 9 – Banco de Reguladores com Conexão Delta Aberto

ao passo que as correntes de linha a montante e a jusante são dadas por (KERSTING, 2012):

$$[I_{abc}]_u = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & -\frac{1}{a_{R_{cb}}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{R_{cb}}} \end{bmatrix} \cdot [I_{abc}]_d \quad (3.42)$$

Por se tratar de uma relação entre tensões de linha, a Equação (3.41) não pode ser usada para determinação direta das matrizes generalizadas, já que estas são relacionadas tensões de fase.

Utilizando as Equações (3.41) e (3.42), juntamente com as relações de transformação de tensões de linha em tensões de fase, e vice-versa, dadas pelas Equações (A.4) e (A.13) do Anexo A, é possível determinar as matrizes generalizadas para o banco de reguladores conectados em

delta aberto:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathbf{a}_r] = [F] \cdot \begin{bmatrix} a_{R_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & a_{R_{cb}} & 0 \\ -a_{R_{ab}} & -a_{R_{cb}} & 0 \end{bmatrix} \cdot [D] \\ [\mathbf{b}_r] = [0] \\ [\mathbf{c}_r] = [0] \\ [\mathbf{d}_r] = [F] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & 0 \\ -\frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & -\frac{1}{a_{R_{cb}}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{R_{cb}}} \end{bmatrix} \cdot [D] \end{array} \right. \quad (3.43)$$

Para as matrizes generalizadas $[\mathcal{A}_r]$ e $[\mathcal{B}_r]$, as Equações (3.7) e (3.8) não podem ser aplicadas diretamente, devido à matriz $[\mathbf{a}_r]$ ser singular. Assim sendo, pode-se calcular a tensão a jusante a partir da tensão a montante através de (KERSTING, 2012):

$$[V_{Labc}]_d = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{R_{cb}}} & 0 \\ -\frac{1}{a_{R_{ab}}} & -\frac{1}{a_{R_{cb}}} & 0 \end{bmatrix} \cdot [V_{Labc}]_u \quad (3.44)$$

e aplicando o mesmo desenvolvimento utilizado para a obtenção da Equação (3.43), pode-se determinar as demais matrizes generalizadas:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\mathcal{A}_r] = [F] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{R_{ab}}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{R_{cb}}} & 0 \\ -\frac{1}{a_{R_{ab}}} & -\frac{1}{a_{R_{cb}}} & 0 \end{bmatrix} \cdot [D] \\ [\mathcal{B}_r] = [0] \end{array} \right. \quad (3.45)$$

As Equações (3.43) e (3.45) modelam o regulador de tensão conectado em delta aberto.

3.3.2.4 Modelagem da Carga

Ao longo dos nós dos alimentadores e ramais de um SD, conexões com consumidores se fazem presentes.

Uma carga pode ser modelada como:

- Potência Constante - A potência consumida não depende da sua tensão de alimentação;
- Corrente Constante - A potência consumida é proporcional à sua tensão de alimentação;
- Impedância Constante - A potência consumida é proporcional ao quadrado da sua tensão de alimentação;
- Híbrida - A potência total consumida é composta por partes pertencentes às categorias acima.

Nesta dissertação, consideramos todas as cargas como sendo Potência Constante. Desta maneira, a carga total em cada nó do sistema é fixa, e independente da sua tensão de alimentação.

Outro aspecto importante da modelagem da carga, é a sua conexão com o sistema. Uma carga do sistema pode ser considerada como:

- Conexão fase-neutro ou estrela;
- Conexão fase-fase ou delta.

Para cada carga ao longo do sistema, é necessário calcular a corrente consumida em função da sua tensão no ponto de conexão e da sua potência consumida. O equacionamento detalhado dessa corrente é discutido nas próximas subseções.

3.3.2.4.1 Cargas com Conexão Estrela

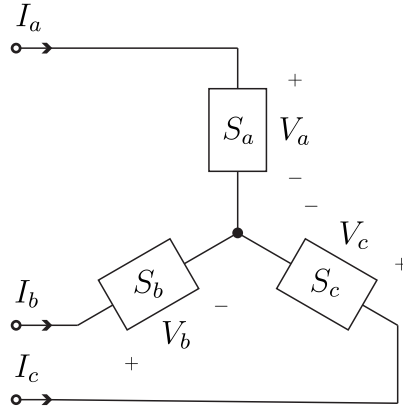
Nesta configuração, os terminais de carga ficam conectados entre as fases, e o neutro comum. A Figura 10 apresenta o diagrama de uma carga conectada em estrela.

Para cada fase da carga, temos que sua carga e sua tensão são dadas por:

$$\text{Fase } a : |S_a| \angle \theta_a = P_a + jQ_a \text{ e } V_a = E_a \angle \delta_a \quad (3.46)$$

$$\text{Fase } b : |S_b| \angle \theta_b = P_b + jQ_b \text{ e } V_b = E_b \angle \delta_b \quad (3.47)$$

$$\text{Fase } c : |S_c| \angle \theta_c = P_c + jQ_c \text{ e } V_c = E_c \angle \delta_c \quad (3.48)$$



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 10 – Carga Conectada em Estrela

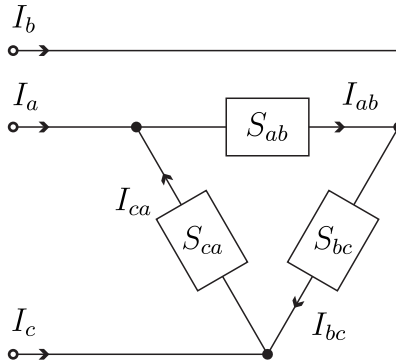
Devido à hipótese de que a carga é do tipo Potência Constante, e com base na Figura 10, as correntes de linha de cada fase podem ser calculadas por (KERSTING, 2012):

$$\begin{cases} I_a = \left(\frac{S_a}{V_a}\right)^* = \frac{|S_a|}{E_a} \angle (\delta_a - \theta_a) = |I_a| \angle \alpha_a \\ I_b = \left(\frac{S_b}{V_b}\right)^* = \frac{|S_b|}{E_b} \angle (\delta_b - \theta_b) = |I_b| \angle \alpha_b \\ I_c = \left(\frac{S_c}{V_c}\right)^* = \frac{|S_c|}{E_c} \angle (\delta_c - \theta_c) = |I_c| \angle \alpha_c \end{cases} \quad (3.49)$$

Equação (3.49) permite a modelagem de cargas conectadas em estrela.

3.3.2.4.2 Cargas com Conexão Delta

A Figura 11 apresenta o diagrama de uma carga conectada em delta. Diferente da configuração Fase-Neutro, as cargas estão agora conectadas entre as linhas da rede de distribuição.



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 11 – Carga Conectada em Delta

As tensões e potências consumidas por esta conexão são dadas por:

$$\text{Fase } ab : |S_{ab}| \angle \theta_{ab} = P_{ab} + jQ_{ab} \text{ e } V_{ab} = E_{ab} \angle \delta_{ab} \quad (3.50)$$

$$\text{Fase } bc : |S_{bc}| \angle \theta_{bc} = P_{bc} + jQ_{bc} \text{ e } V_{bc} = E_{bc} \angle \delta_{bc} \quad (3.51)$$

$$\text{Fase } ca : |S_{ca}| \angle \theta_{ca} = P_{ca} + jQ_{ca} \text{ e } V_{ca} = E_{ca} \angle \delta_{ca} \quad (3.52)$$

As correntes que circulam em cada fase da carga delta, para uma carga do tipo Potência Constante, é dada por (KERSTING, 2012):

$$\begin{cases} I_{ab} = \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}} \right)^* = \frac{|S_{ab}|}{E_{ab}} \angle (\delta_{ab} - \theta_{ab}) = |I_{ab}| \angle \alpha_{ab} \\ I_{bc} = \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}} \right)^* = \frac{|S_{bc}|}{E_{bc}} \angle (\delta_{bc} - \theta_{bc}) = |I_{bc}| \angle \alpha_{bc} \\ I_{ca} = \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}} \right)^* = \frac{|S_{ca}|}{E_{ca}} \angle (\delta_{ca} - \theta_{ca}) = |I_{ca}| \angle \alpha_{ca} \end{cases} \quad (3.53)$$

Por se tratar de uma carga conectada em delta, as correntes em cada fase não são coincidentes com as correntes de linha. A aplicação da lei de Kirchhoff das correntes, em cada nó da conexão da carga, dada na Figura 11, nos permite calcular as correntes de linha que uma carga em delta absorve (KERSTING, 2012):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Ou, na forma matricial:

$$[I_{abc}] = [DI] \cdot [I_{Labc}] \quad (3.55)$$

onde:

$$[DI] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

As Equações (3.53) e (3.55) modelam as correntes de cargas conectadas em delta.

3.3.2.4.3 Cargas Monofásicas e Bifásicas

Para a modelagem de cargas desequilibradas, as Equações (3.49), (3.53) e (3.55) são suficientes. Para cargas monofásicas e bifásicas, estas mesmas equações podem ser utilizadas, com uma diferença. Para os fases que alimentam a carga, as correntes são calculadas normalmente. Já para as fases que não possuem conexão com a carga, basta fixar estas correntes como nulas (KERSTING, 2012).

Este procedimento permite calcular as correntes, tanto para cargas conectadas à nós trifásicos, quanto para conexões em nós monofásicos e bifásicos, posto que os ramais que alimentam estes nós são modelados como matrizes generalizadas 3×3 .

3.3.2.4.4 Cargas Distribuídas

No contexto de SD, é possível haver a presença de cargas distribuídas. Estas cargas nada mais são do que múltiplos consumidores, com perfil similar, alimentados em diversos nós ao longo de uma determinada LD. Por suas cargas pontuais serem muito pequenas, se comparadas ao consumo global do SD, é uma prática comum somar as potências consumidas, e nomeá-las como carga distribuída ao longo de um ramo.

Entretanto, embora cada consumo individual possa ser pequeno, uma carga distribuída possui uma dimensão significativa, e precisa ser modelada. Para a modelagem de cargas distribuídas, um nó central imaginário é criado ao longo do ramal. Devido à impedância série Z_{abc} de uma LD ser diretamente proporcional ao seu comprimento, a

impedância série das LDs resultantes é composta por todos os elementos de Z_{abc} divididos por 2.

A carga distribuída total é então concentrada neste nó imaginário, e modelada de acordo com o tipo de conexão feita pelos consumidores locais, seja ela estrela ou delta.

3.4 Fluxo de Potência

Como ferramenta básica de análise de sistemas elétricos, o fluxo de potência permite calcular as tensões complexas na rede a partir de informações de geração e consumo.

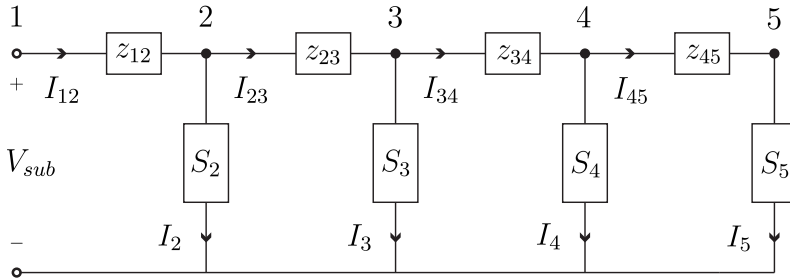
Neste trabalho, o fluxo de potência, proposto por (KERSTING, 2012), é utilizado como ferramenta de apoio. Devido às características particulares de SDs, métodos de fluxo de potência tradicionalmente usados em sistemas de transmissão, quando aplicados à distribuição, podem apresentar propriedades de convergência não desejáveis (TREVINO, 1970). Logo, a aplicação de um algoritmo de varredura dedicado a sistemas de distribuição trifásicos é a solução adotada.

O fluxo de potência por varredura considera que as cargas ao longo dos nós do SD são conhecidas, e que a subestação pode ser considerada uma barra infinita, a qual fornece energia à uma tensão especificada V_{sub} dependente da rede de transmissão e do *tap* do transformador da subestação. A partir destas informações, o algoritmo percorre os alimentadores do SD, em avanço e retrocesso, num processo iterativo diferenciado que se beneficia da operação radial destes sistemas.

Para uma melhor compreensão do fluxo de potência trifásico por método de varredura, primeiramente uma rede monofásica simples é analisada. Em seguida, este procedimento é estendido para comportar a modelagem de matrizes generalizadas, podendo assim ser utilizado para redes trifásicas.

3.4.1 Método de Varredura para uma Rede Monofásica

Considere o equivalente monofásico de um SD radial simples, apresentada na Figura 12, na qual a tensão V_{sub} é conhecida, assim como as cargas S_k , onde $k = 2, \dots, 5$.



Fonte (KERSTING, 2012). Modificado pelo autor.

Figura 12 – Equivalente Monofásico de um Alimentador Simples

Para este sistema, é necessário determinar as tensões complexas ao longo dos nós. Para tanto, o método de varredura será utilizado. Este fluxo de potência consiste num processo iterativo o qual, para cada iteração ℓ , duas meia iterações são realizadas:

- Varredura em avanço - Que permite atualizar as correntes nas cargas, I_k^ℓ ;
- Varredura em retrocesso - Que permite atualizar as tensões nos nós, V_k^ℓ ;

sendo que, para a primeira iteração, as correntes nas cargas são consideradas nulas, ou seja, $I_k^0 = 0$.

Cada iteração do fluxo de potência inicia-se ao estabelecer o valor da tensão na barra da subestação, V_1 , igualando-a à tensão especificada V_{sub} . Para uma dada iteração ℓ , esta inicialização é dada por:

$$V_1^{\ell-\frac{1}{2}} = V_{sub} \quad (3.57)$$

onde $V_1^{\ell-\frac{1}{2}}$ indica a tensão inicial de meia iteração.

No processo de varredura em avanço, também chamado de primeira meia iteração, calcula-se as tensões de meia iteração ao longo do alimentador, $V_k^{\ell-\frac{1}{2}}$. Este procedimento parte da aplicação da lei de Kirchhoff das Tensões em cada malha do alimentador. Por exemplo,

para calcularmos a tensão $V_2^{\ell-\frac{1}{2}}$, temos (KERSTING, 2012):

$$V_2^{\ell-\frac{1}{2}} = V_1^{\ell-\frac{1}{2}} - z_{12} \cdot I_{12}^{\ell-1} \quad (3.58)$$

sendo que a corrente I_{12} é calculada pela aplicação da lei de Kirchhoff das correntes no nó 2. Este processo continua, aplicando-se a teoria de circuitos para calcular as correntes de ramos e tensões nos nós, da subestação até o último nó terminal, ou seja, varrendo o sistema em avanço.

Com as tensões de meia iteração, considerando conhecida as cargas nos nós, é possível atualizar as correntes consumidas em cada nó k , por (KERSTING, 2012):

$$I_k^\ell = \left(\frac{S_k}{V_k^{\ell-\frac{1}{2}}} \right)^* \quad (3.59)$$

procedimento este que conclui a primeira meia iteração.

No processo de varredura em retrocesso, equivalente à segunda meia iteração do fluxo de potência, a partir das correntes calculadas pela Equação (3.59) atualiza-se as tensões em cada nó.

Para tanto, atualiza-se as tensões nos nós terminais, igualando-as à tensão calculada pela Equação (3.58):

$$V_{k_f}^\ell = V_{k_f}^{\ell-\frac{1}{2}}, \quad \forall k_f, \text{ equivalente a um nó final} \quad (3.60)$$

No caso da Figura 12, $k_f = 5$, e $V_5^\ell = V_5^{\ell-\frac{1}{2}}$.

Em seguida, aplica-se novamente a lei de Kirchhoff das tensões, buscando, a partir dos nós terminais, atualizar as tensões até a barra da subestação. Para o sistema da Figura 12, podemos calcular V_4^ℓ por:

$$V_4^\ell = V_5^\ell + z_{45} \cdot I_{45}^\ell \quad (3.61)$$

Novamente, as correntes nos ramos são calculadas através da aplicação da lei de Kirchhoff das correntes, no nó a jusante dos mesmos. Assim, percorre-se uma vez mais a rede de distribuição, só que desta vez numa varredura em retrocesso.

Ao término da segunda meia iteração, a iteração ℓ é concluída. A convergência do fluxo de potência ocorre quando a diferença entre a tensão calculada para a subestação, V_1^ℓ , e a tensão especificada da mesma, V_{sub} , for menor que uma tolerância pré-determinada:

$$\left\| V_1^\ell - V_{sub} \right\| \leq \epsilon \quad (3.62)$$

Caso contrário, $\ell = \ell + 1$, e uma nova iteração é efetuada.

3.4.2 Método de Varredura para a Modelagem Trifásica

É possível expandir o método de fluxo de potência por varredura para a modelagem trifásica por matrizes generalizadas, de maneira a determinar as tensões trifásicas $[V_{abc}]$ ao longo do SD.

A estrutura do fluxo de potência é mesma, sendo que cada iteração possui duas meia iterações, constituindo uma varredura em avanço, e outra em retrocesso. As correntes iniciais de cada nó k são consideradas nulas, e, no começo de cada iteração ℓ , a tensão de meia iteração no nó 1 é igualada à tensão especificada para a subestação:

$$\begin{cases} [V_{abc}]_1^{\ell-\frac{1}{2}} = [V_{sub}] = [E_{sub} \angle \delta_{sub}] \\ [I_{abc}]_k^0 = [0] \end{cases} \quad (3.63)$$

Com os dados da Equação (3.63), é possível descrever cada etapa de uma dada iteração ℓ do fluxo de potência.

3.4.2.1 Varredura em Avanço

Os procedimentos de varredura, para a modelagem por matrizes generalizadas, possui duas principais diferenças: os procedimentos de varredura são aplicados nos ramos, respeitando sua ordenação desde a subestação até os ramos finais, e vice-versa; e as atualizações de tensão são dadas pelas equações generalizadas, Equações (3.4), (3.5) e (3.6).

Primeiramente, para uma dada iteração ℓ , inicializam-se as correntes a montante e a jusante de cada um dos ramos. Caso seja a primeira iteração, $\ell = 1$, devido às correntes iniciais serem nulas, conforme a

Equação (3.63), estas correntes também o são.

$$\begin{cases} [I_{abc}]_u^{\ell-\frac{1}{2}} = [0] \\ [I_{abc}]_d^{\ell-\frac{1}{2}} = [0] \end{cases}, \forall \text{ ramo do SD} \quad (3.64)$$

Para as demais iterações, estas correntes são atualizadas pelas correntes obtidas na iteração anterior:

$$\begin{cases} [I_{abc}]_u^{\ell-\frac{1}{2}} = [I_{abc}]_u^{\ell-1} \\ [I_{abc}]_d^{\ell-\frac{1}{2}} = [I_{abc}]_d^{\ell-1} \end{cases}, \forall \text{ ramo do SD} \quad (3.65)$$

Com as correntes nos ramos inicializadas, e a tensão na subestação determinada pela Equação (3.63), a varredura em avanço tem início, varrendo os ramais, desde a subestação até os nós terminais, com base nas equações generalizadas.

Para um ramal qualquer do SD, as tensões a jusante do mesmo são atualizadas pela Equação (3.6), da seguinte maneira:

$$[V_{abc}]_d^{\ell-\frac{1}{2}} = [\mathcal{A}] \cdot [V_{abc}]_u^{\ell-\frac{1}{2}} - [\mathcal{B}] \cdot [I_{abc}]_d^{\ell-\frac{1}{2}} \quad (3.66)$$

A Equação (3.66) é sistematicamente aplicada à cada ramal do sistema, partindo dos ramais adjacentes à barra da subestação, e seguindo a rede até que todos os ramais sejam percorridos.

Devido à conexão radial do SD, o procedimento de varredura em avanço permite obter todas as tensões trifásicas de meia iteração, $[V_{abc}]_k^{\ell-\frac{1}{2}}$, para cada nó k do SD.

3.4.2.2 Atualização das Correntes de Carga

Ao término do processo de varredura em avanço, as correntes de carga precisam ser atualizadas. A Subseção 3.3.2.4 apresenta uma metodologia para a determinação das correntes consumidas em cada fase, de acordo com a conexão.

Para todo nó k com cargas conectadas em estrela, a corrente consumida em cada fase é atualizada pela Equação (3.49), considerando a

tensão obtida da varredura em avanço, $[V_{abc}]_k^{\ell-\frac{1}{2}}$:

$$[I_{abc}]_k^\ell = \left[\begin{array}{c} \frac{S_a}{V_a^{\ell-\frac{1}{2}}} \\ \frac{S_b}{V_b^{\ell-\frac{1}{2}}} \\ \frac{S_c}{V_c^{\ell-\frac{1}{2}}} \end{array} \right]_k^*, \quad \forall k \text{ com carga em estrela} \quad (3.67)$$

No caso de cargas conectadas em delta, o procedimento é mais elaborado. Primeiramente, são calculadas as tensões de linha, para todos os nós com carga em delta, através da aplicação da Equação (A.4) dos Anexos:

$$[V_{Labc}]_k^{\ell-\frac{1}{2}} = [D] \cdot [V_{abc}]_k^{\ell-\frac{1}{2}}, \quad \forall \text{ nó } k \text{ com carga em delta} \quad (3.68)$$

As correntes de fase da carga delta são calculadas aplicando a Equação (3.53), considerando a tensão de linha obtida na Equação (3.68).

$$[I_{Labc}]_k^\ell = \left[\begin{array}{c} \frac{S_{ab}}{V_{ab}^{\ell-\frac{1}{2}}} \\ \frac{S_{bc}}{V_{bc}^{\ell-\frac{1}{2}}} \\ \frac{S_{ca}}{V_{ca}^{\ell-\frac{1}{2}}} \end{array} \right]_k^*, \quad \forall k \text{ com carga em delta} \quad (3.69)$$

Por fim, através da aplicação da Equação (3.55), corrente de linha consumida em cada fase dos nós com carga delta é, finalmente, atualizada:

$$[I_{abc}]_k^\ell = [DI] \cdot [I_{Labc}]_k^\ell, \quad \forall k \text{ com carga em delta} \quad (3.70)$$

Com as correntes da iteração ℓ atualizadas, o processo de varredura em retrocesso pode ser iniciado.

3.4.2.3 Varredura em Retrocesso

A varredura em retrocesso para a modelagem trifásica é similar à varredura em avanço, no que diz respeito ao acompanhamento dos

ramais. Partindo dos ramais cujos nós k_f a jusante sejam nós terminais, as tensões a montante, assim como as correntes nos ramos, ao longo do SD, são atualizadas.

O processo inicia em todos os ramais finais do SD. Inicialmente, suas tensões a jusante são atualizadas, de maneira similar à Equação (3.60):

$$[V_{abc}]_d^\ell = [V_{abc}]_{k_f}^{\ell - \frac{1}{2}}, \quad \forall \text{ ramos finais do SD} \quad (3.71)$$

Suas correntes a jusante também são atualizadas, aplicando a lei de Kirchhoff das Correntes aos nós a jusante desses ramais. Por serem ramais terminais, as correntes a jusante são idênticas às correntes de carga nos nós finais k_f :

$$[I_{abc}]_d^\ell = [I_{abc}]_{k_f}^\ell, \quad \forall \text{ ramos finais do SD} \quad (3.72)$$

As tensões a montante deste ramais finais, são então atualizadas de acordo com a Equação (3.4):

$$[V_{abc}]_u^\ell = [\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d^\ell + [\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d^\ell \quad (3.73)$$

As correntes a montante dos ramais finais são atualizadas similarmente, desta vez de acordo com a Equação (3.5):

$$[I_{abc}]_u^\ell = [\mathbf{c}] \cdot [V_{abc}]_d^\ell + [\mathbf{d}] \cdot [I_{abc}]_d^\ell \quad (3.74)$$

O processo continua seguindo os ramos imediatamente a montante dos ramais finais. Devido às características construtivas do SD, as tensões a jusante destes novos ramais já foi atualizada. Uma nova aplicação (3.73) permite atualizar as tensões a montante. Entretanto, para estes novos ramais, as correntes a jusante precisam ser atualizadas.

Aplicando a lei de Kirchhoff das correntes em todos os nós k a jusante dos ramos não terminais, obtém-se:

$$[I_{abc}]_d^\ell = [I_{abc}]_k^\ell + \sum_{i \in \Omega_k} ([I_{abc}]_u^\ell)_i \quad (3.75)$$

onde Ω_k é o conjunto de ramos a jusante do nó k .

A aplicação das Equações (3.73), (3.74) e (3.75), em todos os ramos, partindo dos ramos finais, até o ramo da subestação, constitui no processo de varredura em retrocesso.

No final da segunda meia iteração, a tensão atualizada da subestação é comparada à tensão especificada. Caso a norma infinita da diferença entre $[V_{abc}]_1^\ell$ e $[V_{sub}]$:

$$\left\| [V_{abc}]_1^\ell - [V_{sub}] \right\|_\infty \leq \epsilon \quad (3.76)$$

for menor que a tolerância especificada, o fluxo de potência converge corretamente. Caso contrário, há um incremento na iteração, $\ell = \ell + 1$, e o processo de varredura é reiniciado.

3.5 Comentários Sobre a Modelagem de SD

Com a modelagem apresentada, é possível descrever de maneira muito precisa os SDs. Entretanto, a aplicação prática deste modelo requer alguns comentários, de forma a delinear possíveis dificuldades encontradas, assim como destacar soluções.

3.5.1 Modelo em *Por Unidade*

Em processos de estimação de estados, assim como em aplicações práticas de fluxo de potência, é natural o uso do sistema *p.u.*. Entretanto, este tópico não é tratado em detalhes em (KERSTING, 2012), onde todos os sistemas, incluindo a determinação das matrizes generalizadas, são dados em unidades reais.

Entretanto, para normalização, muito comum em processos de estimação de estados e análise de erros grosseiros, a modelagem por unidades reais pode apresentar problemas computacionais. Uma modelagem em *p.u.*, além de padronizada, não implicaria em dificuldades desnecessárias na implementação de técnicas corretivas.

Para tanto, no Apêndice A, um procedimento o qual permite a determinação das matrizes generalizadas em *p.u.* para qualquer elemento do SD é desenvolvido. Com esta metodologia, as Equações (3.4), (3.5) e (3.6) podem ser aplicadas, considerando que as tensões e correntes

empregadas estejam referenciadas aos seus correspondentes valores em *p.u.*.

Neste trabalho, apesar de os diversos elementos serem modelados por fins didáticos em unidades reais, a aplicação prática parte do uso da matrizes generalizadas em *p.u.*, tanto para o uso do fluxo de potência, quanto para o processo de EESD.

3.5.2 Extinção de Nós e Aglutinação de Ramos

Muitos dos elementos do SD, principalmente o transformador com conexão delta-delta, e os reguladores de tensão, possuem matrizes generalizadas $[\mathcal{B}]$ não inversíveis. Entretanto, como apresentado em capítulo subsequente, esta inversão é necessária para o estimador de estados proposto.

A solução para este problema encontra-se na aglutinação de elementos em cascata, descrito no Apêndice B, posto que normalmente estes ramos encontram-se em série com LDs trifásicas, para as quais as matrizes generalizadas correspondentes $[\mathcal{B}]$ possuem inversa.

Os dois elementos são aglutinados em um ramo equivalente, e o nó intermediário é eliminado do SD. A matriz $[\mathcal{B}_{eq}]$ pode ser invertida, e assim utilizada na EESD, resolvendo o problema para muitos casos encontrados na modelagem de SD.

Além disso, a redução dos nós implica em menos etapas no processo de fluxo de potência, assim como menos variáveis de estados a serem estimadas pelo estimador.

Embora existam outras soluções para este problema, como a análise linear de Jacobianos, a utilização das leis de Kirchhoff, e a inserção de LD com impedância série desprezível, a solução de aglutinação é adotada neste trabalho.

3.5.3 Bancos de Capacitores

Como elemento importante de regulação de tensão, os bancos de capacitores são essenciais para o controle da tensão, ainda mais quando considerada a presença de GD no sistema.

Nesta dissertação, os bancos de capacitores são modelados como cargas fixas, de potência constante, cuja injeção de reativo é somada

ao consumo de potência nos seus respectivos nós. Este processo leva em consideração a conexão dos bancos de capacitores e das cargas, de acordo com a Subseção [3.3.2.4](#).

3.6 Conclusões

Neste capítulo são exibidos diversos aspectos do uso, modelagem e aplicação prática ferramentas de análise de SD. O método de matrizes generalizadas é exposto e um fluxo de potência é apresentado.

No Capítulo [4](#) um EESD é desenvolvido considerando a modelagem abordada neste capítulo, dando assim continuação à fundamentação teórica deste trabalho.

4 Estimador de Estados para Sistemas de Distribuição

4.1 Introdução

De posse de uma modelagem mais abrangente de SDs, como visto no Capítulo 3, é preciso desenvolver as ferramentas necessárias para o monitoramento destes sistemas. A primeira destas ferramentas, a estimação de estados, é o foco deste capítulo.

A partir de informações topológicas, dados relativos aos componentes do sistema e de um plano de medição bem estruturado, o processo de EESD permite o acompanhamento das tensões complexas ao longo do SD.

Neste capítulo, um estimador de estados desenvolvido para SDs é apresentado. Aspectos relativos à formação do plano de medição em SD são discutidos, com ênfase na garantia da observabilidade do sistema. Em seguida, o estimador é formulado matematicamente como um problema de minimização da soma ponderada dos quadrados dos resíduos de medição. São descritos também os equacionamentos das grandezas mensuradas, com base na modelagem do Capítulo 3, assim como a formação da matriz Jacobiano.

4.2 Composição do Plano de Medição

O processo de estimação de estados precisa de dois dados de entrada: a configuração da rede e o plano de medição. Com a configuração da rede, o operador é capaz de determinar a topologia do sistema de potência, com base nos *status* dos disjuntores no nível de seção de barra. Este procedimento é vital, pois informações discrepantes acerca destes disjuntores podem acarretar erros de topologia, comprometendo seriamente o processo de estimação de estados. O plano de medição permite, por sua vez, fornecer informações em tempo real ao operador acerca do consumo de potência, fluxos, correntes e tensões ao longo do SD.

Em suma, a configuração de rede interliga as informações contidas no plano de medição, e o estimador de estados obtém a estimativa das tensões que é a mais embasada por estes dois conjuntos de dados.

O processamento de erros de topologia é um tópico que transcende aos objetivos deste trabalho. Em consequência, supõe-se que a topologia disponível ao operador é correta, ou seja, erros de topologia não estão presentes. É preciso então descrever a formação do plano de medidas utilizado para o monitoramento em tempo real de sistemas de distribuição.

4.2.1 Observabilidade do Plano de Medição

A viabilidade da estimação de estados é diretamente relacionada com a observabilidade do plano de medição do sistema. Um sistema de potência é considerado observável com relação à um plano de medição, ou conjunto de medidas, se as variáveis de estado do sistema, ou seja, módulo e ângulo das tensões, puderem ser determinadas por um estimador de estados (QUINTANA; SIMÕES COSTA; MANDEL, 1982).

Para um sistema com n_e variáveis de estado, o número mínimo de medições e informações m para que a observabilidade global do plano de medição seja assegurada é dado por:

$$m = n_e \quad (4.1)$$

Em outras palavras, caso um plano de medição contenha n_e medidas, a estimação de estados é possível.

Entretanto, para que técnicas de análise de erros grosseiros sejam empregadas, é necessário haver uma redundância de informações e medições no sistema pois, em caso contrário, medidas críticas (CLEMENTS; KRUMPHOLZ; DAVIS, 1981), (SIMÕES COSTA, 1988), e conjuntos críticos (CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA; MILI, 1984), (SIMÕES COSTA, 1988), se fazem presentes.

Uma medida crítica contém informações cruciais acerca de um determinado estado do sistema. Seu resíduo normalizado, resultante do processo de estimação de estados, é nulo, e a remoção desta informação do plano de medições resulta na perda de observabilidade

(CLEMENTS; KRUMPHOLZ; DAVIS, 1981). Um conjunto crítico é um conjunto de duas ou mais medidas (par crítico, trio crítico, e assim por diante) o qual contém as únicas informações sobre um determinado estado ou conjuntos de estados. É possível demonstrar que os resíduos normalizados de medidas pertencentes a conjuntos críticos são idênticos em magnitude, ou seja, na presença de erros grosseiros, é impossível discernir quais medições são espúrias (CLEMENTS; KRUMPHOLZ; DAVIS, 1981), (CUTSEM; RIBBENS-PAVELLA; MILI, 1984).

É interessante compreender estes dois conceitos, posto que as medidas disponíveis em tempo real em SDs são normalmente escassas, o que pode acarretar planos de medição com medidas e conjuntos críticos, ou até mesmo não observáveis (LOURENÇO, 2001), (SIMÕES COSTA; VIEIRA, 2001).

A redundância global do plano de medidas é dada por:

$$\rho = \frac{m}{n_e} \quad (4.2)$$

Para que a observabilidade do plano de medição seja assegurada, e para que técnicas de análise de erros grosseiros possam ser aplicadas corretamente, o valor de ρ deve ser significativamente maior que 1. Em sistemas de transmissão, os níveis de redundância usuais situam-se entre 2,0 e 3,0.

Neste trabalho, três tipos de informações são utilizadas para a garantia de um plano de medidas redundante:

- Medidas oriundas do sistema supervisor (sistema SCADA) e rede AMI (medidores inteligentes);
- Pseudomedidas provenientes de estudos de previsão de carga;
- Restrições *operacionais* e *estruturais* de igualdade.

4.2.2 Medidores de Supervisão

Planos de medição físicos para sistemas de distribuição são compostos por dois tipos diferentes de medidores: convencionais e inteligentes.

A medição convencional constitui um plano de medidas similar ao de sistemas SCADA, mas com poucas medições, usualmente localizadas

na subestação. É composta de medições de magnitude de tensão e de fluxo de potência ativa e reativa, assim como medidas de magnitude de corrente. Para evitar erros no processo de estimação, as medições de corrente são processadas como medidas do quadrado da magnitude de corrente (GEISLER, 1984). Além disto, estas medidas são inseridas apenas com o intuito de aumentar a redundância global.

O uso de medidores inteligentes também é levado em consideração. A infraestrutura avançada de medição (AMI) formada por estes dispositivos monitora as barras distantes da subestação, através da medição de injeções de potência e magnitudes de tensão.

Estes dois grupos de medição, SCADA e AMI, formam um sistema de medição supervísório, e ajudam a construir o plano de medidas. As diferenças nas taxas de amostragem e aquisição destes diferentes dispositivos são fatores desconsiderados neste trabalho.

4.2.3 Pseudomedidas de Injeção

Apesar do sistema supervísório apresentado aparentar ser amplo, dependendo da dimensão do sistema AMI, a observabilidade do sistema pode não ser assegurada. Ainda há o risco das medições de corrente serem medidas críticas, o que faria com que o estimador pudesse gerar múltiplas soluções (GEISLER, 1984).

Para enriquecer a redundância do plano de medição, são usadas pseudomedidas de injeção de potência associadas às barras com consumidores (BARAN; KELLEY, 1994). São informações de previsão de carga, que estimam o consumo horário de cada cliente do SD, e que são processadas como um medidor fictício, dentro do processo de estimação de estados, de forma a obter um plano de medição devidamente observável.

Por não serem medidas em tempo real, trazem uma maior incerteza quanto à qualidade da sua medição. Para simular esta imprecisão, utilizam-se valores maiores de variância associadas a estas pseudomedidas.

4.2.4 Restrições de Igualdade

Outro tipo de informação que constitui o plano de medição são as restrições de igualdade. Estas restrições representam condições estruturais e operativas às quais o SD está submetido.

Embora não representem medições propriamente ditas, estas restrições ainda assim carregam informações relativas ao sistema, e ajudam na garantia da observabilidade, assim como no aumento da redundância global.

Diferentemente das medidas, entretanto, estas informações não são modeladas probabilisticamente, mas sim, deterministicamente. Em termos práticos, isto significa que as variâncias associadas a estas informações são consideradas nulas, embora na prática sejam utilizados valores muito pequenos, várias ordens de grandeza menores do que as das medidas e pseudomedidas.

4.3 Representação das Informações

A partir do plano de medição do sistema, e com as informações topológicas disponíveis, é possível inicializar o processo de estimação de estados. Assim sendo, faz-se necessário representar as diferentes informações do plano, de forma a determinar a maneira como estes dados serão processados pelo estimador.

Pode-se dividir as informações do plano de medição em duas categorias:

- Probabilísticas e;
- Determinísticas.

As informações probabilísticas são aquelas provenientes de medidores e pseudomedidas, e são modeladas na função objetivo da EESD, dentro do problema de otimização. São informações sujeitas a erros de medição, e por isso são modeladas em base estatística, de acordo com a variância de sua medição.

As informações determinísticas são provenientes de restrições *estruturais* e *operacionais* do sistema. São dados fixos do problema,

representando condições as quais o SD está garantidamente submetido. Tais informações são modeladas como restrições de igualdade no problema de otimização.

4.3.1 Modelagem das Informações Probabilísticas

As informações probabilísticas, provenientes de medidas e pseudomedidas, podem ser matematicamente expressas por (GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985):

$$v_m = v_{real} + \eta_m \quad (4.3)$$

Ou seja, os valores capturados pelos medidores, v_m , são iguais aos valores reais das quantidades medidas, v_{real} , poluídos por um erro aleatório, η_m . Este erro decorre de diversos fatores, como por exemplo, o erro de escala dos medidores, imprecisões transformadores de instrumentação, perda de dados devido à conversões analógico/digital, erros provenientes dos estudos de previsão de caso, etc.

O vetor η_m dos erros pode ser considerado uma variável aleatória normal, com média zero, e matriz de covariância R_m , ou seja (LOURENÇO, 2001):

$$\mathcal{E}\{\eta_m\} = 0 \quad (4.4)$$

$$\mathcal{E}\{\eta_m \cdot \eta_m^T\} = R_m \quad (4.5)$$

onde $\mathcal{E}\{\cdot\}$ é o operador esperança matemática. Pode-se ainda considerar que os erros de medição não são correlacionados, o que implica em uma matriz R_m diagonal, cujos elementos diagonais correspondem às variâncias da suas respectivas medições. Como será visto a seguir, os elementos da matriz R_m são definidos em função dos valores medidos e da precisão das medidas.

A partir da modelagem do SD, um conjunto de equações pode ser determinado, de forma a obter o vetor v_{real} em função do vetor de estados x :

$$h_m(x) = v_{real} \quad (4.6)$$

onde x representa as magnitudes e ângulos das tensões ao longo do SD:

$$x \triangleq \begin{bmatrix} [\delta_{abc}]_1 \\ [\delta_{abc}]_2 \\ \vdots \\ [\delta_{abc}]_{n_b} \\ [E_{abc}]_1 \\ \vdots \\ [E_{abc}]_{n_b} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Assim, substituindo (4.6) em (4.3), pode-se obter a representação matemática das medições:

$$v_m = h_m(x) + \eta_m \quad (4.8)$$

Por fim, os elementos da diagonal principal da matriz de covariância R_m podem ser calculados através de (DOPAZO; KLITIN; VANSLYCK, 1972):

$$R_{m(i,i)} = (v_{mi} \cdot \sigma_i)^2 + \sigma_i^2 \quad (4.9)$$

onde σ_i é o desvio padrão associado à medida ou pseudomedida i .

4.3.2 Modelagem das Informações Determinísticas

De maneira similar às medidas e pseudomedidas, é preciso estipular a modelagem das restrições de igualdade da EESD. Para tanto, é necessário não apenas descrever a representação vetorial destas restrições, como também a forma como serão constituídas as restrições *estruturais* e *operacionais*.

4.3.2.1 Restrições Estruturais

Representam condições fixas do SD, de acordo com a topologia e estrutura da rede. Nesta dissertação, duas são as restrições *estruturais* as quais o SD pode estar sujeito: ângulos da barra da subestação

equilibrados; e nós de passagem ou injeção nula (sem a presença de consumidores conectados).

A barra da subestação alimenta o sistema de acordo com a tensão proveniente do sistema de transmissão. Assim sendo, considerando-se este sistema equilibrado e estabelecendo-se referência nula na fase a da barra da subestação, esta restrição pode ser definida por:

$$\begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_b \\ \delta_c \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} = [\delta_{abc}]_i - \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{2\pi}{3} \\ \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix} = [0] \quad (4.10)$$

Os nós de passagem, ou injeção nula, são nós do sistema nos quais não há conexões com consumidores ou geradores. Assim sendo, não há potência injetada nestes pontos. Estes nós podem ser removidos do SD, através da aglutinação de elementos, conforme descrito no Apêndice B. Entretanto este processo, por mais que reduza a dimensão do sistema, faz com que se perca informações acerca das tensões naqueles pontos.

Caso não sejam removidos, estes nós podem ser representados igualando as potências injetadas nos mesmos, em função dos estados, com um vetor nulo:

$$\begin{cases} [P_{abc}(x)]_i = [0] \\ [Q_{abc}(x)]_i = [0] \end{cases} \quad (4.11)$$

Ambas as restrições descritas pelas Equações (4.10) e (4.11) podem ser representadas por um único vetor de restrições *estruturais*:

$$h_s(x) = [0] \quad (4.12)$$

4.3.2.2 Restrições Operacionais

As restrições *operacionais* ditam a condição operativa do sistema. Para o caso de um SD com fontes de GD, as diferentes condições de operação do sistema podem ser determinadas pelos *status* dos diversos disjuntores (CLEMENS; SIMÕES COSTA et al., 1998), assim como os diferentes perfis de geração distribuída.

Neste trabalho, considera-se que a topologia do sistema é conhecida, não havendo necessidade de modelar os disjuntores. Além disso, os

taps dos transformadores e reguladores de tensão são conhecidos, e modelados nas matrizes generalizadas dos mesmos, conforme discutido na Subseção 3.3.2.3.

A modelagem das restrições *operacionais* relativas à GD é realizada a partir do balanço energético nos nós que apresentam este tipo de geração, em função dos estados do sistema:

$$\begin{cases} [P_{abc}(x)]_i + [P_{abc}]_{GD} - [P_{abc}]_{load} = [0] \\ [Q_{abc}(x)]_i + [Q_{abc}]_{GD} - [Q_{abc}]_{load} = [0] \end{cases} \quad (4.13)$$

Para este trabalho, supõe-se que as barras com GD possuem carga nula, ou seja:

$$\begin{cases} [P_{abc}]_{load} = [0] \\ [Q_{abc}]_{load} = [0] \end{cases} \quad (4.14)$$

Caso o operador possua informações a respeito das quantidades geradas pelas fontes de GD do sistema, estes dados são inseridos na Equação (4.13). Se não houver informações confiáveis, ou ainda, caso não existam dados a respeito do perfil de geração de uma ou mais fontes de GD, considera-se que as fontes não estão em operação, ou seja:

$$\begin{cases} [P_{abc}]_{GD} = [0] \\ [Q_{abc}]_{GD} = [0] \end{cases} \quad (4.15)$$

Genericamente, as restrições operacionais podem ser representadas por:

$$h_o(x) = [0] \quad (4.16)$$

4.3.2.3 Modelagem do Nível de Incerteza das Restrições

No processo de estimação de estados, além da modelagem das equações que determinam a modelagem das informações, é importante também modelar as covariância associada com cada medida e restrição.

A covariância contém informações com respeito à precisão e qualidade da medição. Em outras palavras, ela indica o grau de confiança que o estimador associará àquela informação, e o quanto cada medida e restrição influencia no resultado final.

A Equação (4.5) apresenta a modelagem da matriz de covariância das informações probabilísticas. Conforme já mencionado, estas informações são susceptíveis a erros, e suas covariâncias em geral apresentam a mesma ordem de grandeza.

Para que o processo de EESD considere a influência das informações determinísticas, é conveniente considerá-las como probabilísticas, o que implica em associar variâncias às restrições *estruturais* e *operacionais*. Por se tratar de informações determinísticas, teoricamente estas variâncias são nulas. Assim, as matrizes de covariância das restrições *estruturais* e *operacionais* são dadas por:

$$\begin{cases} R_s = [0] \\ R_o = [0] \end{cases} \quad (4.17)$$

Entretanto, por razões práticas, conforme discutido na Subseção 4.4.1, o uso da Equação (4.17) pode acarretar dificuldades computacionais. Para contornar este problema, é necessário que R_s e R_o sejam não-singulares.

É possível obter matrizes de covariância inversíveis, considerando as informações determinísticas como variáveis aleatórias normais, de maneira similar às medidas e pseudomedidas, porém com desvios-padrão muito menores do que os das informações probabilísticas, ou seja:

$$\sigma_s, \sigma_o \ll \sigma_m \quad (4.18)$$

A partir da consideração de que as informações probabilísticas não possuem correlação umas com as outras, as matrizes de covariância das restrições *estruturais* e *operacionais* utilizadas neste trabalho são portanto definidas como:

$$\begin{cases} R_s = \mathcal{G} \cdot [U] \\ R_o = \mathcal{G} \cdot [U] \end{cases} \quad (4.19)$$

onde \mathcal{G} é um valor muito pequeno, de forma a satisfazer a relação dada pela Equação (4.18) (Nesta dissertação, $\mathcal{G} = 10^{-8}$).

4.4 Formulação Matemática do Estimador de Estados

O processo de estimação de estados pode ser formulado como um problema de otimização, onde busca-se obter a melhor estimativa dos estados do sistema, \hat{x} , de maneira a minimizar a soma ponderada dos quadrados dos resíduos de medição.

Os resíduos de medição são estipulados a partir dos vetores v_m e $h_m(x)$, reescritos em função dos estados:

$$r_m = v_m - h_m(x) \quad (4.20)$$

Para um SD, com o vetor de estados x dado pela Equação (4.7), o número de estados a serem estimados é dado por:

$$n_e = 6.n_b \quad (4.21)$$

A partir da Equação (4.20), é possível determinar matricialmente a função objetivo do problema de otimização:

$$J(x) = r_m(x)^T \cdot R_m^{-1} \cdot r_m \quad (4.22)$$

onde os resíduos são ponderados pela inversa da matriz covariância dos erros de medição R_m . Esta ponderação é interessante pois atribui maior peso às medições mais precisas, cujas variâncias são pequenas, enquanto relaxa as medições mais susceptíveis a erros, cujas variâncias são maiores.

A estimação de estados pode ser então definida através da formulação do problema de minimização da função $J(x)$, sujeita às definições de resíduo, Equação (4.6), e restrições de igualdade, Equações (4.12) e (4.16), e expresso da seguinte maneira (CLEMENTS; SIMÕES COSTA et al., 1998):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & \frac{1}{2} \cdot r_m^T \cdot R_m^{-1} \cdot r_m \\ \text{sujeito à} \quad & r_m = v_m - h_m(\hat{x}) \\ & h_s(\hat{x}) = [0] \\ & h_o(\hat{x}) = [0] \end{aligned} \quad (4.23)$$

sendo \hat{x} o vetor dos estados estimados.

4.4.1 Resolução do Problema de Otimização

Para resolver o problema de otimização com restrições de igualdade, dado pela Equação (4.23), é necessário desenvolver a função Lagrangiana. Para tanto, atribui-se multiplicadores de Lagrange para as restrições de igualdade da Equação (4.23), agregando-as à função objetivo:

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\hat{x}, r, \lambda) = & \frac{1}{2} \cdot r_m^T \cdot R_m^{-1} \cdot r_m - \lambda_m^T \cdot (h_m(\hat{x}) - v_m + r_m) \\ & - \lambda_s^T \cdot (h_s(\hat{x})) - \lambda_o^T \cdot (h_o(\hat{x})) \end{aligned} \quad (4.24)$$

A solução ótima para a Equação (4.24) é obtida através da satisfação das condições necessárias de otimalidade, através da derivação parcial da função Lagrangiana em relação às suas variáveis (CASTILLO et al., 2011):

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \hat{x}} = -H_m^T(\hat{x}) \cdot \lambda_m - H_s^T(\hat{x}) \cdot \lambda_s - H_o^T(\hat{x}) \cdot \lambda_o = [0] \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial r} = R_m^{-1} \cdot r_m - \lambda_m = [0] \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_m} = h_m(\hat{x}) - v_m + r_m = [0] \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_s} = h_s(\hat{x}) = [0] \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_o} = h_o(\hat{x}) = [0] \quad (4.29)$$

onde:

$$\begin{cases} H_m(\hat{x}) = \frac{\partial h_m(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \\ H_s(\hat{x}) = \frac{\partial h_s(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \\ H_o(\hat{x}) = \frac{\partial h_o(\hat{x})}{\partial \hat{x}} \end{cases} \quad (4.30)$$

são as matrizes Jacobianas das equações não lineares que modelam as medidas e restrições, $h_m(\hat{x})$, $h_s(\hat{x})$ e $h_o(\hat{x})$, com relação às variáveis de estado, \hat{x} .

Para o processo de estimação de estados, é interessante linearizar este sistema de equações não lineares, em torno de um determinado vetor de estados \hat{x}^ℓ dado. Isto é feito através do uso da série de Taylor, aplicando o truncamento após a primeira derivada. Assim:

$$\begin{cases} h_m(\hat{x}) &= h_m(\hat{x}^\ell) + H_m(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} \\ h_s(\hat{x}) &= h_s(\hat{x}^\ell) + H_s(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} \\ h_o(\hat{x}) &= h_o(\hat{x}^\ell) + H_o(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} \end{cases} \quad (4.31)$$

Resolvendo a Equação (4.26) para r_m :

$$r_m = R_m \cdot \lambda_m \quad (4.32)$$

substituindo-se a Equação (4.32) nas equações (4.25), (4.26), (4.27) e (4.28), e aplicando a linearização dada pela Equação (4.31), pode-se reescrever as condições de otimalidade (LOURENÇO, 2001):

$$\begin{cases} -v_m + h_m(\hat{x}^\ell) + H_m(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} + R_m \cdot \lambda_m &= [0] \\ h_s(\hat{x}^\ell) + H_s(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} &= [0] \\ h_o(\hat{x}^\ell) + H_o(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} &= [0] \\ H_m^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_m + H_s^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_s + H_o^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_o &= [0] \end{cases} \quad (4.33)$$

Por fim, para melhorar a estabilidade numérica do problema EESD, é necessário inserir as matrizes de covariância das restrições de igualdade, no sistema dado pela Equação (4.33). Embora as matrizes R_s e R_o sejam teoricamente nulas, como mostra a Equação (4.17), na subseção 4.3.2.3 é apresentado sua representação prática, dada pela Equação (4.19). É possível mostrar que estas considerações levam à seguinte forma revisada da Equação (4.33):

$$\begin{cases} -v_m + h_m(\hat{x}^\ell) + H_m(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} + R_m \cdot \lambda_m &= [0] \\ h_s(\hat{x}^\ell) + H_s(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} + R_s \cdot \lambda_s &= [0] \\ h_o(\hat{x}^\ell) + H_o(\hat{x}^\ell) \cdot \Delta\hat{x} + R_o \cdot \lambda_o &= [0] \\ H_m^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_m + H_s^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_s + H_o^T(\hat{x}^\ell) \cdot \lambda_o &= [0] \end{cases} \quad (4.34)$$

O problema dado pela Equação (4.34) pode ser solucionado pelo método da matriz aumentada de Hatchel, também conhecido como

Tableau Esparso (GJELSVIK; AAM; HOLTEN, 1985), através de sua representação matricial (LOURENÇO, 2001):

$$\begin{bmatrix} [0] & H(\hat{x}^\ell)^T \\ H(\hat{x}^\ell) & R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ v - h(\hat{x}^\ell) \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

onde:

$$H(\hat{x}^\ell) = [H_m^T(\hat{x}^\ell) \quad H_s^T(\hat{x}^\ell) \quad H_o^T(\hat{x}^\ell)]^T \quad (4.36)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_m & [0] & [0] \\ [0] & R_s & [0] \\ [0] & [0] & R_o \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

$$\lambda = [\lambda_m \quad \lambda_s \quad \lambda_o]^T \quad (4.38)$$

$$v = [v_m \quad [0] \quad [0]]^T \quad (4.39)$$

$$h(\hat{x}^\ell) = [h_m^T(\hat{x}^\ell) \quad h_s^T(\hat{x}^\ell) \quad h_o^T(\hat{x}^\ell)]^T \quad (4.40)$$

Também por razões computacionais, costuma-se substituir a submatriz nula na matriz Tableau, do lado esquerdo da Equação (4.35), por uma matriz identidade, de dimensão apropriada, multiplicada por uma constante K muito pequena.

Resolvendo o problema linear da Equação (4.35), é possível atualizar a estimativa dos estados. através de:

$$\hat{x}^{\ell+1} = \hat{x}^\ell + \Delta\hat{x} \quad (4.41)$$

Assim, a partir de uma estimativa inicial, \hat{x}^0 igual à partida plana, ou seja, tensões iguais à 1 e ângulos nulos:

$$\hat{x}^0 = \begin{bmatrix} [0] \\ [1] \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

a estimação de estados pode ser solucionada através de um processo iterativo, onde, a cada iteração ℓ , aplica-se as Equações (4.35) e (4.41).

A convergência ocorre quando a norma euclidiana de $\Delta\hat{x}$ for menor que uma tolerância pré-especificada:

$$\|\Delta\hat{x}\|_2 \leq \epsilon \quad (4.43)$$

A aplicação deste procedimento de estimação de estados é interessante para a metodologia proposta principalmente pelo fato de que a solução do Tableau Esparsa fornece também os multiplicadores de Lagrange λ_m , λ_s e λ_o , relativos aos três tipos de informação contidas no processo da EESD. Estes vetores representam a sensibilidade da função objetivo, com relação às suas restrições (GJELSVIK, 1993), e serão utilizados nos processos de detecção de erros grosseiros.

4.5 Vetor de Equações e Matriz Jacobiana

Como visto na Seção 4.4, o problema de EESD consiste em resolver o sistema linear dado pela Equação (4.35). Entretanto, ao longo de todo o capítulo, as informações são modeladas através do vetor de equações $h(x)$, dado pela Equação (4.40), em função das variáveis de estado.

Tanto o vetor $h(x)$, quanto sua matriz Jacobiana, $H(x)$, precisam ser melhor detalhados, de forma a possibilitar a EESD. A modelagem dada no Capítulo 3 é então explorada, de forma a permitir o equacionamento destas variáveis.

4.5.1 Natureza Trifásica das Informações

Antes de apresentar o equacionamento dos elementos de $h(x)$ e $H(x)$, é preciso fazer uma importante ressalva. Na Subseção 3.3.2.1.3, é discutida a modelagem de linhas de distribuição (LD) bifásicas e monofásicas. Suas matrizes $[Z_{abc}]$ são expandidas, através da adição de linhas e colunas nulas relativas às fases inexistentes. Este procedimento cria fases imaginárias nos nós conectados a estas LDs. Assim sendo, o sistema torna-se completamente trifásico, mesmo que virtualmente.

Na Equação (4.7), a estrutura do vetor apresentada já leva em consideração este efeito. A quantidade de estados a serem estimados, dada pela Equação (4.21), também parte deste pressuposto.

É preciso, então, comentar a respeito de medições efetuadas em ramos bifásicos e monofásicos, assim como nos nós que são alimentados por estas LDs.

Neste trabalho, todas as medidas e restrições são consideradas trifásicas. Ou seja, contém dados a respeito das fases a , b e c no ponto da medição. Para os componentes e nós trifásicos, esta premissa não acarreta problemas.

Em nós e ramais monofásicos e bifásicos, entretanto, não há a presença de medidores trifásicos, o que vai contra pressuposto adotado. Existem várias maneiras de contornar esta dificuldade, até porque o vetor de estados considera as tensões fase a fase, e não nó a nó. Entretanto, para os elementos que foram virtualmente ampliados, vamos considerar também a ampliação das quantidades medidas, através da inserção de medidas virtuais nulas relativas às fases fictícias.

Suponha, por exemplo, que em um nó monofásico i , conectado à fase c do SD, haja uma medição de potência ativa consumida:

$$v_{P_i} = [P_c]_i \quad (4.44)$$

Com o procedimento adotado, esta medição pode ser facilmente expandida para uma medição trifásica, assim:

$$v_{P_i} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ P_c \end{bmatrix}_i \quad (4.45)$$

Este processamento da informação é importante, para a determinação de $h(x)$ e $H(x)$.

4.5.2 Cálculo de Elementos de $h(x)$ e $H(x)$

Independente de representar medidas ($h_m(x)$), ou restrições de igualdade ($h_s(x)$ e $h_o(x)$), o vetor de equações $h(x)$ fornece o valor de uma determinada informação ou medição, em função das variáveis de estado x .

Além de $h(x)$, a sua matriz Jacobiana, $H(x)$, exerce um importante papel, não apenas devido ao cumprimento das condições de otimalidade,

como também através da linearização de $h(x)$, dado pela Equação (4.31).

Na Seção 4.2, são apresentados todos os tipos de informação que são utilizadas na EESD. São eles:

- Magnitude de tensão;
- Magnitude de corrente ao quadrado;
- Fluxo de potência ativa e reativa;
- Injeção de potência ativa e reativa.

Para a aplicação da modelagem proposta no Capítulo 3, é necessário utilizar algumas das equações generalizadas, definidas pelas Equações (3.5) e (3.6), reescritas abaixo:

$$[I_{abc}]_u = [c] \cdot [V_{abc}]_d + [d] \cdot [I_{abc}]_d \quad (4.46)$$

$$[V_{abc}]_d = [A] \cdot [V_{abc}]_u - [B] \cdot [I_{abc}]_d \quad (4.47)$$

É importante levar em consideração a estrutura do vetor de estados, apresentada na Equação (4.7). Lembrando que a dimensão deste vetor é dada pela Equação (4.21), temos que as tensões complexas em um nó genérico i podem ser acessadas através de:

$$[V_{abc}]_i = \begin{bmatrix} x_{(3.n_b+3.i-2)} \angle x_{(3.i-2)} \\ x_{(3.n_b+3.i-1)} \angle x_{(3.i-1)} \\ x_{(3.n_b+3.i)} \angle x_{(3.i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \angle \delta_a \\ E_b \angle \delta_b \\ E_c \angle \delta_c \end{bmatrix}_i \quad (4.48)$$

4.5.2.1 Magnitude de Tensão

De todas as informações adquiridas pelo plano de medição, as medidas de magnitude de tensão são as de formulação mais simples, posto que estão presentes diretamente no vetor de estados.

Assim, uma medida de tensão trifásica em um nó i pode ser expressa por:

$$h_{E_i} = [E_{abc}]_i = \begin{bmatrix} x_{(3.n_b+3.i-2)} \\ x_{(3.n_b+3.i-1)} \\ x_{(3.n_b+3.i)} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Por se tratar de uma medição trifásica, o Jacobiano relativo à $h_{E_i}(x)$ é uma matriz de dimensão $3 \times n_e$. Assim sendo, é possível separar $H_{E_i}(x)$ em blocos 3×3 , relativos às fases a , b e c de cada nó. Estes blocos, que representam derivadas parciais com relação à variáveis inseridas em x , podem ser determinados por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [E_{abc}]_k} &= [U] \quad , \text{ Para } k = i; \\ \frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [E_{abc}]_k} &= [0] \quad , \text{ Para } k \neq i; \\ \frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_k} &= [0] \quad , \forall k. \end{aligned} \quad (4.50)$$

Por fim, a matriz Jacobiana $H_{E_i}(x)$ pode ser determinada a partir destes blocos, por:

$$H_{E_i}(x) = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_1} \right]^T \\ \vdots \\ \left[\frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_{n_b}} \right]^T \\ \left[\frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [E_{abc}]_1} \right]^T \\ \vdots \\ \left[\frac{\partial h_{E_i}(x)}{\partial [E_{abc}]_{n_b}} \right]^T \end{bmatrix}^T \quad (4.51)$$

4.5.2.2 Magnitude de Corrente ao Quadrado

São necessárias duas modelagens distintas para as medições de magnitude de corrente ao quadrado, posto que medidores podem estar posicionados tanto a jusante quanto a montante de um determinado ramal.

4.5.2.2.1 Medidor a Jusante do Elemento

Para a determinação das correntes, considere a Equação (4.47). Resolvendo-a para a corrente $[I_{abc}]_d$:

$$[I_{abc}]_d = [\mathcal{B}]^{-1} \cdot ([\mathcal{A}] \cdot [V_{abc}]_u - [V_{abc}]_d) \quad (4.52)$$

A partir da Equação (4.52), pode-se determinar $h_{I_2}(x)$. Considere um medidor localizado à jusante de um ramal qualquer, que conecta os nós i e j . A corrente trifásica de linha que o atravessa, é dada por:

$$[I_{abc}]_{ji} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{ji} = [\mathcal{B}]^{-1} \cdot ([\mathcal{A}] \cdot [V_{abc}]_i - [V_{abc}]_j) \quad (4.53)$$

onde as tensões $[V_{abc}]_i$ e $[V_{abc}]_j$ podem ser acessadas do vetor de estados pela Equação (4.48).

Aplicando a operação diagonal em $[I_{abc}]_{ji}$:

$$diag \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} = diag \left\{ \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{ji} \right\} = \begin{bmatrix} I_a & 0 & 0 \\ 0 & I_b & 0 \\ 0 & 0 & I_c \end{bmatrix}_{ji} \quad (4.54)$$

o vetor $h_{I_2}_{ji}(x)$ pode ser determinado da seguinte maneira:

$$h_{I_2}_{ji}(x) = diag \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} \cdot [I_{abc}]_{ji}^* \quad (4.55)$$

Para a determinação da matriz Jacobiana, é necessário a aplicação de derivadas parciais, com relação ao vetor de estados. A partir da Equação (4.53), nota-se que a corrente no ramo depende apenas das tensões a jusante e a montante. Assim:

$$\frac{\partial h_{I_2}_{ji}(x)}{\partial [E_{abc}]_k} = [0], \quad \frac{\partial h_{I_2}_{ji}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_k} = [0], \quad \text{Para } k \neq i \text{ e } k \neq j \quad (4.56)$$

Para a determinação das demais derivadas parciais, é preciso derivar a Equação (4.53) para $[V_{abc}]_i$ e $[V_{abc}]_j$. Assim:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_i} &= [\mathcal{B}]^{-1} \cdot [\mathcal{A}] \cdot \text{diag} \left\{ \left[\begin{array}{ccc} 1\angle\delta_a & 1\angle\delta_b & 1\angle\delta_c \end{array} \right]_i \right\} \\
 \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_j} &= -[\mathcal{B}]^{-1} \cdot \text{diag} \left\{ \left[\begin{array}{ccc} 1\angle\delta_a & 1\angle\delta_b & 1\angle\delta_c \end{array} \right]_j \right\} \\
 \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_i} &= [\mathcal{B}]^{-1} \cdot [\mathcal{A}] \cdot \text{diag} \left\{ 1\angle\frac{\pi}{2} \cdot [V_{abc}]_i \right\} \\
 \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_j} &= -[\mathcal{B}]^{-1} \cdot \text{diag} \left\{ 1\angle\frac{\pi}{2} \cdot [V_{abc}]_j \right\}
 \end{aligned} \tag{4.57}$$

Devido ao operador diagonal $\text{diag} \{.\}$ ser apenas um operador lógico, e considerando a linearidade da operação complexo conjugado, das derivadas de $h_{I_{ji}^2}(x)$ podem ser determinadas através da aplicação da regra do produto.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [E_{abc}]_i} &= \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} \cdot \left[\frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_i} \right]^* + \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji}^* \right\} \cdot \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_i} \\
 \frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [E_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} \cdot \left[\frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_j} \right]^* + \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji}^* \right\} \cdot \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_j} \\
 \frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_i} &= \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} \cdot \left[\frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_i} \right]^* + \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji}^* \right\} \cdot \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_i} \\
 \frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji} \right\} \cdot \left[\frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_j} \right]^* + \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ji}^* \right\} \cdot \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_j}
 \end{aligned} \tag{4.58}$$

Seguindo a estrutura por blocos 3×3 do Jacobiano, dada pela Equação (4.51), e a partir das Equações (4.56) e (4.58), a matriz $H_{I_{ji}^2}(x)$ fica expressa por:

$$H_{I_{ji}^2}(x) = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_1} \right]^T \\ \vdots \\ \left[\frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [\delta_{abc}]_{n_b}} \right]^T \\ \left[\frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [E_{abc}]_1} \right]^T \\ \vdots \\ \left[\frac{\partial h_{I_{ji}^2}(x)}{\partial [E_{abc}]_{n_b}} \right]^T \end{bmatrix}^T \tag{4.59}$$

4.5.2.2.2 Medidor a Montante do Elemento

Para a medição localizada a montante do ramo, utiliza-se a Equação (4.46):

$$[I_{abc}]_{ij} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{ij} = [c] \cdot [V_{abc}]_j + [d] \cdot [I_{abc}]_{ji} \quad (4.60)$$

Através do uso da Equação (4.53), e da operação diagonal, o vetor de medidas $h_{I_{ij}^2}(x)$ pode ser calculado, de maneira análoga à apresentada na Equação (4.55):

$$h_{I_{ij}^2}(x) = \text{diag} \left\{ [I_{abc}]_{ij} \right\} \cdot [I_{abc}]_{ij}^* \quad (4.61)$$

Similar às derivadas apresentadas na Equação (4.56), a derivação parcial de $h_{I_{ij}^2}(x)$ com relação as tensões $[v_{abc}]_k$, com $k \neq i$ e $k \neq j$, são nulas.

A derivada da Equação (4.60), com relação às tensões $[v_{abc}]_i$ e $[v_{abc}]_j$, é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial [I_{abc}]_{ij}}{\partial [E_{abc}]_i} &= \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_i} \cdot [d] \\ \frac{\partial [I_{abc}]_{ij}}{\partial [E_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \angle \delta_a & 1 \angle \delta_b & 1 \angle \delta_c \end{bmatrix} \right\}_j \cdot [c] + \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [E_{abc}]_j} \cdot [d] \\ \frac{\partial [I_{abc}]_{ij}}{\partial [\delta_{abc}]_i} &= \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_i} \cdot [d] \\ \frac{\partial [I_{abc}]_{ij}}{\partial [\delta_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ 1 \angle \frac{\pi}{2} \cdot [V_{abc}]_j \right\} \cdot [c] + \frac{\partial [I_{abc}]_{ji}}{\partial [\delta_{abc}]_j} \cdot [d] \end{aligned} \quad (4.62)$$

onde as derivadas parciais de $[I_{abc}]_{ji}$ são dadas pela Equação (4.57).

Com a aplicação das fórmulas dadas pelas Equações (4.58) e (4.59), a matriz Jacobiana das medições, $H_{I_{ij}^2}(x)$, pode ser determinada.

4.5.2.2.3 Matriz $[B]$ Singular

Como visto no Capítulo 3, muitos elementos do SD possuem suas matrizes $[B]$ singulares. Há inclusive a possibilidade desta matriz ser

nula, como no caso do regulador de tensão. Assim sendo, a aplicação da Equação (4.52) fica comprometida, posto que é necessário a inversão de $[\mathcal{B}]$.

Na aplicação prática, existem duas maneiras de resolver este problema.

Para uma matriz singular $[\mathcal{B}]$ não-nula, pode-se generalizar a sua inversa, através da utilização da pseudo-inversa de Moore-Penrose (BEN-ISRAEL; GREVILLE, 2003).

$$[I_{abc}]_d = [\mathcal{B}]^\dagger \cdot ([\mathcal{A}] \cdot [V_{abc}]_u - [V_{abc}]_d) \quad (4.63)$$

Este procedimento não acarreta em erros na EESD, devido às propriedades desta operação.

Para uma matriz $[\mathcal{B}]$ nula a solução adotada é a aglutinação de elementos em cascata, conforme discutido na Apêndice B. O procedimento pode ser realizado com o ramal a montante ou a jusante, dependendo da posição do medidor. No caso mais extremo no qual a aglutinação é inviável, devido à presença de cargas ou à topologia da rede, é possível inserir uma LD em cascata com o elemento, com impedância série Z_{abc} algumas ordens de grandeza menor do que os demais elementos da rede.

4.5.2.3 Fluxo de Potência

De maneira similar às medidas de corrente, as informações relativas ao fluxo de potência, tanto ativo quanto reativo, dependem da posição do medidor no elemento, caso ele se encontre a montante ou a jusante do seu ramo.

4.5.2.3.1 Medidor a Jusante do Elemento

Para as medições de potência ativa e reativa a jusante de um elemento, considere o ramo que conecta os nós i e j . A potência aparente complexa que incide no nó j , proveniente do elemento, é dada por:

$$h_{s_{ji}}(x) = [s_{abc}]_{ji} = \text{diag} \left\{ [V_{abc}]_j \right\} \cdot [I_{abc}]_{ji}^* \quad (4.64)$$

Os vetores de medição podem ser obtidos da Equação (4.64), através das operações real $\Re\{\cdot\}$ e imaginário $\Im\{\cdot\}$:

$$\begin{aligned} h_{p_{ji}}(x) &= \Re\{h_{s_{ji}}(x)\} \\ h_{q_{ji}}(x) &= \Im\{h_{s_{ji}}(x)\} \end{aligned} \quad (4.65)$$

Para a determinação das matrizes Jacobianas, considere as derivadas parciais das tensões $[V_{abc}]_j$, com relação às tensões $[V_{abc}]_i$ e $[V_{abc}]_j$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial[V_{abc}]_j}{\partial[E_{abc}]_i} &= [0] \\ \frac{\partial[V_{abc}]_j}{\partial[E_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ \left[\begin{array}{ccc} 1 \angle \delta_a & 1 \angle \delta_b & 1 \angle \delta_c \end{array} \right]_j \right\} \\ \frac{\partial[V_{abc}]_j}{\partial[\delta_{abc}]_i} &= [0] \\ \frac{\partial[V_{abc}]_j}{\partial[\delta_{abc}]_j} &= \text{diag} \left\{ 1 \angle \frac{\pi}{2} \cdot [V_{abc}]_j \right\} \end{aligned} \quad (4.66)$$

Devido às similaridades da Equação (4.55) com a Equação (4.65), a matriz Jacobiana $H_{s_{ji}}(x)$ pode ser obtida através do uso da regra do produto, conforme a Equação (4.58), assim como o uso da estrutura lógica apresentada pela Equação (4.59).

Assim sendo, as matrizes Jacobianas das medições de potência ativa e reativa a jusante de um elemento podem ser determinadas a partir de $H_{s_{ji}}(x)$, por:

$$\begin{aligned} H_{p_{ji}}(x) &= \Re\{H_{s_{ji}}(x)\} \\ H_{q_{ji}}(x) &= \Im\{H_{s_{ji}}(x)\} \end{aligned} \quad (4.67)$$

4.5.2.3.2 Medidor a Montante do Elemento

Para um medidor localizado a montante de um elemento, o procedimento para obter os vetores de medida, $h_{p_{ij}}(x)$ e $h_{q_{ij}}(x)$, assim como as matrizes Jacobianas, $H_{p_{ij}}(x)$ e $H_{q_{ij}}(x)$, é muito similar ao apresentado na Subseção 4.5.2.3.1, com a presença de apenas duas diferenças.

Primeiramente, o equacionamento de $h_{s_{ij}}(x)$ é dado por:

$$h_{s_{ij}}(x) = [s_{abc}]_{ij} = \text{diag} \{ [V_{abc}]_i \} \cdot [I_{abc}]_{ij}^* \quad (4.68)$$

Por último, em vez das derivadas parciais de $[V_{abc}]_j$, são necessárias as derivadas de $[V_{abc}]_i$:

$$\begin{aligned}\frac{\partial[V_{abc}]_i}{\partial[E_{abc}]_i} &= \text{diag} \left\{ [1\angle\delta_a \quad 1\angle\delta_b \quad 1\angle\delta_c]_i \right\} \\ \frac{\partial[V_{abc}]_i}{\partial[E_{abc}]_j} &= [0] \\ \frac{\partial[V_{abc}]_i}{\partial[\delta_{abc}]_i} &= \text{diag} \left\{ 1\angle\frac{\pi}{2} \cdot [V_{abc}]_i \right\} \\ \frac{\partial[V_{abc}]_i}{\partial[\delta_{abc}]_j} &= [0]\end{aligned}\tag{4.69}$$

4.5.2.4 Injeção de Potência

A potência aparente complexa injetada em um nó i é igual à potência fornecida pelo elemento a montante de i , subtraída das potências que fluem pelos ramos imediatamente a jusante deste mesmo nó. Assim considerando k_0 o elemento a montante de i , e k os elementos a jusante, pode-se determinar o vetor de equações $h_{S_i}(x)$.

$$h_{S_i}(x) = [h_{s_{ji}}(x)]_{k_0} - \sum_{k \in \Omega_i} [h_{s_{ij}}(x)]_k\tag{4.70}$$

onde Ω_i é o conjunto de ramos a jusante de i .

A partir da Equação (4.70), pode-se determinar $h_{P_i}(x)$ e $h_{Q_i}(x)$:

$$\begin{aligned}h_{P_i}(x) &= \Re\{h_{S_i}(x)\} \\ h_{Q_i}(x) &= \Im\{h_{S_i}(x)\}\end{aligned}\tag{4.71}$$

Devido às propriedades de derivação, a matriz Jacobiana pode ser também obtida, de maneira similar à Equação (4.70):

$$H_{S_i}(x) = [H_{s_{ji}}(x)]_{k_0} - \sum_{k \in \Omega_i} [H_{s_{ij}}(x)]_k\tag{4.72}$$

Desta maneira:

$$\begin{aligned}H_{P_i}(x) &= \Re\{H_{S_i}(x)\} \\ H_{Q_i}(x) &= \Im\{H_{S_i}(x)\}\end{aligned}\tag{4.73}$$

4.6 Conclusões

Neste capítulo, todos os mecanismos relevantes para a EESD proposta são apresentados, desde o modelo de medição, inclusão de restrições de igualdade, até a formulação do problema de otimização e solução pelo método da matriz aumentada de Hatchel. O cálculo dos vetores de equações e matrizes Jacobinas também são discutidos, considerando a modelagem do Capítulo 3. Buscou-se apresentar, da maneira mais abrangente, o estimador desenvolvido, sem muito detalhamento no que tange à operação da GD.

No capítulo seguinte, são abordadas técnicas de detecção de erros grosseiros, e como elas podem ser utilizadas para o monitoramento de fontes de GD.

5 Monitoramento da Geração Distribuída

5.1 Introdução

Com a possibilidade de estimar os estados do sistema, o operador possui o ferramental necessário para acompanhar a operação em tempo real do SD. Entretanto, como discutido no Capítulo 2, devido a inúmeros fatores, o operador pode não possuir informações atuais, ou confiáveis, acerca dos *status* das fontes de GD.

Entretanto, a não modelagem destas informações na formulação do problema de estimação de estados, pode acarretar erros nos resultados, principalmente quando há a presença de múltiplas fontes de GD.

Felizmente, técnicas de análise de erros grosseiros podem ser associadas ao estimador, permitindo ao operador identificar e detectar eventuais problemas na modelagem de fontes de GD. Assim sendo, um estimador equipado com estas características não apenas fornece as tensões complexas ao longo da rede, como é também capaz de determinar a condição operativa das inúmeras fontes de GD espalhadas pelo sistema.

Neste capítulo, inicialmente é apresentada de forma mais aprofundada a modelagem das fontes de GD a ser usada conjuntamente com o estimador proposto no Capítulo 4. Em seguida, são discutidos os testes dos multiplicadores de Lagrange normalizados, para detecção de erros grosseiros. Posteriormente, técnicas para a identificação de erros grosseiros são apresentadas, com foco na inclusão de testes de colinearidade no estimador. Na sequência, são feitos comentários acerca da desativação de restrições *operacionais* identificadas como errôneas, como parte do processo de estimação de estados. Por fim, um algoritmo de estimação de estados, com capacidade de monitoração de fontes de GD, é apresentado.

5.2 Modelagem de Fontes de GD

A modelagem das fontes distribuídas é feita tanto para a simulação da condição de operação verdadeira da rede quanto para o processo de estimação de estados. No primeiro caso, resolve-se um estudo de fluxo de potência considerando as contribuições de todas as fontes de GD ativas. No caso do processo de estimação, a modelagem das fontes de GD é feita a partir do uso de restrições *operacionais*, conforme discutido no Capítulo 4.

Conforme o Capítulo 2, muitas vezes o operador do sistema não possui informações conclusivas sobre os *status* da GD. Esta falta de informação deve ser incluída na estimação de estados, através da simulação de falhas de comunicação entre o operador do sistema e os produtores responsáveis por estas fontes.

5.2.1 Fluxo de Potência

A condição operativa real do sistema é simulada através do uso do fluxo de potência baseado no método da varredura, descrito na Seção 3.4. A partir de informações sobre as cargas distribuídas, *taps* dos reguladores de tensão e tensão da subestação, os estados reais do sistema x são determinados.

A inclusão do perfil verdadeiro das fontes de GD é feita de maneira similar à modelagem de consumidores, discutida na Subseção 3.3.2.4. As potências geradas são inseridas como cargas negativas nos seus respectivos nós, de maneira condizente com a sua conexão.

Consequentemente, conclui-se que o vetor de estados reais x carrega informações corretas sobre o perfil de geração das fontes de GD.

5.2.2 Estimação de Estados

No processo de estimação de estados, as fontes de GD são modeladas como restrições *operacionais*, de acordo com a Equações (4.13) e (4.16).

A falta de informações congruentes sobre o perfil de GD é inserida na Equação (4.13): para fontes de GD cujos *status* são desconhecidos, considera-se que sua geração é nula; para GDs cujos *status* são conhe-

cidos pelo operador mas estas informações sobre o perfil gerado são errôneas, tais valores inexatos podem ser considerados nas restrições *operacionais* (a serem posteriormente corrigidas pelo próprio processo de estimação de estados); finalmente, é também possível considerar informações congruentes sob a forma de restrições *operacionais*, conforme preconizado pela Equação (4.13).

Caso as restrições *operacionais* sejam modeladas incorretamente, o vetor de estados estimados \hat{x} será contaminado, e não mais refletirá a condição de operação real do SD. Entretanto, o vetor de medidas v carrega informações também sobre a condição operativa das fontes de GD. Este fato pode ser explorado para detectar e identificar possíveis erros na modelagem destas fontes. Os multiplicadores de Lagrange das restrições (4.13) são instrumentais para este fim.

5.3 Multiplicadores de Lagrange Normalizados

Como visto na Subseção 4.4.1, além do vetor $\Delta\hat{x}$, o método da matriz aumentada também fornece os multiplicadores de Lagrange λ relativos às medidas, pseudomedidas e restrições. Estes multiplicadores estão associados à sensibilidade da função objetivo com relação à variações nos valores das restrições de igualdade.

Por estarem relacionadas a diferentes tipos de informações, com diferentes ponderações dentro da EESD, é necessário aplicar um processo de normalização a λ . Considerando que todas as medições e restrições são trifásicas, o i -ésimo o Multiplicador de Lagrange Normalizado, relativo à alguma fase de uma dada informação, é definido como (CLEMENTS; SIMÕES COSTA et al., 1998):

$$\lambda_{(i)}^N = \frac{\lambda_{(i)}}{\sqrt{W_{(i,i)}}} \quad (5.1)$$

onde W é a matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange, definida através da inversão da matriz Tableau Esparsa (LOURENÇO, 2001), (LOURENÇO et al., 2006):

$$\begin{bmatrix} [0] & C^T \\ C & W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & H(\hat{x}^\ell)^T \\ H(\hat{x}^\ell) & R \end{bmatrix}^{-1} \quad (5.2)$$

Considerando que os erros de medição seguem uma distribuição normal e que não haja inconsistências nas informações fornecidas pelo plano de medição, os multiplicadores de Lagrange normalizados comportam-se como variáveis aleatórias com distribuição normal, com média $\mathcal{E}\{\lambda^N\} = 0$, e desvio padrão $\sigma = 1$; (LOURENÇO, 2001).

A partir da função densidade de probabilidade de uma variável normal, a probabilidade de que esta variável assuma valores entre -3σ e 3σ é de 99% (PAPOULIS, 1991). Assim sendo, caso não hajam erros nas informações do plano de medição e considerando uma probabilidade de falso alarme de 1%, cada multiplicador de Lagrange i se encontra dentro da seguinte faixa:

$$|\lambda_{(i)}^N| \leq \lambda_t \quad (5.3)$$

onde λ_t é o limiar do multiplicador de Lagrange, definido inicialmente como 3 desvios-padrão, ou seja $\lambda_t = 3\sigma = 3$.

Desta maneira, durante o processo de estimação de estados, após algumas iterações (usualmente duas), caso algum dos multiplicadores de Lagrange normalizados associados a uma ou mais informações não satisfaça à desigualdade dada pela Equação (5.3), há 99% de chance de ocorrência de erros e incongruências nas informações que constituem o plano de medição.

A aplicação deste tipo de teste a todas as informações permite a detecção de erros grosseiros no conjunto de restrições operacionais. Entretanto, embora os multiplicadores de Lagrange normalizados possam fornecer algum indício de qual restrição possui erros, não é possível discernir precisamente quais estão efetivamente erradas, e quais estão sendo contaminadas por outros erros. Assim sendo, são necessários mecanismos para identificação de erros na modelagem de fontes de GD.

5.4 Técnicas de Identificação de Erros Grosseiros

A partir dos testes dos multiplicadores de Lagrange normalizados, é possível detectar a presença de incongruências na modelagem das fontes de GD. Entretanto, existe uma alta probabilidade de que estes erros contaminem multiplicadores de Lagrange das medidas e das demais restrições, impossibilitando discernir com clareza quais são as informações errôneas.

Como apresentado na Seção 1.3, duas técnicas podem ser utilizadas para a identificação destes erros na modelagem de fontes de GD: testes Bayesianos de hipóteses e testes geométricos de colinearidade.

Neste trabalho, os testes de colinearidade são a técnica utilizada para a metodologia de monitoramento, e são descritos em detalhe na sequência.

5.4.1 Testes Geométricos de Colinearidade

Os testes geométricos de colinearidade tem como base o comportamento geométrico do vetor de multiplicadores de Lagrange, λ , e da sua matriz de covariância, W , no caso de uma modelagem errônea. Entretanto, antes de explorar esta característica para a identificação de erros grosseiros, é necessário compreender as influências da inclusão de erros em λ e W .

5.4.1.1 Uma Única Informação Errônea

Suponha um SD modelado corretamente, sem erros topológicos, e suponha também que o seu plano de medição possui apenas informações perfeitas, com exceção da informação j , associada a uma fase de alguma medida ou restrição.

Em decorrência da Equação (4.24), considerando o erro η_j associado à esta informação espúria, pode-se definir a seguinte relação de igualdade:

$$\lambda = W_j \cdot \eta_j \quad (5.4)$$

onde W_j é a j -ésima coluna de W , relativa à informação j .

Ou seja, na presença de uma única informação errada j , λ é colinear com a j -ésima coluna de W . Assim sendo, testando a colinearidade de λ com cada coluna de W , é possível identificar qual informação contém o erro.

O teste da colinearidade pode ser implementado determinando-se o cosseno do ângulo θ , entre λ e as colunas de W . Computacionalmente, entretanto, é mais interessante calcular o cosseno entre $R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda$ e $R^{\frac{1}{2}} \cdot W_j$,

dado por (LOURENÇO; CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 2002):

$$\cos \theta = \frac{\lambda^T \cdot R \cdot W_j}{\sqrt{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda) \cdot (W_j^T \cdot R \cdot W_j)}} \quad (5.5)$$

É possível simplificar o cálculo do cosseno de θ . Considerando que não são utilizadas informação *a priori* na EESD, a seguinte relação é válida (CLEMENTS; SIMÕES COSTA et al., 1998):

$$W \cdot R \cdot W^T = W \quad (5.6)$$

Substituindo (5.4) em (5.5):

$$\cos \theta = \frac{\eta^T \cdot W^T \cdot R \cdot W \cdot [U]_{(:,j)}}{\sqrt{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda) \cdot (W_j^T \cdot R \cdot W_j)}} \quad (5.7)$$

Sendo $[U]_{(:,j)}$ a j -ésima coluna da matriz identidade de dimensão apropriada, e levando em conta a Equação (5.6), o cosseno do ângulo entre λ e W_j é dado por (SOUZA, 2008):

$$\cos \theta = \frac{\lambda_j^N}{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.8)$$

Para uma determinada informação, caso a Equação (5.8) forneça um valor de cosseno suficientemente próximo de 1 conclui-se que λ é colinear com a coluna W_j e portanto a informação j é identificada como errônea.

5.4.1.2 Múltiplas Informações Errôneas

Embora a Equação (5.8) permita algum tipo de identificação de erros grosseiros, o procedimento considera apenas uma informação espúria. Lembrando que todas as informações são trifásicas, e que as restrições *operacionais* modelam as potências ativas e reativas das fontes de GD, como visto na Subseção 4.3.2.2, o número total destas informações é dado por:

$$n_o = 6 \cdot n_{GD} \quad (5.9)$$

Assim, para cada fonte de GD modelada incorretamente, dependendo das suas características (monofásica, desbalanceada, etc), pode haver até 6 restrições errôneas inseridas no problema de estimação de estados.

Para desenvolver uma análise de colinearidade para múltiplos erros, parte-se do princípio de que λ é uma combinação linear das colunas de W , ou seja:

$$\lambda = W.\eta \quad (5.10)$$

Considere a seguinte reestruturação das colunas da matriz de covariância dos multiplicadores de Lagrange:

$$W = [W_S \quad W_{\mathcal{T}}] \quad (5.11)$$

onde \mathcal{S} é um conjunto com informações suspeitas de erro, \mathcal{T} é um conjunto com as informações livres de erro, e que as colunas de W_S , relativas às informações suspeitas, são linearmente independentes.

Para substituir a Equação (5.11) em (5.10), é necessário reestruturar também o vetor η . Considerando que as informações contidas em \mathcal{T} representam o SD corretamente, pode-se assumir que os erros associados às mesmas são nulos. Assim, reescrevendo η :

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_S \\ [0] \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Substituindo as Equações (5.11) e (5.12) em (5.10):

$$\lambda = W_S.\eta_S \quad (5.13)$$

De acordo com a Equação (5.13), na presença de erros grosseiros, o vetor de multiplicadores de Lagrange é uma combinação linear das colunas de W , relativas às informações errôneas. Em outras palavras, λ pertence ao espaço vetorial $\mathcal{C}\{W_S\}$ gerado pelas colunas de W_S .

A Figura 13 sumariza esta característica, e ilustra como esta propriedade de colinearidade pode ser utilizada para a identificação de erros grosseiros. Caso todas as restrições errôneas estejam inclusas no conjunto suspeito, λ é colinear com $\mathcal{C}\{W_S\}$, como mostra a Figura 13a. Todavia, se alguma restrição errônea não tiver sido incluída em \mathcal{S} , o espaço coluna $\mathcal{C}\{W_S\}$ não vai satisfazer a Equação (5.13), indicando

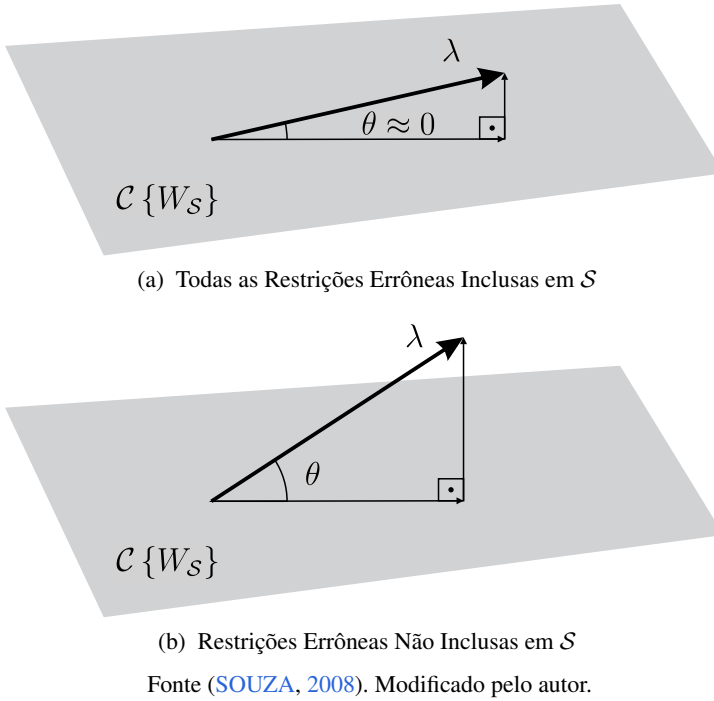


Figura 13 – Projção de λ no Espaço Colunas de $W_{\mathcal{S}}$

que há informações errôneas incluídas em \mathcal{T} . Como apresentado na Figura 13b, esta característica fica evidente através do surgimento do ângulo $\theta \neq 0$ entre λ e $W_{\mathcal{S}}$.

Similar ao caso de apenas uma restrição errônea, a determinação do cosseno de θ permite determinar se todas as informações esdrúxulas estão incluídas no conjunto suspeito \mathcal{S} . Novamente, por razões computacionais, trabalha-se com a projeção de $R^{\frac{1}{2}}\lambda$ sobre a matriz $R^{\frac{1}{2}}W_{\mathcal{S}}$ (LOURENÇO; CLEMENTS; SIMÕES COSTA, 2002). Por conveniência, definimos:

$$\widetilde{W}_{\mathcal{S}} = R^{\frac{1}{2}} \cdot W_{\mathcal{S}} \quad (5.14)$$

Assim sendo, considere o vetor $R^{\frac{1}{2\lambda}}$ como sendo a soma vetorial

dos vetores \mathbf{p}_λ e \mathbf{q}_λ :

$$R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda = \mathbf{p}_\lambda + \mathbf{q}_\lambda \quad (5.15)$$

onde \mathbf{p}_λ e \mathbf{q}_λ são projeções de $R^{\frac{1}{2}} \lambda$ no espaço vetorial \widetilde{W}_S , e no seu complemento ortogonal, respectivamente.

O operador linear que projeta um vetor no espaço vetorial gerado pelas colunas de uma matriz \mathcal{M} qualquer, é definida por (BANERJEE; ROY, 2014):

$$P_{\mathcal{M}} = \mathcal{M} \cdot (\mathcal{M}^T \cdot \mathcal{M})^{-1} \cdot \mathcal{M}^T \quad (5.16)$$

Assim sendo, aplicando a Equação (5.16) à matriz \widetilde{W}_S (CLEMETS; DAVIS, 1986):

$$P_{\widetilde{W}_S} = R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S \cdot (W_S^T \cdot R \cdot W_S)^{-1} \cdot W_S^T \cdot R^{\frac{1}{2}} \quad (5.17)$$

O vetor \mathbf{p}_λ é então determinado aplicando a transformada linear definida pela Equação (5.17), ao vetor $R^{\frac{1}{2}} \lambda$:

$$\mathbf{p}_\lambda = P_{\widetilde{W}_S} \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda = R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S \cdot (W_S^T \cdot R \cdot W_S)^{-1} \cdot W_S^T \cdot R \cdot \lambda \quad (5.18)$$

Considerando que todas as informações errôneas estão inclusas em S , e que os erros relacionados às informações em \mathcal{T} são nulas, conforme a Equação (5.12), os vetores \mathbf{p}_λ e $R^{\frac{1}{2}} \lambda$ são coincidentes. Ou seja:

$$\mathbf{q}_\lambda = 0 \quad (5.19)$$

e, da Equação (5.15):

$$\mathbf{p}_\lambda = R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S \cdot (W_S^T \cdot R \cdot W_S)^{-1} \cdot W_S^T \cdot R \cdot \lambda = R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda \quad (5.20)$$

Portanto, na hipótese de que o conjunto S contém todas as informações errôneas, o vetor $R^{\frac{1}{2}} \lambda$ é igual a sua projeção P_λ sobre o espaço $\mathcal{C}\{R^{\frac{1}{2}} \cdot W_S\}$. Isto implica em que o cosseno do ângulo θ entre os vetores $R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda$ e \mathbf{p}_λ , dado por:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{p}_\lambda^T \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda}{\sqrt{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda) \cdot (\mathbf{p}_\lambda^T \cdot \mathbf{p}_\lambda)}} \quad (5.21)$$

é teoricamente igual a 1. Na prática, entretanto, as medidas válidas sempre apresentam algum nível de ruído, de modo que na aplicação do teste deve-se permitir um pequeno desvio do valor do cosseno em relação à unidade.

A Equação (5.21) pode ser expressa inteiramente em função de λ através de algumas manipulações algébricas. Substituindo a Equação (5.20) na Equação (5.21), obtém-se:

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{p}_\lambda^T \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda}{\sqrt{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda) \cdot (\mathbf{p}_\lambda^T \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda)}} = \sqrt{\frac{\mathbf{p}_\lambda^T \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \lambda}{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda)}} \quad (5.22)$$

Por fim, substituindo a Equação (5.18) na Equação (5.22):

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\lambda^T \cdot R \cdot W_S \cdot (W_S^T \cdot R \cdot W_S)^{-1} \cdot W_S^T \cdot R \cdot \lambda}{(\lambda^T \cdot R \cdot \lambda)}} \quad (5.23)$$

Em conclusão, caso todas as informações errôneas estejam incluídas em \mathcal{S} , o valor do cosseno de θ , dado pela Equação (5.23) será próximo a 1, indicando a colinearidade de λ com W_S . Por outro lado, caso alguma restrição errônea esteja fora de \mathcal{S} , o cosseno assumirá valores significativamente diferentes de 1.

Ou seja, alterando-se a composição do conjunto suspeito e calculando sistematicamente o cosseno de θ , é possível identificar quais informações estão contaminadas por erros grosseiros.

5.4.1.3 Expansão de \mathcal{S} por Redução de λ_t

Após aplicação dos testes dos multiplicadores de Lagrange normalizados, discutidos na Seção 5.3, caso seja detectada a presença de erros grosseiros na modelagem das restrições operacionais, é necessário aplicar os testes geométricos de colinearidade, de forma a discernir e identificar estas informações espúrias. Para tanto, o conjunto suspeito \mathcal{S} precisa ser definido.

Inicialmente, são consideradas informações suspeitas de erros, todas aquelas que não passaram no teste do multiplicador de Lagrange normalizado, definido pela relação (5.3). Estas informações são incluídas em \mathcal{S} .

Com \mathcal{S} definido, o cosseno de θ pode ser calculado pela Equação (5.23). Caso o valor obtido seja próximo de 1, ou seja, satisfaça a relação:

$$\cos \theta \geq 1 - \epsilon_{\text{erro}} \quad (5.24)$$

onde ϵ_{erro} é um valor de tolerância entre 0,01 e 0,1, todas as informações errôneas estão contidas em \mathcal{S} .

Entretanto, caso a relação dada pela Equação (5.24) não seja satisfeita, o conjunto suspeito não contém todas as informações espúrias, e portanto precisa ser expandido.

O processo de expansão de \mathcal{S} consiste em reduzir o valor do multiplicador de Lagrange limiar, λ_t , em pequenos decréscimos, e reaplicar os testes dos Multiplicadores de Lagrange Normalizados. Assim sendo, mais informações são incluídas em \mathcal{S} . O cosseno é recalculado a cada redução de λ_t .

Este processo se repete até que a relação (5.24) seja satisfeita, garantindo assim a inclusão de todas as restrições *operacionais* modeladas erroneamente no conjunto \mathcal{S} , juntamente as demais informações que foram eventualmente contaminadas por estes erros.

5.4.1.4 Refinamento de \mathcal{S} por Remoção de Informações

Com o conjunto \mathcal{S} devidamente expandido, é necessário identificar quais de seus elementos correspondem a informações efetivamente errôneas, e quais foram incluídos em \mathcal{S} devido ao espalhamento de erros em outros de seus elementos.

Para tanto, cada informação suspeita é temporariamente removida de \mathcal{S} , e o cosseno de θ é recalculado. Caso o novo valor esteja de acordo com (5.24), a informação é considerada livre de erros, e é permanentemente removida de \mathcal{S} . Caso contrário, aquela informação apresenta erros e é então reinserida em \mathcal{S} .

Ao final deste procedimento, todas as informações incluídas em \mathcal{S} são identificadas como informações portadoras de erros. Logo, precisam ser expurgadas do plano de medição da EESD.

Devido às características de contaminação de erros, mesmo que apenas as restrições *operacionais* sejam modeladas erroneamente, \mathcal{S} pode ser composto também por medidas, pseudomedidas e restrições

estruturais. Por estas informações serem modeladas sem a presença de erros grosseiros, em trabalhos anteriores (SOUZA, 2008), o processo de refinamento de \mathcal{S} apenas removia as restrições *operacionais* suspeitas. Entretanto, os SDs eram modelados com planos de medição com alto nível de redundância, similares aos usados em sistemas de transmissão. Ao aplicarmos a modelagem proposta no Capítulo 3, e considerarmos um plano de medidas mais realístico para o contexto de sistemas de distribuição, este procedimento passou a exibir tendência de produzir resultados inconsistentes. Isto acontece porque, com a modelagem proposta, diferente do pressuposto assumido no equacionamento do cosseno de θ , a matriz $W_{\mathcal{S}}$ não mais apresenta colunas linearmente independentes. Ou seja, ao removermos uma restrição de \mathcal{S} , as demais colunas de $W_{\mathcal{S}}$ carregam aquelas informações, e λ ainda se mantém colinear com o espaço vetorial $\mathcal{C}\{W_{\mathcal{S}}\}$.

Por esse motivo, nesta dissertação aplica-se o refinamento a todas as informações contidas em \mathcal{S} , começando por aquelas as quais não estão, em princípio, sujeitas à erros grosseiros (medidas, pseudomedidas e restrições *estruturais*), para então refinar as restrições *operacionais* em \mathcal{S} .

Caso considere-se a presença de erros grosseiros também nas medidas e pseudomedidas, os testes de colinearidade para o monitoramento das fontes de GD, quando aplicados da maneira proposta, não são suficientes para a identificação das informações espúrias. Embora esta situação não seja abordada neste trabalho, na Seção 7.3 discute-se a problemática, e apresenta-se possíveis soluções.

5.4.1.5 Atualização do Plano de Medição

Com o conjunto \mathcal{S} completamente refinado, as restrições *operacionais* errôneas precisam ser removidas do plano de medição. Para tanto, deve-se alterar a matriz de covariância R_o .

Como discutido na Subseção 4.3.2.3, as restrições de igualdade são modeladas como informações probabilísticas, cujas variâncias são várias ordens de grandeza menores do que as das medidas e pseudomedidas. Este processo equivale à modelar estas restrições como informações determinísticas, de alta confiança.

Ao fazer o processo inverso, ou seja, atribuir variâncias de valor elevado às restrições *operacionais* errôneas, estas informações passam a ter um peso insignificante na EESD. Em outras palavras, estas restrições são desativadas.

Assim sendo, a matriz de covariâncias do plano de medição atualizado pode ser escrita como (LOURENÇO, 2001):

$$R_i = R + \Delta R_i \quad (5.25)$$

onde:

$$\Delta R_i = \text{diag} \left\{ \underbrace{[0]}_{m+n_s} \underbrace{[0 \ \gamma \ 0 \ \dots \ \gamma]}_{n_o} \right\} \quad (5.26)$$

sendo γ um valor positivo grande (neste trabalho, $\gamma = 10^4$).

A matriz de atualização ΔR_i pode ser reescrita:

$$\Delta R_i = \gamma \cdot \mathcal{E} \cdot \mathcal{E}^T \quad (5.27)$$

onde \mathcal{E} é uma matriz composta das colunas da matriz identidade de ordem $m + n_s + n_o$, relativas à todas as restrições *operacionais* errôneas identificadas em \mathcal{S} :

$$\mathcal{E} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} [U]_{(:,\mathcal{S}_1)} & [U]_{(:,\mathcal{S}_2)} & \dots & [U]_{(:,\mathcal{S}_k)} \end{array} \right] \quad (5.28)$$

sendo k o número total restrições *operacionais* modeladas incorretamente.

Substituindo a Equação (5.27) na Equação (5.25), a nova matriz de covariância é dada por:

$$R_i = R + \gamma \cdot \mathcal{E} \cdot \mathcal{E}^T \quad (5.29)$$

5.5 Monitoração de Sistemas de Distribuição

Com as técnicas de análise de erros grosseiros, discutidas nas Seções 5.3 e 5.4, associadas ao estimador proposto no Capítulo 4, é possível descrever um algoritmo de monitoração do SD, considerando a modelagem de fontes de GD. Para a aplicação deste algoritmo, entretanto, é necessário a simulação do sistema real.

5.5.1 Simulação da Condição Operativa do SD

Para um SD cujos elementos estão modelados de acordo com o Capítulo 3, a simulação do ponto de operação segue as seguintes etapas:

1. **Perfil da GD:** Para cada fonte de GD no sistema, um perfil de geração é definido para o SD de acordo com a Subseção 5.2.1;
2. **Coefficiente de Demanda:** Para a potência instalada no SD, aplica-se um determinado coeficiente de demanda, o qual multiplica todas as cargas do sistema;
3. **Fluxo de Potência:** Aplica-se o fluxo de potência por varredura, descrito na Seção 3.4, de forma a obter o vetor com os estados reais do sistema, x .

5.5.2 Algoritmo de Monitoramento

Conforme discutido no Capítulo 4, o vetor de estados reais, x , juntamente com a topologia e características intrínsecas dos elementos do SD, carrega todas as informações essenciais do sistema em si. Assim sendo, este vetor é usado para a simulação das medidas e pseudomedidas, que compõe o vetor v_m . Este processo é descrito no Apêndice C.

O algoritmo da EESD com capacidade de monitoramento de fontes de GD pode ser assim enunciado:

1. **Formação do Plano de Medição:**
 - 1.a) **Simulação de Medidas:** A partir do vetor de estados reais, x , e do plano de medição proposto, o vetor v_m é obtido, juntamente com a matriz de covariâncias R_m ;
 - 1.b) **Restrições Estruturais:** Com base na topologia do sistema, são determinadas as restrições *estruturais* do sistema;
 - 1.c) **Restrições Operacionais:** Como descrito na Subseção 5.2.2, as informações acerca das fontes de GD são incluídas na modelagem das restrições *operacionais*, sejam corretas ou errôneas;

2. Inicialização da Estimação de Estados:

- 2.a) **Partida Plana:** Vetor de estados estimados \hat{x}^0 dado pela Equação (4.42);
- 2.b) **Matriz de Covariâncias:** Determinar a matriz de covariâncias R ;
- 2.c) **Determinação da Tolerância:** Valor de ϵ determinado, para aplicação da Equação (4.43);
- 2.d) **Máximo Número de Iterações:** Determinado um valor máximo de iterações, ℓ^{max} ;
- 2.e) **Contador de Iterações:** $\ell = 0$;

3. Estimação de Estados:

- 3.a) **Vetor de Equações:** Calcular $h(\hat{x}^\ell)$ e $H(\hat{x}^\ell)$, conforme a Seção 4.5;
- 3.b) **Matriz Aumentada:** Resolver o sistema linear dado pela Equação (4.35);
- 3.c) **Atualização de \hat{x}^ℓ :** De acordo com a Equação (4.41), determinar a nova estimativa para o vetor \hat{x}^ℓ ;
- 3.d) **Incremento do Contador:** $\ell = \ell + 1$:
 - Se $\ell = 2$, ir para o passo 4;
 - Senão, ir para o passo 9;

4. Teste dos Multiplicadores de Lagrange Normalizados:

- 4.a) **Cálculo de λ^N :** De acordo com a Equação (5.1), determinar o vetor λ^N ;
- 4.b) **Detecção de Erros:** Testar cada informação em λ^N , de acordo com a Equação (5.3):
 - Se $|\lambda_{(i)}^N| > \lambda_t$, para alguma informação i , há erros na modelagem de fontes de GD. Ir para 5.;
 - Senão, ir para o passo 9;

5. Delineação de \mathcal{S} :

- 5.a) **Inclusão em \mathcal{S}** : Todas as informações que não satisfazem a Equação (5.3), para o valor de λ_t atual, são inclusas no conjunto suspeito \mathcal{S} ;
6. **Expansão de \mathcal{S}** :
- 6.a) 1° **Teste do Cosseno**: Calcular o cosseno de θ , para o conjunto suspeito \mathcal{S} , de acordo com a Equação (5.23):
- Se $\cos \theta \geq 1 - \epsilon_{erro}$, todas as informações contendo erros na modelagem de fontes de GD foram inclusas em \mathcal{S} . Ir para o passo 7;
 - Senão, o conjunto \mathcal{S} precisa ser aprimorado. Reduzir o valor de λ_t e ir para o passo 5;
7. **Refinamento de \mathcal{S}** :
- 7.a) **Redução de \mathcal{S}** : Partindo das medidas, pseudomedidas, até as restrições de igualdade, remover uma informação i de \mathcal{S} ;
- 7.b) 2° **Teste do Cosseno**: Para o conjunto \mathcal{S} reduzido, calcular o cosseno de θ , de acordo com a Equação (5.23):
- Se $\cos \theta \geq 1 - \epsilon_{erro}$, a informação i é livre de erros, e é permanentemente excluída de \mathcal{S} ;
 - Senão, a informação i é identificada como errônea, e é reinserida em \mathcal{S} ;
8. **Atualização da Matriz de Covariâncias**:
- 8.a) **Determinação de \mathcal{E}** : Para cada restrição *operacional* errônea inserida em \mathcal{S} , determinar a matriz \mathcal{E} , de acordo com a Equação (5.28);
- 8.b) **Cálculo de R_i** : Através da Equação (5.29), determinar a matriz de covariâncias atualizada, R_i , que desativa as restrições *operacionais* errôneas;
- $R = R_i$;
9. **Teste de Convergência**:
- Se $\ell \leq 2$, ir para o passo 3;

- Se $\ell > \ell^{max}$, convergência não alcançada. **FIM.**
- Senão, calcular $\|\Delta\hat{x}\|_2$:
 - Se $\|\Delta\hat{x}\|_2 \leq \epsilon$, convergência alcançada. **FIM.**
 - Senão, retornar para o passo 3;

5.6 Conclusões

O Capítulo 5 conclui o desenvolvimento teórico deste trabalho, fornecendo mecanismos robustos para a monitoração em tempo real de SDs na presença de fontes de GD. Embora a lógica de aplicação dos testes de colinearidade seja similar a trabalhos anteriores (SOUZA, 2008), a correção das dificuldades associadas ao cálculo do cosseno de θ , discutida na Subseção 5.4.1.4, assim como a inclusão de restrições *operacionais* relativas às injeções de potência reativa, apresentada na Subseção 4.3.2.2, são contribuições deste trabalho.

Além disso, a modelagem trifásica desbalanceada permite averiguar uma maior abrangência da técnica, englobando casos com a presença de fontes de GD monofásicas e bifásicas.

No próximo capítulo, o algoritmo descrito na Subseção 5.5.2 é aplicado a diferentes sistemas-teste, sob diferentes perfis de operação de fontes de GD, de maneira a ilustrar o desempenho da abordagem proposta.

6 Simulações e Resultados

6.1 Introdução

No Capítulo 5, uma metodologia de estimação de estados com monitoramento de fontes de GD é proposta. A fim de validar computacionalmente o método face à modelagem e ao tratamento das restrições estruturais propostos, neste capítulo são apresentados diversos estudos de caso, referentes a diferentes sistemas-teste.

São utilizados dois sistemas-teste do IEEE: o sistema *IEEE 13* nós; e o *IEEE 37* nós (IEEE PES, 2015). Para cada sistema, diferentes situações operativas são modeladas, conforme descrito na Subseção 5.5.1, sendo então aplicado o algoritmo da Subseção 5.5.2.

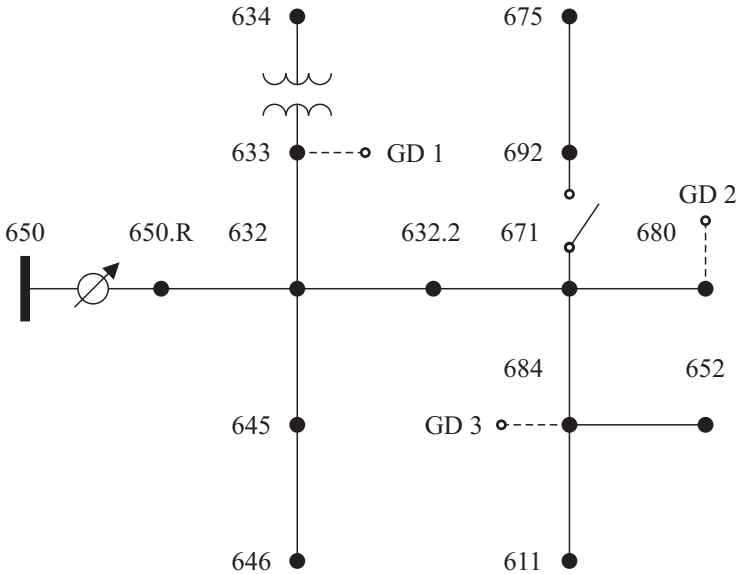
Procura-se assim exemplificar e ilustrar a aplicação da metodologia proposta e confirmar a sua eficácia. Ao final do capítulo, conclusões gerais dos estudos realizados são apresentados

6.2 Sistema *IEEE 13* Nós

O primeiro sistema-teste abordado nesta dissertação é o alimentador *IEEE 13* nós, apresentado na Figura 14. As características gerais dos nós, elementos, e cargas deste SD, são sumarizadas na Tabela 2.

Algumas modificações foram efetuadas no SD. Dentre elas, destacam-se a criação do nó virtual 632.2, no qual a carga distribuída entre os nós 632 e 671 é concentrada, assim como o aglutinamento dos nós 671 e 692, posto que o disjuntor situado entre ambos encontra-se fechado. Devido à presença de um regulador de tensão entre os nós 650 e 650.*R*, e considerando que não há cargas conectadas no nó 650.*R*, o regulador de tensão e a linha trifásica entre os nós 650.*R* e 632 são aglutinados, conforme indicado no Apêndice B, e o nó 650.*R* é eliminado.

Assim sendo, o sistema adaptado é composto de $n_b = 13$ nós, e o vetor \hat{x} contém $n_e = 78$ estados, já considerando a criação de fases fictícias junto para nós bifásicos e monofásicos.



Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

Figura 14 – Sistema-Teste *IEEE 13* Nós

Outra modificação importante é a inclusão de fontes de GD, conectadas nos nós 633, 680 e 684, sendo a GD 1 e a GD 2 trifásicas, enquanto a GD 3, localizada no nó 684, bifásica, conectada entre as fases *a* e *c*. Esta alteração do SD permite que o algoritmo proposto na Subseção 5.5.2 possa ser aplicado considerando diferentes perfis de geração.

O plano de medição proposto encontra-se detalhado na Tabela 3. Já considerando o plano de medição, conforme descrito na Subseção 4.5.1, o número total de medidas e pseudomedidas é $m = 45 + 48 + 45 = 138$; o número de restrições *estruturais* é $n_s = 9$, e o número de restrições *operacionais* é $n_o = 18$. Assim, a redundância global deste sistema, de acordo com a Equação (4.2), é $\rho = (m + n_s + n_o)/n_e = (138 + 9 + 18)/70 \approx 2,36$.

Para este sistema-teste, serão consideradas duas análises distintas. Inicialmente, é realizado um estudo padrão do SD, sem a presença de fontes de GD. Busca-se interpretar os resultados do fluxo de potência,

Tabela 2 – IEEE 13 Nós - Informações Gerais

Dados dos Ramais	
Tipo do Elemento	Quantidade
Linhas Trifásicas	6
Linhas Bifásicas	3
Linhas Monofásicas	2
Transformador Estrela-Estrela	1
Regulador de Tensão Estrela-Estrela	1
Dados dos Nós	
Tipo de Nó	Quantidade
Nó de Subestação	1
Nós Trifásicos	6
Nós Bifásicos	3
Nós Monofásicos	2
Nós Trifásicos Intermediários	1
Nós Trifásicos Aglutinados	1
Potência Instalada	
Tipo da Carga	Carga Total (kVA)
Cargas Nodais	$3266 + j2102$
Cargas Distribuídas	$200 + j116$
Capacitores <i>Shunt</i>	$-j700$

Fonte ([IEEE PES, 2015](#)). Modificado pelo autor.

apresentado na Seção 3.4, com o objetivo de averiguar o quão bem modelado é o sistema. Para tanto, os resultados do fluxo de potência são comparados com os dados originais tabelados do sistema-teste ([IEEE PES, 2015](#)).

Para a segunda análise, 3 estudos de caso são discutidos, aos quais diferentes perfis de geração são alocados para cada fonte, conforme a Tabela 4. Para cada caso, também é considerada a inclusão da informação que o operador possui acerca destes perfis de GD. Assim, o desempenho e a abrangência do algoritmo desenvolvido na Subseção 5.5.2 podem ser analisados.

Tabela 3 – IEEE 13 Nós - Plano de Medidas

Medidores de Supervisão		
Medidor	Localização do Medidor	Precisão (%)
Mag. de Tensão	650.	1
Fluxo de Potência Ativa e Reativa	650-650.R, 632-633, 632-632.2, 632.2-671, 671-680, 671-684.	3
Mag. de Corrente ao Quadrado	632-632.2, 671-684.	3
Pseudomedidas		
Previsão de Carga	Nó do Consumidor	Precisão (%)
Injeção de Potência Ativa e Reativa	634, 645, 646, 632.2, 671-692, 611, 652, 675.	15
Medidores Inteligentes		
Meter	Localização do Medidor	Precisão (%)
Mag. de Tensão	634, 671-692, 611, 652, 675.	1
Injeção de Potência Ativa e Reativa		1
Restrições Estruturais		
Restrição	Nó	Variância (pu)
Fase da Tensão	650.	10^{-8}
Injeção de Potência Ativa e Reativa	632.	
Restrições Operacionais		
Restrição	Nós com Conexão de GD	Variância (pu)
Injeção de Potência Ativa e Reativa	633, 680, 684.	10^{-8}

A tolerância dos processos iterativos, tanto do fluxo de potência, quanto do estimador, é estipulada em $\epsilon = 10^{-6}$. Já para os testes de colinearidade, a tolerância do cosseno é fixada em $\epsilon_{erro} = 0.02$.

Tabela 4 – IEEE 13 Nós - Resumo dos Estudos de Caso

Estudo de Caso	Injeção de Potência por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]		
	GD 1	GD 2	GD 3
A	$200 + j100$	–	$150 + j75$
B	$200 + j100$	–	$150 + j75$
C	$150 + j75$	$75 + j37,5$	$150 + j75$
Estudo de Caso	Geração Informada ao Operador por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]		
	GD 1	GD 2	GD 3
A	$200 + j100$	–	$150 + j75$
B	–	$250 + j125$	$150 + j75$
C	–	–	–

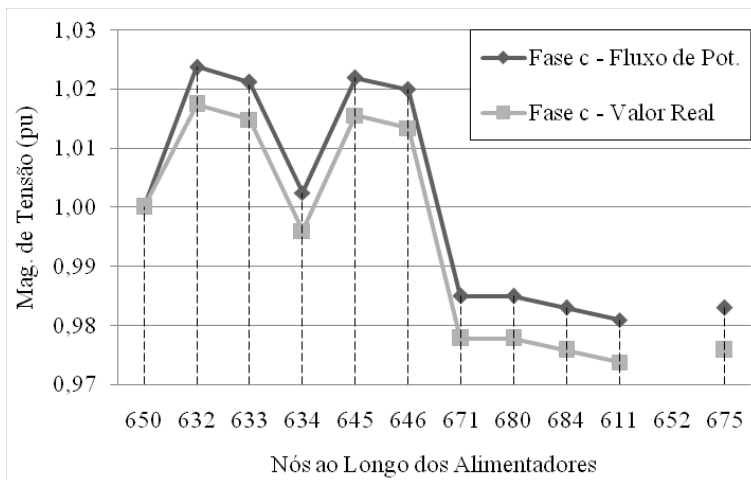
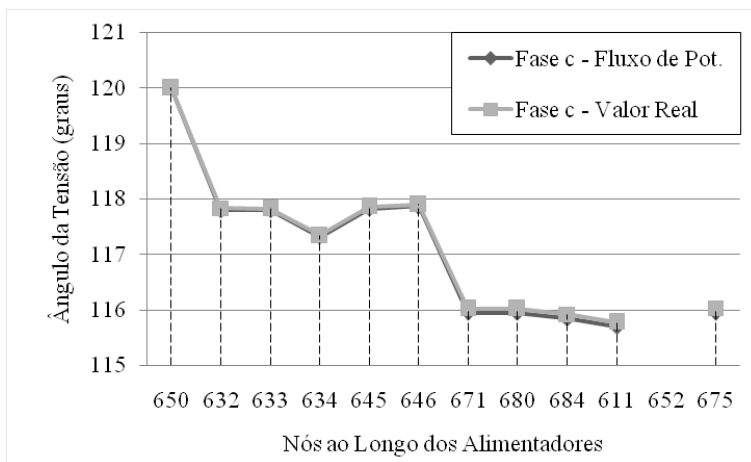
6.2.1 Análise do Fluxo de Potência

O primeiro estudo realizado é uma análise do algoritmo de fluxo de potência. O método de varredura é aplicado ao SD, considerando os *taps* do banco de reguladores de tensão apresentados em (IEEE PES, 2015) e fator de demanda unitário.

Para ilustrar os resultados do fluxo de potência, a Figura 15 apresenta o comportamento da magnitude e ângulo da tensão da fase *c* para todos os nós do SD. Em comparação, os estados reais para esta mesma fase, de acordo com (IEEE PES, 2015), são também indicados na figura. É possível se concluir, principalmente através da Figura 15b, que o

Tabela 5 – IEEE 13 Nós - Fluxo de Potência: Diferenças nas Tensões

Fase <i>k</i>	Magnitude de Tensão (%)	Ângulo da Tensão (%)
	$\ [E_k]_{flow} - [E_k]_{real} \ _2$	$\ [\delta_k]_{flow} - [\delta_k]_{real} \ _2$
<i>a</i>	1,60	0,48
<i>b</i>	0,27	0,33
<i>c</i>	2,15	0,33

(a) Magnitude de Tensão - Fase *c*(b) Ângulo da Tensão - Fase *c*

Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

Figura 15 – IEEE 13 Nós - Fluxo de Potência

algoritmo de fluxo de potência utilizado simula muito bem o sistema. Para as demais fases, *a* e *b*, o comportamento apresentado na Figura 15 também se repete.

A fim de quantificar melhor o desempenho, a Tabela 5 apresenta a norma Euclidiana da diferença entre as magnitudes e fase da tensão, para cada fase do sistema. Percebe-se que, no pior dos casos (fase c), a magnitude de tensão apresenta um erro de apenas 2,15%.

Considerando que o processo iterativo convergiu em $\ell = 4$ iterações, pode-se concluir que a modelagem proposta é eficaz, e capaz de emular perfeitamente os SDs.

6.2.2 Caso A - Nenhuma GD Modelada Incorretamente

Para o Caso A, temos o perfil de geração de fontes de GD apresentado na Tabela 4, com a GD 1 e a GD 3 operando. Considera-se também que o operador possui informações precisas sobre este perfil, ou seja, não há problemas na comunicação entre o Operador do SD e o agente responsável pelo despacho das fontes.

Após a aplicação do fluxo de potência, e inicialização do processo de monitoração, é necessário averiguar os multiplicadores de Lagrange normalizados ao fim da segunda iteração da EESD. A Tabela 6 apresenta o resultado destes multiplicadores, para as restrições operacionais do processo de estimação de estados.

Tabela 6 – IEEE 13 Nós - Caso A: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	a	0,9179	não	0,1485	não
	b	0,0323	não	0,0241	não
	c	0,0194	não	0,0008	não
2	a	0,4090	não	0,1319	não
	b	0,0251	não	0,0301	não
	c	0,2993	não	0,1336	não
3	a	0,3775	não	0,1682	não
	c	0,2385	não	0,1460	não

Pode-se perceber que, para nenhuma das restrições, houve alterações significativas nos multiplicadores de Lagrange Normalizados. Além disso, o maior multiplicador de Lagrange normalizado obtido

para as medidas foi de $|\lambda_N| = 1,65$, relativo à medida de magnitude de tensão na fase b da barra 634. Este valor, aparente alto se comparado aos multiplicadores de Lagrange normalizados apresentados na Tabela 6, se deve às diferentes ponderações para as informações do plano de medição, além dos erros aleatórios inseridos na simulação de medidas (Apêndice C). Entretanto, este valor está situado dentro do limiar inicial $\lambda_t = 3$, e não é detectada a presença de erros grosseiros. O algoritmo de EESD pode então prosseguir.

Este exemplo ilustra que, no caso do operador receber informações corretas, os multiplicadores de Lagrange não são afetados, e a EESD flui normalmente, sendo que para este caso, o processo convergiu em $\ell = 3$ iterações.

6.2.3 Caso B - Duas GDs Modeladas Incorretamente

Para o Caso B, o perfil de geração adotado é o mesmo do que o Caso A. Entretanto, conforme descrito na Tabela 4, o operador do sistema possui informações erradas sobre as GDs 1 e 2: a GD 1 é considerada desligada, enquanto a GD 2 é suposta estar operando.

Estes erros grosseiros podem ser processados pelo algoritmo de monitoramento. Durante a iteração $\ell = 2$, os testes dos multiplicadores de Lagrange normalizados são efetuados. Os resultados encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 – IEEE 13 Nós - Caso B: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	<i>a</i>	7,6637	Sim	4,3401	Sim
	<i>b</i>	6,2567	Sim	3,2275	Sim
	<i>c</i>	6,3685	Sim	3,1980	Sim
2	<i>a</i>	10,3040	Sim	5,4019	Sim
	<i>b</i>	10,5755	Sim	5,6521	Sim
	<i>c</i>	9,9898	Sim	5,4422	Sim
3	<i>a</i>	3,3067	Sim	2,1747	não
	<i>c</i>	3,2226	Sim	2,0929	não

Com a presença destes erros, percebe-se um alto nível de contaminação dos multiplicadores de Lagrange normalizados. Até mesmo as restrições relativas à potência ativa da GD 3 são incluídas no conjunto suspeito. O maior multiplicador detectado foi de 10,5755, para a restrição de potência ativa da fase b da GD 2.

Na Tabela 8, encontra-se o resultado da expansão do conjunto suspeito \mathcal{S} . Para este caso, não houve a necessidade de reduzir o valor limiar, λ_t que, mesmo mantido no valor original igual a 3,0, produz um valor de $\cos \theta$ que já está dentro da tolerância estabelecida de $1 - 0,02 = 0,98$. Assim, o conjunto suspeito é composto de todas as restrições *operacionais*, com exceção das restrições de potência reativa da GD 3, além de 40 medidas e restrições *estruturais*, que foram incorretamente contaminadas pelo erro.

Tabela 8 – IEEE 13 Nós - Caso B: Expansão de \mathcal{S}

Restrições <i>Operacionais</i> em \mathcal{S}				Medidas e Restrições <i>Estruturais</i> em \mathcal{S}	λ_t	$\cos \theta$
GD	Fase	Pot. Ativa	Pot. Reativa			
1	a	Sim	Sim	40	3,0	0,9938
	b	Sim	Sim			
	c	Sim	Sim			
2	a	Sim	Sim			
	b	Sim	Sim			
	c	Sim	Sim			
3	a	Sim	não			
	c	Sim	não			

A Tabela 9 apresenta o processo de refinamento de \mathcal{S} . Como comentado na Subseção 5.4.1.4, as medidas, pseudomedidas e restrições *estruturais* são processadas inicialmente. Neste processo, como indicado na Tabela 9, todas as 40 informações são removidas de \mathcal{S} , e o cosseno vai de 0,9938, para 0,9909. Este natural afastamento do valor 1 se dá pelo fato destas informações estarem contaminadas pelos erros.

Na sequência, são processadas as restrições *operacionais*. As informações relativas às potências ativa da GD 3 são corretamente removidas

Tabela 9 – IEEE 13 Nós - Caso B: Refinamento de \mathcal{S}

Medidas e Restrições Estruturais					
Inclusas em \mathcal{S}		Removidas de \mathcal{S}		$\cos \theta$	
40		40		0,9909	
Restrições Operacionais					
GD	Fase	Potência Ativa		Potência Reativa	
		$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}	$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}
1	<i>a</i>	0,9424	Não	0,9776	Não
	<i>b</i>	0,9574	Não	0,9820	sim
	<i>c</i>	0,9560	Não	0,9733	Não
2	<i>a</i>	0,9054	Não	0,9553	Não
	<i>b</i>	0,8902	Não	0,9535	Não
	<i>c</i>	0,9112	Não	0,9554	Não
3	<i>a</i>	0,9909	sim	–	–
	<i>c</i>	0,9909	sim	–	–

do conjunto suspeito, enquanto a restrição de potência reativa relativa à fase *b* da GD 1 é erroneamente removida de \mathcal{S} , por uma margem pequena. Percebe-se que as restrições de potência ativa reagem muito melhor ao teste do cosseno, se comparadas com as restrições de potência reativa. Entretanto, percebe-se claramente que houveram erros na modelagem das fontes de GD 1 e 2, e suas respectivas restrições são desativadas do processo de estimação de estados.

O estimador então converge na iteração $\ell = 5$. A Tabela 10 apre-

Tabela 10 – IEEE 13 Nós - Caso B: Perfil Estimado da Geração

GD	Potência Gerada por Fase (kVA)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	$201,8 + j106,3$	$197,1 + j102,2$	$201,1 + j101,0$
2	$-6,5 - j1,9$	$6,3 - j1,6$	$5,6 + j0,2$
3	$150,0 + j75,0$	$0,0 + j0,0$	$150,0 + j75,0$

senta o resultado das potências geradas por cada GD, após a desativação das restrições *operacionais*. Para a GD 1, a potência estimada é muito próxima à potência efetivamente gerada, enquanto para a GD 2, há apenas um ruído de geração, na ordem de grandeza dos erros da GD 1. Este pequeno desvio se deve aos erros nas medições. Pela modelagem determinística das restrições *operacionais*, o valor estimado da geração da GD 3 é idêntico ao assumido na Tabela 4.

6.2.4 Caso C - Todas as GDs Modeladas Incorretamente

Para o Caso C, as três GDs do sistema estão em operação, enquanto o operador não possui qualquer informação congruente sobre os despacho das mesmas, considerando-as desativadas.

A Tabela 11 apresenta os multiplicadores de Lagrange normalizados para este cenário. Percebe-se o grande impacto acarretado pelos erros na modelagem das restrições *operacionais*. Quase todas as restrições apresentam λ^N maior do que 3,0, indicando a presença de erros.

Tabela 11 – IEEE 13 Nós - Caso C: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	a	5,8632	Sim	3,4806	Sim
	b	4,8860	Sim	2,3985	não
	c	4,7528	Sim	2,3988	não
2	a	4,6017	Sim	3,0228	Sim
	b	2,9658	não	1,7740	não
	c	4,7740	Sim	3,0595	Sim
3	a	6,3701	Sim	3,8866	Sim
	c	6,4410	Sim	3,8257	Sim

O processo de expansão do conjunto suspeito S é apresentado na Tabela 12. Para este caso, o valor de λ_t teve de ser reduzido para 2,3, de maneira a incluir todas as informações errôneas. Assim, com exceção da injeção de potência reativa na fase *b* da GD 2, todas as restrições *operacionais* são incluídas no conjunto suspeito, juntamente com 36 medidas e restrições *estruturais*.

Tabela 12 – *IEEE 13 Nós - Caso C: Expansão de \mathcal{S}*

Restrições Operacionais em \mathcal{S}				Medidas e Restrições Estruturais em \mathcal{S}	λ_t	$\cos \theta$
GD	Fase	Pot. Ativa	Pot. Reativa			
1	<i>a</i>	Sim	Sim	36	2,3	0,9858
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
2	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>b</i>	Sim	não			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
3	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			

Tabela 13 – *IEEE 13 Nós - Caso C: Refinamento de \mathcal{S}*

Medidas e Restrições Estruturais		
Inclusas em \mathcal{S}	Removidas de \mathcal{S}	$\cos \theta$
36	22	0,9800

Restrições Operacionais					
GD	Fase	Potência Ativa		Potência Reativa	
		$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}	$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}
1	<i>a</i>	0,9346	Não	0,9791	Não
	<i>b</i>	0,9710	Não	0,9676	Não
	<i>c</i>	0,9781	Não	0,9688	Não
2	<i>a</i>	0,9669	Não	0,9770	Não
	<i>b</i>	0,9621	Não	–	–
	<i>c</i>	0,9661	Não	0,9770	Não
3	<i>a</i>	0,9347	Não	0,9798	Não
	<i>c</i>	0,9786	Não	0,9689	Não

O refinamento de \mathcal{S} é apresentado na Tabela 13. Percebe-se que nem todas as informações erroneamente incluídas em \mathcal{S} foram corretamente removidas. Apenas 22 foram corretamente identificadas como livres de

erro. Caso fosse utilizado um ϵ_{erro} menor, digamos 0,05, provavelmente este resultado seria melhor.

Entretanto, todas as restrições *operacionais* incluídas em \mathcal{S} foram corretamente identificadas como errôneas, e desativadas do processo de estimação de estados. Devido à estrutura da GD 2, esta desativação também inclui a restrição de potência reativa da fase *b*, que não havia sido inserida no conjunto suspeito.

O estimador então atinge convergência, novamente na iteração $\ell = 5$. A Tabela 14 apresenta o resultado dos valores estimados para as injeções de potência das GDs.

Tabela 14 – IEEE 13 Nós - Caso C: Perfil Estimado da Geração

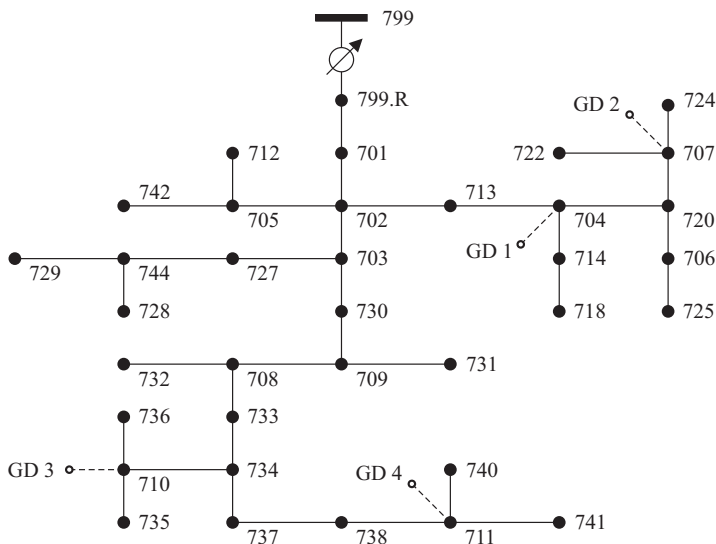
GD	Potência Gerada por Fase (kVA)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	$151,3 + j83,9$	$153,4 + j75,8$	$149,5 + j75,7$
2	$68,7 + j39,3$	$67,4 + j39,8$	$71,2 + j39,2$
3	$141,8 + j76,5$	$0,0 + j0,0$	$143,2 + j75,5$

6.3 Sistema IEEE 37 Nós

O sistema-teste IEEE 37 nós é apresentado na Figura 16. A Tabela 15 apresenta algumas das características genéricas deste sistema.

Dentre as modificações realizadas neste sistema-teste, a mais proeminente é a extinção do nó 775, que se conecta ao nó 709 por um transformador. Esta modificação se deve ao fato deste nó não possuir qualquer consumidor, fazendo com que sua exclusão não afete os resultados do fluxo de potência. Este nó não é representado na Figura 16.

As demais modificações consistem na inclusão de fontes de GD trifásicas nos nós 704, 707, 710 e 711 e no aglutinamento de elementos da rede, conforme descrito no Apêndice B. O regulador de tensão entre os nós 799 e 799.R, e a linha de distribuição entre os nós 799.R e 701, são aglutinados em um elemento equivalente, extinguindo-se o nó



Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

Figura 16 – Sistema-Teste *IEEE 37* Nós

Tabela 15 – *IEEE 37* Nós - Informações Gerais

Dados dos Ramais	
Tipo do Elemento	Quantidade
Linhas Trifásicas	36
Regulador de Tensão Delta Aberto	1
Dados dos Nós	
Tipo de Nó	Quantidade
Nó de Subestação	1
Nós Trifásicos	32
Nós Trifásicos Aglutinados	2
Potência Instalada	
Tipo da Carga	Carga Total (kVA)
Cargas Nodais	2457 + j1201

Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

799.R. As LDs a montante e a jusante do nó 706 são processadas da mesma maneira, eliminando-se também este nó.

Tabela 16 – IEEE 37 Nós - Plano de Medidas

Medidores de Supervisão		
Medidor	Localização do Medidor	Precisão (%)
Mag. de Tensão	799, 701, 729.	1
Fluxo de Potência Ativa e Reativa	701-702, 702-713, 713-704, 704-714, 704-720, 720-707, 709-708, 707-724, 733-734, 734-710, 734-737, 711-740, 711-741.	3
Mag. de Corrente ao Quadrado	701-702, 702-703, 704-720, 709-708, 708-732, 708-733.	3
Pseudomedidas		
Previsão de Carga	Nó do Consumidor	Precisão (%)
Injeção de Potência Ativa e Reativa	713, 713, 712, 742, 727, 730, 714, 720, 744, 718, 706, 728, 729, 731, 725, 722, 724, 732, 724, 732, 733, 734, 737, 735, 736, 738, 740, 741.	15
Medidores Inteligentes		
Meter	Localização do Medidor	Precisão (%)
Mag. de Tensão	720, 718, 722, 734, 738.	1
Injeção de Potência Ativa e Reativa	714, 720, 718, 725, 722, 734, 737, 735, 736, 738.	1
Restrições Estruturais		
Restrição	Nó	Variância (<i>pu</i>)
Fase da Tensão	799.	10 ⁻⁸
Injeção de Potência Ativa e Reativa	702, 705, 703, 709, 708.	
Restrições Operacionais		
Restrição	Nós com Conexão de GD	Variância (<i>pu</i>)
Injeção de Potência Ativa e Reativa	704, 707, 710, 711.	10 ⁻⁸

Tabela 17 – IEEE 37 Nós - Resumo dos Estudos de Caso

Estudo de Caso	Injeção de Potência por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]			
	GD 1	GD 2	GD 3	GD 4
A	–	–	–	–
B	$250 + j125$	–	–	–
C	$175 + j87,5$	–	$70 + j150$	–

Estudo de Caso	Geração Informada ao Operador por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]			
	GD 1	GD 2	GD 3	GD 4
A	–	–	–	–
B	–	–	–	–
C	–	–	–	–

O plano de medição desenvolvido para este sistema é apresentado na Tabela 16. Considerando a estrutura apresentada na Tabela 15, o sistema possui $n_b = 35$ nós, totalizando $n_e = 6.35 = 210$ variáveis de estados a serem estimadas, de acordo com a Equação (4.21). O

Tabela 18 – IEEE 37 Nós - Estudo de Caso Especial

Fase	Injeção de Potência por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]			
	GD 1	GD 2	GD 3	GD 4
a	–	$150 + j75$	$110 + j50$	$200 + j120$
b	–		$80 + j60$	$100 + j50$
c	–		$95 + j30$	$200 + j120$

Fase	Geração Informada ao Operador por Fase [$P(kW) + jQ(kVAr)$]			
	GD 1	GD 2	GD 3	GD 4
a	–	–	–	Varia
b	–	–	–	
c	–	–	–	

número total de medidas, pseudomedidas e medidores inteligentes, para o plano de medição utilizado, é $m = 105 + 168 + 75 = 348$. O número de restrições *estruturais* é $n_s = 33$, enquanto o número de restrições *operacionais* é $n_o = 24$. Assim sendo, a redundância global para este plano é $\rho = (m + n_s + n_o)/n_e = (348 + 33 + 24)/210 \approx 1,93$.

Considerando um fator de demanda unitário, inicialmente é analisado o desempenho do algoritmo de fluxo de potência, considerando nulo o perfil de GDs, em comparação com os valores tabelados deste SD (IEEE PES, 2015), considerando fixos os *taps* do regulador de tensão. A tolerância estipulada para este procedimento é de $\epsilon = 10^{-6}$.

Em seguida, são considerados diferentes estudos de caso, resumidos na Tabela 17. O algoritmo de monitoramento é então aplicado, sendo utilizado uma tolerância de $\epsilon = 10^{-6}$ para a EESD, e uma tolerância $\epsilon_{erro} = 0,05$ para os testes de colinearidade.

Por fim, um estudo de caso especial é apresentado, conforme a Tabela 18. O objetivo é analisar a influência da variação da informação de geração, considerando fixos os valores gerados, dentro da EESD. Devido à natureza mais específica desta análise, a tolerância dos testes de colinearidade é alterada para $\epsilon_{erro} = 0,02$.

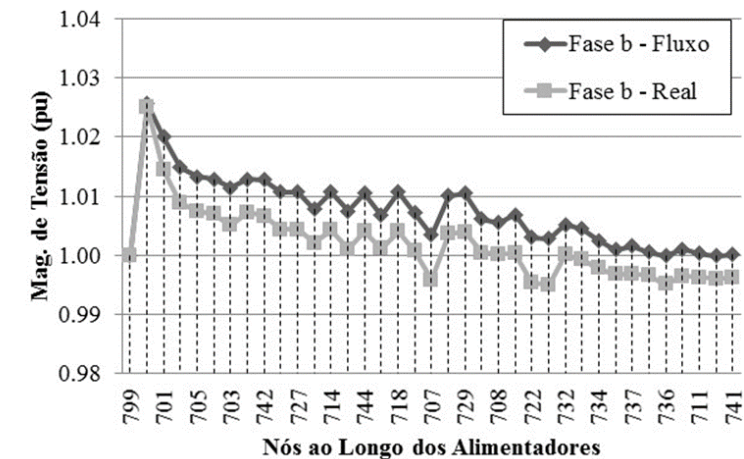
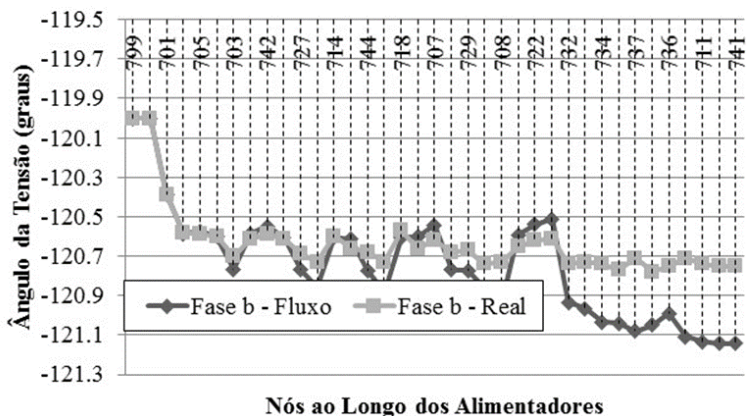
6.3.1 Análise do Fluxo de Potência

Novamente, com o intuito de ilustrar os resultados do fluxo de potência, a magnitude e ângulo das tensões da fase *b* do sistema IEEE 37 nós são apresentados na Figura 17, juntamente com os estados reais.

Tabela 19 – IEEE 37 Nós - Fluxo de Potência: Diferenças nas Tensões

Fase k	Magnitude de Tensão (%)	Ângulo da Tensão (%)
	$\ [E_k]_{flow} - [E_k]_{real} \ _2$	$\ [\delta_k]_{flow} - [\delta_k]_{real} \ _2$
<i>a</i>	3,63	1,01
<i>b</i>	3,44	2,00
<i>c</i>	2,12	1,28

Tanto para a tensão, apresentada na Figura 17a, quanto para a fase, Figura 17a, percebe-se que os resultados do fluxo de potência proposto acompanham com boa precisão os valores tabelados na referência

(a) Magnitude de Tensão - Fase *b*(b) Ângulo da Tensão - Fase *b*

Fonte (IEEE PES, 2015). Modificado pelo autor.

Figura 17 – IEEE 37 Nós - Fluxo de Potência

(IEEE PES, 2015), considerando a mesma modelagem para os *taps* do regulador de tensão entre os nós 799 e 799.R. Comportamento este que se repete para as fases *a* e *c* do sistema-teste.

Na Tabela 19 é apresentada a norma Euclidiana, expressa em porcentagem, da diferença entre as magnitudes e ângulos das tensões, fase

a fase. Para o pior dos casos, as magnitudes de tensão da fase a , esta diferença é de 3,63%, indicando uma boa capacidade de representação do SD real.

6.3.2 Caso A - Nenhuma GD Modelada Incorretamente

Para este caso de análise padrão, as fontes de GD estão desativadas mas o operador possui esta informação. Assim não há erros na modelagem das mesmas.

Na Tabela 20 encontram-se os multiplicadores de Lagrange normalizados para as restrições *operacionais* às quais o SD está sujeito. Com base nos valores obtidos, e considerando que o maior multiplicador de Lagrange normalizado foi de 2,0044, relativo à medida de magnitude de tensão na fase b do nó 701, fica evidente que não houve erros grosseiros no processo de estimação de estados.

Para este estudo de caso, o processo de estimação convergiu na iteração $\ell = 3$.

Tabela 20 – IEEE 37 Nós - Caso A: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	a	0,0363	não	0,0314	não
	b	0,0438	não	0,0542	não
	c	0,1146	não	0,0057	não
2	a	0,0237	não	0,0981	não
	b	0,1055	não	0,0847	não
	c	0,1174	não	0,0253	não
3	a	0,1073	não	0,0007	não
	b	0,0795	não	0,0084	não
	c	0,1212	não	0,0877	não
4	a	0,2110	não	0,1412	não
	b	0,0240	não	0,0042	não
	c	0,1084	não	0,0405	não

6.3.3 Caso B - Uma GD Modelada Incorretamente

Para o segundo estudo de caso, a fonte de GD 1 está gerando $250 + j125$ kVA de potência por fase. Considera-se agora que o operador

Tabela 21 – *IEEE 37* Nós - Caso B: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	<i>a</i>	6,5145	Sim	3,1890	Sim
	<i>b</i>	6,4349	Sim	3,2852	Sim
	<i>c</i>	6,4721	Sim	3,2906	Sim
2	<i>a</i>	3,0298	Sim	1,5822	não
	<i>b</i>	2,8685	não	1,4906	não
	<i>c</i>	3,0411	Sim	1,4976	não
3	<i>a</i>	0,0115	não	0,0220	não
	<i>b</i>	0,0265	não	0,0010	não
	<i>c</i>	0,1728	não	0,0446	não
4	<i>a</i>	0,0961	não	0,0608	não
	<i>b</i>	0,0011	não	0,0104	não
	<i>c</i>	0,0452	não	0,0299	não

Tabela 22 – *IEEE 37* Nós - Caso B: Expansão de \mathcal{S}

Restrições Operacionais em \mathcal{S}				Medidas e Restrições Estruturais em \mathcal{S}	λ_t	$\cos \theta$
GD	Fase	Pot. Ativa	Pot. Reativa			
1	<i>a</i>	Sim	Sim	16	3,0	0,9790
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
2	<i>a</i>	Sim	não			
	<i>b</i>	não	não			
	<i>c</i>	Sim	não			
3	<i>a</i>	não	não			
	<i>b</i>	não	não			
	<i>c</i>	não	não			
4	<i>a</i>	não	não			
	<i>b</i>	não	não			
	<i>c</i>	não	não			

Tabela 23 – IEEE 37 Nós - Caso B: Refinamento de \mathcal{S}

Medidas e Restrições Estruturais					
Inclusas em \mathcal{S}		Removidas de \mathcal{S}		$\cos \theta$	
16		16		0,9739	
Restrições Operacionais					
GD	Fase	Potência Ativa		Potência Reativa	
		$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}	$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}
1	<i>a</i>	0,8649	Não	0,9420	Não
	<i>b</i>	0,8362	Não	0,9402	Não
	<i>c</i>	0,8671	Não	0,9400	Não
2	<i>a</i>	0,9739	sim	–	–
	<i>b</i>	–	–	–	–
	<i>c</i>	0,9739	sim	–	–

não possui informações sobre as fontes de GD, e as supõe desativadas. A Tabela 21 apresenta os multiplicadores de Lagrange normalizados para este cenário.

O maior multiplicador de Lagrange encontrado foi de 6,5145, para a restrição de potência ativa da fase *a* da GD 1. É necessário aplicar o primeiro teste de colinearidade, de forma a determinar o conjunto suspeito \mathcal{S} , devido à detecção de erros grosseiros.

Na Tabela 22 encontra-se o resultado do processo de expansão do conjunto suspeito. Para este caso, não foi necessário reduzir o valor do limiar relativo aos multiplicadores de Lagrange, que manteve-se em 3,0, para que o valor do cosseno de θ se mantivesse dentro da tolerância especificada de $1 - 0,05 = 0,95$. Foram incluídos em \mathcal{S} 16 medidas e restrições *estruturais*, além das restrições *operacionais* relativas à GD 1 e às fases *a* e *c* das restrições de potência ativa da GD 2.

A Tabela 23 apresenta o refinamento de \mathcal{S} . As medidas e restrições *estruturais* são inicialmente processadas. Todas as 16 informações erroneamente consideradas suspeitas são processadas com sucesso. Em seguida, as restrições *operacionais* são analisadas. Todas as restrições relativas à GD 1 permanecem no conjunto suspeito, enquanto as restrições relativas à GD 2 são efetivamente removidas.

Tabela 24 – IEEE 37 Nós - Caso B: Perfil Estimado da Geração

GD	Potência Gerada por Fase (kVA)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	253,4 + <i>j</i> 123,1	247,8 + <i>j</i> 126,8	250,8 + <i>j</i> 127,2
2	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0
3	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0
4	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0

A Tabela 24 apresenta as gerações estimadas para cada fonte de GD, ao final da EESD, que atingiu a convergência na iteração $\ell = 5$.

6.3.4 Caso C - Duas GDs Modeladas Incorretamente

Para o terceiro caso de estudo, duas fontes de GD são consideradas ativas, ao passo que o operador do sistema não possui qualquer informação sobre o perfil de geração.

Como visto na Tabela 17, as GDs 1 e 3 estão ativas. Entretanto, a fonte de GD 3 está operando com um baixo fator de potência, em torno

Tabela 25 – IEEE 37 Nós - Caso C: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	<i>a</i>	4,5172	Sim	2,1705	não
	<i>b</i>	4,3499	Sim	2,2848	não
	<i>c</i>	4,5043	Sim	2,2607	não
2	<i>a</i>	2,1190	não	0,8845	não
	<i>b</i>	1,7858	não	0,9668	não
	<i>c</i>	2,3044	não	1,0021	não
3	<i>a</i>	2,4731	não	5,3342	Sim
	<i>b</i>	2,5193	não	5,4531	Sim
	<i>c</i>	2,6693	não	5,4490	Sim
4	<i>a</i>	0,4124	não	1,1684	não
	<i>b</i>	0,5425	não	1,0624	não
	<i>c</i>	0,6213	não	1,1431	não

de 0,4229. Além de contemplar uma situação operativa diferenciada, este estudo de caso procura focar na identificação das fontes de GD errôneas através da análise das restrições de potência reativa.

A Tabela 25 apresenta os multiplicadores de Lagrange normalizados para este estudo. Percebe-se a detecção de erros grosseiros, posto que as restrições de potência ativa da GD 1 e reativa da GD 2 possuem seus multiplicadores maiores do que $\lambda_t = 3$. O maior multiplicador detectado foi de 5,4531, relativo à injeção de potência reativa na fase *b* da GD 3.

No processo de expansão de \mathcal{S} , apresentado na Tabela 26, o valor de λ_t é reduzido para 2,1, para que o cosseno atinja o valor acima da tolerância de 0,95. Além de incluídas todas as restrições relativas às GDs 1 e 3, duas restrições da GD 2 permanecem em \mathcal{S} , juntamente com 35 informações do SD.

Tabela 26 – IEEE 37 Nós - Caso C: Expansão de \mathcal{S}

Restrições Operacionais em \mathcal{S}				Medidas e Restrições Estruturais em \mathcal{S}	λ_t	$\cos \theta$
GD	Fase	Pot. Ativa	Pot. Reativa			
1	<i>a</i>	Sim	Sim	35	2,1	0,9620
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
2	<i>a</i>	Sim	não			
	<i>b</i>	não	não			
	<i>c</i>	Sim	não			
3	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
4	<i>a</i>	não	não			
	<i>b</i>	não	não			
	<i>c</i>	não	não			

A Tabela 27 apresenta o processo de refinamento de \mathcal{S} . Todas as informações erroneamente incluídas no conjunto suspeito são efetivamente removidas de \mathcal{S} , reforçando a eficácia do método. Além disso, percebe-se que, de todas as restrições, aquelas que, ao serem removidas temporariamente de \mathcal{S} provocam maior efeito no valor do cosseno foram

justamente as relativas à potência reativa na GD 3. Portanto, este estudo apresenta indica que a análise da restrição de potência reativa também pode ser utilizada para detectar apropriadamente erros na modelagem de fontes de GD.

Após a desativação das restrições errôneas, a EESD converge na iteração $\ell = 6$. A Tabela 28 apresenta a estimativa das potências geradas pelas fontes de GD.

Tabela 27 – IEEE 37 Nós - Caso C: Refinamento de \mathcal{S}

Medidas e Restrições Estruturais					
Inclusas em \mathcal{S}		Removidas de \mathcal{S}		$\cos \theta$	
35		35		0,9602	
Restrições Operacionais					
GD	Fase	Potência Ativa		Potência Reativa	
		$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}	$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}
1	<i>a</i>	0,9173	Não	0,9476	Não
	<i>b</i>	0,9090	Não	0,9464	Não
	<i>c</i>	0,9198	Não	0,9466	Não
2	<i>a</i>	0,9602	sim	–	–
	<i>b</i>	–	–	–	–
	<i>c</i>	0,9601	sim	–	–
3	<i>a</i>	0,9437	Não	0,8818	Não
	<i>b</i>	0,9431	Não	0,8782	Não
	<i>c</i>	0,9412	Não	0,8785	Não

Tabela 28 – IEEE 37 Nós - Caso C: Perfil Estimado da Geração

GD	Potência Gerada por Fase (kVA)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	$174,9 + j83,6$	$167,5 + j87,9$	$173,6 + j86,9$
2	$0,0 + j0,0$	$0,0 + j0,0$	$0,0 + j0,0$
3	$69,7 + j149,6$	$70,6 + j152,6$	$74,4 + j152,0$
4	$0,0 + j0,0$	$0,0 + j0,0$	$0,0 + j0,0$

6.3.5 Caso D - Três GDs Modeladas Incorretamente

Para este caso especial, três fontes de GD serão consideradas ativas, de acordo com a Tabela 18. Apesar da GD 2 possuir uma geração balanceada, a GD 3 é fortemente desequilibrada, enquanto na GD 4 a potência relativa à fase *b* é diferente das demais fases. Estes desequilíbrios podem ser provenientes de problemas na conexão com a rede, assim como a presença de cargas conectadas próximas às fontes.

Serão realizadas duas análises a partir deste perfil de geração. Inicialmente, considera-se que o operador do sistema não possui qualquer informação sobre as fontes de GD, e as considera nulas. Em seguida, a partir das mesmas medições efetuadas, o processo de EESD é novamente aplicado, alterando-se linearmente a informação de potência da fonte de GD 4, fazendo-a variar de $0 + j0$ kVA, até $300 + j150$ kVA. O objetivo é dimensionar o comportamento da metodologia proposta, face à inserção de informação sobre a geração distribuição.

6.3.5.1 Nenhuma Informação Sobre as Fontes de GD

Para este cenário, os multiplicadores de Lagrange normalizados são apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – IEEE 37 Nós - Caso D: Multiplicadores de Lagrange

GD	Fase	Rest. Potência Ativa		Rest. Potência Reativa	
		$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$	$ \lambda_i^N $	$ \lambda_i^N \geq \lambda_t ?$
1	<i>a</i>	1,8590	não	0,9785	não
	<i>b</i>	1,7275	não	0,9209	não
	<i>c</i>	1,8384	não	0,9152	não
2	<i>a</i>	3,7997	Sim	1,9012	não
	<i>b</i>	3,6132	Sim	1,9192	não
	<i>c</i>	3,8844	Sim	1,9197	não
3	<i>a</i>	4,9768	Sim	2,3290	não
	<i>b</i>	3,3071	Sim	2,3091	não
	<i>c</i>	4,2525	Sim	1,6156	não
4	<i>a</i>	4,9231	Sim	2,8169	não
	<i>b</i>	2,6511	não	1,4186	não
	<i>c</i>	4,7718	Sim	2,6932	não

Devido à presença de multiplicadores de Lagrange acima do valor limiar, os testes de colinearidade são necessários para identificar os erros grosseiros. A Tabela 30 sumariza a etapa de expansão de \mathcal{S} , considerando que, para este cenário, a tolerância ϵ_{erro} foi alterada para $1 - 0,02 = 0,98$.

Tabela 30 – *IEEE 37 Nós - Caso D: Expansão de \mathcal{S}*

Restrições Operacionais em \mathcal{S}				Medidas e Restrições Estruturais em \mathcal{S}	λ_t	$\cos \theta$
GD	Fase	Pot. Ativa	Pot. Reativa			
1	<i>a</i>	Sim	não	72	1,2	0,9820
	<i>b</i>	Sim	não			
	<i>c</i>	Sim	não			
2	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
3	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			
4	<i>a</i>	Sim	Sim			
	<i>b</i>	Sim	Sim			
	<i>c</i>	Sim	Sim			

O limiar para os multiplicadores de Lagrange foi reduzido efetivamente para 1,2, e 72 medidas foram incluídas erroneamente no conjunto suspeito. Além disso, à exceção das restrições de potência reativa da GD 1, todas as restrições operacionais foram inclusas no conjunto suspeito.

A Tabela 31 apresenta o refinamento do conjunto suspeito. De todas as 72 medidas e restrições estruturais contidas em \mathcal{S} , apenas uma foi incorretamente considerada como errônea. No mais, todas as restrições operacionais modeladas incorretamente foram devidamente identificadas, e desativadas no processo de EESD, que atinge a convergência na iteração $\ell = 7$.

A Tabela 32 apresenta as estimativas das potências geradas pelas fontes de GD. Novamente, a performance da metodologia apresentada na Subseção 5.5.2 provou ser eficiente.

Tabela 31 – IEEE 37 Nós - Caso D: Refinamento de \mathcal{S}

Medidas e Restrições Estruturais					
Inclusas em \mathcal{S}		Removidas de \mathcal{S}		$\cos \theta$	
72		71		0,9807	
Restrições Operacionais					
GD	Fase	Potência Ativa		Potência Reativa	
		$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}	$\cos \theta$	Removido de \mathcal{S}
1	<i>a</i>	0,9806	sim	–	–
	<i>b</i>	0,9806	sim	–	–
	<i>c</i>	0,9806	sim	–	–
2	<i>a</i>	0,9382	Não	0,9703	Não
	<i>b</i>	0,9427	Não	0,9699	Não
	<i>c</i>	0,9352	Não	0,9698	Não
3	<i>a</i>	0,9323	Não	0,9713	Não
	<i>b</i>	0,9574	Não	0,9684	Não
	<i>c</i>	0,9480	Não	0,9773	Não
4	<i>a</i>	0,9339	Não	0,9640	Não
	<i>b</i>	0,9688	Não	0,9779	Não
	<i>c</i>	0,9339	Não	0,9638	Não

Tabela 32 – IEEE 37 Nós - Caso D: Perfil Estimado da Geração

GD	Potência Gerada por Fase (kVA)		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
1	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0	0,0 + <i>j</i> 0,0
2	145,3 + <i>j</i> 72,9	139,2 + <i>j</i> 73,0	148,5 + <i>j</i> 73,3
3	116,0 + <i>j</i> 51,1	80,6 + <i>j</i> 58,6	95,1 + <i>j</i> 30,8
4	201,2 + <i>j</i> 120,8	102,1 + <i>j</i> 49,1	201,7 + <i>j</i> 121,8

6.3.5.2 Variação das Informações Relativas à Fonte de GD 4

Para uma melhor compreensão da abordagem, face à modelagem das fontes de GD, para a mesma condição operativa descrita na Tabela 18, considerando uma mesma coleta de dados do fluxo de potência, diferentes instâncias da Estimação de Estados serão efetuadas. Entre-

tanto, para cada uma delas, será considerado um diferente valor para $[P_{abc}]_{GD_4}$ e $[Q_{abc}]_{GD_4}$, durante a modelagem das fontes de GD através do uso da Equação (4.13), de acordo com:

$$\left\{ \begin{array}{l} [P_{abc}]_{GD_4} = \mathcal{D} \cdot \begin{bmatrix} 200 \\ 200 \\ 200 \end{bmatrix} \\ [Q_{abc}]_{GD_4} = \mathcal{D} \cdot \begin{bmatrix} 120 \\ 120 \\ 120 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} [kW] \\ [kVar] \end{array} \quad (6.1)$$

onde \mathcal{D} é uma constante, que varia entre 0 e 1,2, em incrementos de 0,05.

A Figura 18 sumariza o processo de identificação de erros grosseiros, aplicado em cada uma das diferentes instancias de estimação de estados.

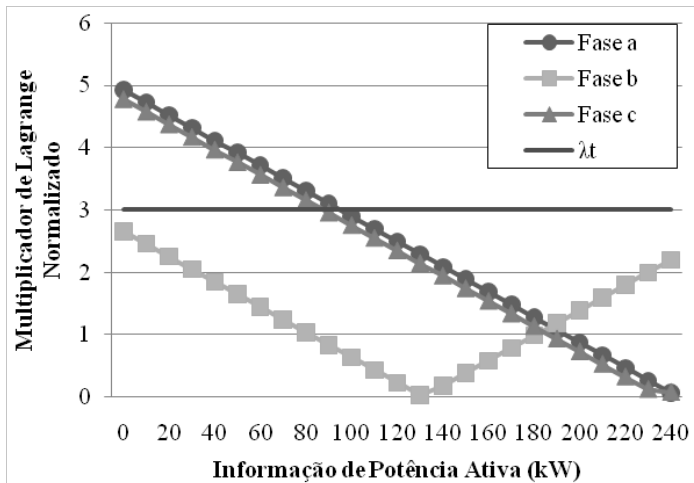
Na Figura 18a encontram-se os valores dos multiplicadores de Lagrange normalizados para as restrições de potência ativa da GD 4. A primeira grande ressalva sobre este gráfico que pode-se notar é a a variação linear do valor destes multiplicadores, conforme $[P_{abc}]_{GD_4}$ varia. Isto se deve ao fato do processo de estimação de estados seguir uma aproximação linear, conforme apresentado na Equação (4.35).

Para as fases *a* e *c*, cujas potências geradas são idênticas, à medida que o valor de $[P_{abc}]_{GD_4}$ se aproxima do seu valor gerado, de 200 kW, os valores dos multiplicadores de Lagrange vão diminuindo linearmente, continuando com esta tendência até mesmo após $[P_{abc}]_{GD_4}$ passar de 200 kW.

Para a fase *b*, o multiplicador é reduzido até seu valor mínimo em $[P_b]_{GD_4} = 130kW$. A partir deste ponto, o valor do seu multiplicador começa a aumentar, conforme $[P_{abc}]_{GD_4}$ se distancia do valor real gerado.

Assim sendo, fica evidente que, quando maior a diferença entre valor real e a informação correspondente, mais o multiplicador de Lagrange normalizado aumenta, refletindo e quantificando portanto o impacto do erro de modelagem. Fica claro também que, do ponto de vista da quantificação do impacto o importante é o módulo da citada diferença.

Após a detecção de erros grosseiros e a etapa de expansão de \mathcal{S} , é necessário o refinamento de \mathcal{S} . A Figura 18b apresenta este estágio,



(a) Multiplicadores de Lagrange Normalizados - GD 4

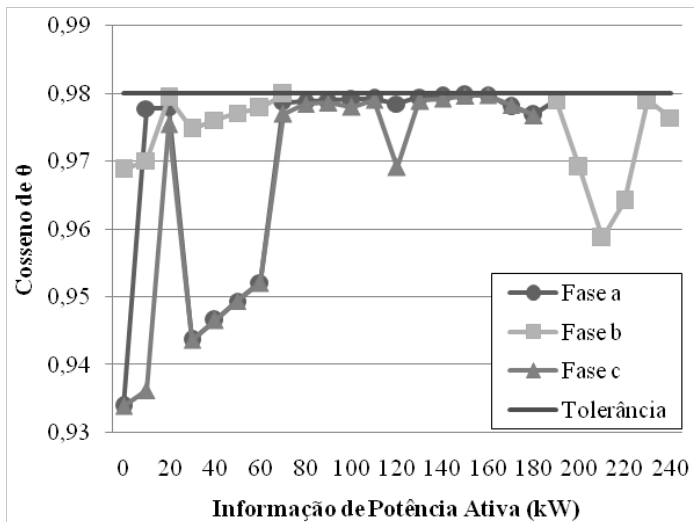
(b) Refinamento de S - GD 4

Figura 18 – IEEE 37 Nós - Caso D: Resposta do Algoritmo Face à Variações nas Informações sobre GDs

aplicado nas restrições operacionais de potência ativa suspeitas relativas à fonte de GD 4, conforme $[P_{abc}]_{GD_4}$ aumenta.

Para as fases a e c , até $[P_{ac}]_{GD_4} = 90$ kW, os multiplicadores de Lagrange normalizados se encontram acima de 3,0. Percebe-se uma tendência do valor de $\cos \theta$ de aproximar cada vez mais de 0,98.

A partir de $[P_{ac}]_{GD_4} = 100$ kW, mais nenhuma restrição relativa à GD 4 apresenta seus multiplicadores acima de 3,0. Entretanto, devido à presença de mais fontes de GD modeladas incorretamente, estas restrições ainda permanecem contidas no conjunto suspeito pelo expansão de \mathcal{S} . A partir deste ponto, a restrição relativa à fase b não mais entra no conjunto suspeito, e há uma vertiginosa mudança no valor do $\cos \theta$ para as fases a e c , que fica oscilando em valores muito próximos de 0,98.

Por fim, a partir de $[P_{abc}]_{GD_4} = 190$ kW, as fases a e c não são mais incluídas no conjunto suspeito, ao passo que a fase b retorna a \mathcal{S} . Isto se deve ao módulo da diferença dos valores gerados pelas fases a e c estarem muito próximos da informação disponível enquanto que, para a fase b , esta diferença volta a ser significativa.

Estas diferenças estão relacionadas diretamente com as demais fontes de GD presentes no sistema, e refletem a sensibilidade do método face à modelagem de fontes de GD. Embora os testes dos multiplicadores de Lagrange normalizados indiquem, a partir de $[P_{abc}]_{GD_4} = 100$ kW, que não há erros de modelagem da GD, a aplicação dos testes de colinearidade permite detectar estes erros em cenários mais críticos, conforme expresso nos gráficos da Figura 18.

6.4 Conclusões

Neste capítulo, são reportados testes realizados nos alimentadores *IEEE 13* nós e *IEEE 37* nós, com o objetivo de revelar as diferentes características da abordagem proposta, considerando a modelagem adotada.

A abordagem trifásica permite que se detectem gerações desbalanceadas, assim como fontes monofásicas e bifásicas. Esta característica é particularmente interessante quando comparada com a etapa de expansão do conjunto suspeito \mathcal{S} .

Como visto na Subseção 6.3.5, contanto que uma das fases de alguma das fontes de GD modeladas incorretamente esteja acima do limiar λ_t inicial, o processo de expansão de \mathcal{S} permite com que fon-

tes modeladas incorretamente, mas que não possuam multiplicadores de Lagrange Normalizados proeminentes, possam ter suas restrições errôneas identificadas. Portanto, nestas condições mesmo restrições errôneas mais sutis podem ser corretamente identificadas.

Além disso, um ajuste heurístico adequado de ϵ_{erro} permite aumentar ou diminuir a capacidade de identificação, face à topologia do sistema e à localização das fontes de GD.

Como discutido no Capítulo 4, os sistemas de distribuição são normalmente pouco monitorados, o que se constitui em um fator complicador para a metodologia proposta. Entretanto, deve-se observar que em nenhum dos planos de medição a redundância global foi maior que 2,4, valor considerado relativamente modesto quando se considera a redundância usualmente utilizada em sistemas de transmissão. Além disso, apesar da importância dos nós com fontes de GD, neste trabalho não é considerada a presença de medidas nestes elementos, às quais contribuiriam para melhorar significativamente a capacidade de detecção de erros.

7 Conclusão

7.1 Introdução

Neste trabalho, uma metodologia de monitoramento de redes de distribuição é apresentada, com ênfase no acompanhamento do *status* de fontes de geração distribuída.

Usando uma modelagem característica de sistemas de distribuição, um estimador de estados é desenvolvido, considerando a presença de fontes de geração distribuída cujos *status* podem ser desconhecidos ao operador. Os dados disponíveis ao estimador consistem de telemidas oriundas de um sistema SCADA e de uma rede AMI de medidores inteligentes, assim como pseudomedidas sobre injeções de potência obtidas a partir de previsão de carga. Para possibilitar a representação de desequilíbrios estruturais típicos de sistemas de distribuição, o estimador de estados desenvolvido utiliza uma modelagem trifásica para a rede elétrica. O monitoramento do *status* das fontes de geração distribuída faz uso de metodologias de detecção e identificação de erros grosseiros baseadas em multiplicadores de Lagrange normalizados e testes de colinearidade, previamente aplicadas à identificação de erros de modelagem em processos de estimação de estados de sistemas de transmissão equilibrados.

Neste capítulo, o desempenho da metodologia proposta no Capítulo 5 e aplicada a diferentes sistemas-teste no Capítulo 6 é discutida, levando em conta os objetivos almejados nesta dissertação. Em seguida, são apresentadas sugestões para a continuidade da pesquisa ao longo da mesma linha seguida neste trabalho.

7.2 Resultados Alcançados

Como discutido na Subseção 1.4, duas contribuições mais relevantes são almejadas pelo trabalho:

1. Modelar sistemas de distribuição considerando seus desequilíbrios estruturais inerentes, mediante a adoção de modelagem

trifásica (KERSTING, 2012);

2. Estender a metodologia de monitoramento de fontes de geração distribuída, incluindo não apenas aspectos ligados à potência ativa, mas também restrições *operacionais* de potência reativa.

Como apresentado nas análises descritas nas Subseções 6.2.2 e 6.3.1, os resultados do fluxo de potência, considerando a modelagem do Capítulo 3, fornecem resultados bastante aderentes aos apresentados nas referências primárias nas quais estes sistemas-teste são propostos (IEEE PES, 2015). Esta etapa serve portanto de validação para os modelos trifásicos desenvolvidos e aplicados na dissertação.

O uso de matrizes generalizadas, para a modelagem dos elementos do sistema de distribuição, permite uma representação por fase das diversas fontes de geração distribuída do sistema. Conseqüentemente, a cada unidade geradora estão associadas múltiplas restrições *operacionais* dentro do processo de estimação de estados.

Na Seção 6.2, a característica acima é explorada mediante a inclusão de uma fonte bifásica em um dos sistemas-teste. A análise individual de cada restrição provou ser capaz de identificar corretamente a presença de erros nesta fonte de geração distribuída. Este estudo de caso ilustra portanto a capacidade da metodologia proposta em detectar erros em restrições individuais associadas a fontes de geração distribuída, independente da fonte ser monofásica, bifásica ou trifásica. Os resultados da Subseção 6.3.5 que consideram fontes de GD desbalanceadas, também reforçam este ponto.

Ainda na Subseção 6.3.5, analisa-se o comportamento das técnicas de detecção e identificação de erros grosseiros em função da qualidade das informações disponíveis sobre o perfil da geração distribuída. É possível verificar que, quando maior a diferença entre a informação disponível e os valores verdadeiros de potência gerada, maior é a capacidade de detecção e identificação destes erros. À medida que esta diferença se reduz, torna-se mais difícil detectar o erro de modelagem, como seria de se esperar. Entretanto, a capacidade de identificação destes erros mostra-se bastante robusta, e se mantém mesmo em situações limites da etapa de detecção. Conclui-se portanto que o desempenho da

metodologia de identificação proposta se mantém mesmo na presença erros mais sutis na modelagem das fontes de geração distribuída.

No que tange à extensão da metodologia para a detecção nos erros de modelagem de restrições de potência reativa, como visto em diversos estudos de caso reportados no Capítulo 6, e em particular na Subseção 6.3.5, a metodologia se comporta bem, e os resultados obtidos indicam que esta generalização é vantajosa para o desempenho do método, principalmente em casos específicos de geração com baixo fator de potência.

7.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, concomitante com o advento de redes inteligentes, a metodologia abordada pode ser adaptada para incluir unidades de medição fasorial, auxiliada pela presença de medidores inteligentes. Estudos considerando a presença destes medidores reforçariam a eficácia da metodologia, além de fornecerem um maior embasamento para aplicações práticas.

Outra vertente a ser explorada é a extensão da abordagem de análise de erros de modelagem, para permitir o processamento de medições errôneas. Até o momento, os únicos erros admitidos nas simulações são provenientes da modelagem de fontes de geração distribuída. O uso da metodologia proposta para analisar erros nestes dois conjuntos de informações consistem em um grande desafio, principalmente pela possível interferência mútua desses erros sobre as capacidades de detecção e identificação dos dois tipos de dados espúrios. Para tanto, sugere-se o uso da aplicação dos testes de colinearidade em dois momentos do processo de estimação de estados, de maneira análoga aos testes de hipóteses adicionais, sugeridos em (COLOMBO, 2013).

A extensão da técnica para o monitoramento de Pontos de Acoplamento Comum (PCC's¹) foi abordado durante a etapa de pesquisa desta dissertação, e publicado em (ISSICABA; SIMÕES COSTA; COLOMBO, 2016). Os testes de colinearidade foram utilizados para detectar injeções de potência em diversos PCC's, em uma versão modificada do sistema-teste *IEEE 34* nós. Entretanto, não foi considerado a detec-

¹ Do Inglês, *Points of Common Coupling*.

ção de injeções negativas nestes pontos, ou seja, o monitoramento de cargas. A extensão da metodologia proposta para permitir o acompanhamento de consumidores também se constitui em um interessante desdobramento deste trabalho.

7.4 Conclusões

Neste capítulo são apresentadas conclusões acerca do desempenho da metodologia proposta para o monitoramento do *status* de fontes de geração distribuída em sistemas de distribuição ativos, com base em simulações computacionais realizadas com o auxílio de diferentes sistemas-teste. Os resultados obtidos mostram-se bastante satisfatórios, considerando-se a existência de um nível razoável de redundância de medidas e pseudomedidas disponíveis em tempo real nas redes de distribuição ativas.

O advento de novos paradigmas e tecnologias, em particular a medição fasorial sincronizada e a agregação de informações oriundas de medidores inteligentes, contribui para gerar condições ainda mais favoráveis ao desempenho da metodologia proposta, o que aumenta as perspectivas de sua aplicabilidade futura a sistema de distribuição ativos reais.

Referências

ABDEL-MAJEED, A. et al. Development of state estimator for low voltage networks using smart meters measurement data. In: IEEE. *Power-Tech (POWERTECH), 2013 IEEE Grenoble*. [S.l.], 2013. p. 1–6. Citado na página 6.

ABNT. Nbr 14039:2003 instalações elétricas de média tensão de 1,0 *kv* a 36.2 *kv*. 2003. Citado na página 21.

ABNT. Nbr 5410:2004 instalações elétricas de baixa tensão. 2004. Citado na página 21.

ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. Bad data identification when using ampere measurements. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 12, n. 2, p. 831–836, 1997. Citado na página 5.

ACHERMANN, T. Distributed power generation in a deregulated market environment. *Royal Institute of Technology*, 1999. Citado na página 3.

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 57, n. 3, p. 195–204, 2001. Citado na página 3.

ACKERMANN, T.; KNYAZKIN, V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 1357–1362. Citado na página 4.

AGUDELO, A. M. et al. Identificação de transações não-reveladas em ambiente desregulamentado. *Dissertação de Mestrado*, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000. Citado na página 6.

ANEEL. *Decreto N° 2.003, Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor e dá outras providências*. 1996. 10 de Setembro de 1996. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 12.

BANERJEE, S.; ROY, A. *Linear algebra and matrix analysis for statistics*. [S.l.]: CRC Press, 2014. Citado na página 85.

BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. State estimation for real-time monitoring of distribution systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 9, n. 3, p. 1601–1609, 1994. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 54.

BARAN, M. E.; ZHU, J.; KELLEY, A. W. Meter placement for real-time monitoring of distribution feeders. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 1, p. 332–337, 1996. Citado na página 5.

BEN-ISRAEL, A.; GREVILLE, T. N. *Generalized inverses: theory and applications*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2003. v. 15. Citado na página 72.

BROWN, R. E.; FREEMAN, L. A. Analyzing the reliability impact of distributed generation. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 1013–1018. Citado 3 vezes nas páginas 1, 3 e 13.

BROWN, R. E. et al. Siting distributed generation to defer t&d expansion. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 622–627. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 12.

CASTILLO, E. et al. *Building and solving mathematical programming models in engineering and science*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 62. Citado na página 62.

CIREDA, W. Dispersed generation-preliminary report. In: *CIREDA*. [S.l.: s.n.], 1999. v. 99, p. 2–5. Citado 3 vezes nas páginas 12, 13 e 15.

CLEMENTS, K.; DAVIS, P. Multiple bad data detectability and identifiability: a geometric approach. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 1, n. 3, p. 355–360, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 85.

CLEMENTS, K.; KRUMPHOLZ, G.; DAVIS, P. Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 4, p. 1779–1787, 1981. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

CLEMENTS, K.; SIMÕES COSTA, A. et al. Topology error identification using normalized lagrange multipliers. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 347–353, 1998. Citado 5 vezes nas páginas 6, 58, 61, 79 e 82.

CLEMENTS, K. A.; SIMÕES COSTA, A.; AGUDELO, A. Identification of parallel flows in power networks through state estimation and hypothesis testing. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 93–101, 2006. Citado na página 6.

COLOMBO, J. L. Relatório final de estágio curto. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Outubro de 2012. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.

COLOMBO, J. L. Monitoração dos status de fontes ativas de geração distribuída através de testes de hipóteses. *Trabalho de Conclusão de Curso*, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 6, 7, 8 e 129.

CUTSEM, T. V.; RIBBENS-PAVELLA, M.; MILI, L. Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 11, p. 3239–3252, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

DONDI, P. et al. Network integration of distributed power generation. *Journal of Power Sources*, Elsevier, v. 106, n. 1, p. 1–9, 2002. Citado na página 12.

DOPAZO, J.; KLITIN, O.; VANSLYCK, L. State calculation of power systems from line flow measurements, part ii. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 1, p. 145–151, 1972. Citado na página 57.

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. Operating conflicts for distributed generation on distribution systems. In: *IEEE. Rural Electric Power Conference, 2001*. [S.l.], 2001. p. A3–1. Citado na página 4.

FARHANGI, H. The path of the smart grid. *Power and energy magazine, IEEE*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 18–28, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.

GEISLER, K. I. Ampere magnitude line measurements for power system state estimation. *IEEE Power Engineering Review*, v. 8, n. PER-4, p. 31–32, 1984. Citado 3 vezes nas páginas 2, 5 e 54.

GERWEN, R. van; JAARSMA, S.; WILHITE, R. Smart metering. *Leonardo-energy.org*, v. 9, 2006. Citado na página 16.

GJELSVIK, A. The significance of the lagrange multipliers in wls state estimation with equality constraints. In: *11th PSCC meeting, Avignon*. [S.l.: s.n.], 1993. Citado na página 65.

GJELSVIK, A.; AAM, S.; HOLTEN, L. Hachtel's augmented matrix method—a rapid method improving numerical stability in power system static state estimation. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 11, p. 2987–2993, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 64.

GOMES, P. et al. Geração distribuída: vantagens, problemas e perspectivas. *XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, p. 17–22, 1999. Citado na página 3.

GOMEZ-QUILES, C.; GÓMEZ-EXPOSITO, A.; JAÉN, A. De la V. State estimation for smart distribution substations. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 3, n. 2, p. 986–995, 2012. Citado na página 5.

IEEE. Ieee standart requirements, terminology, and test code for step-voltage and induction voltage regulators, *ansi/ieee c57.15-1986*. 1988. Citado na página 32.

IEEE PES. *IEEE 34 Node Test Feeder*. 2015. Conteúdo Online. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>.

Acesso em 03 de Novembro de 2015. Citado 11 vezes nas páginas 20, 23, 95, 96, 97, 99, 100, 108, 111, 112 e 128.

IEEE, S. . T. *IEEE Standard for interconnecting distributed resources into electric power systems*. 2003. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 14.

ISSICABA, D.; SIMÕES COSTA, A.; 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, 2016. Citado na página 129.

JAEN, A.; EXPÓSITO, A. G. et al. Including ampere measurements in generalized state estimators. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 603–610, 2005. Citado na página 5.

KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. [S.l.]: CRC press, 2012. Citado 28 vezes nas páginas 2, 8, 9, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 48, 128 e 155.

LASSETER, R. H. Microgrids. In: IEEE. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 305–308. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

LASSETER, R. H.; PAIGI, P. Microgrid: a conceptual solution. In: IEEE. *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*. [S.l.], 2004. v. 6, p. 4285–4290. Citado na página 15.

LI, K. State estimation for power distribution system and measurement impacts. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 11, n. 2, p. 911–916, 1996. Citado na página 4.

LIN, W.-M.; TENG, J.-H.; CHEN, S.-J. A highly efficient algorithm in treating current measurements for the branch-current-based distribution state estimation. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 16, n. 3, p. 433–439, 2001. Citado na página 5.

LIU, J. et al. Trade-offs in pmu deployment for state estimation in active distribution grids. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 3, n. 2, p. 915–924, 2012. Citado na página 5.

LOPES, J.; MOREIRA, C.; MADUREIRA, A. Defining control strategies for microgrids islanded operation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 2, p. 916–924, 2006. Citado na página 16.

LOPES, J. P. et al. Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 77, n. 9, p. 1189–1203, 2007. Citado na página 4.

LOPES, J. P. et al. Microgrids black start and islanded operation. In: *15th Power systems computation conference (PSCC), Liege*. [S.l.: s.n.], 2005. Citado na página 15.

LOURENÇO, E. Análise de observabilidade e identificação de erros de topologia na estimação de estados generalizada. *Tese de Doutorado*, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001. Citado 8 vezes nas páginas 6, 53, 56, 63, 64, 79, 80 e 89.

LOURENÇO, E.; CLEMENTS, K.; SIMÕES COSTA, A. Geometrically-based hypothesis testing for topology error identification. In: SN. *Proc. of the 14th PSCC*. [S.l.], 2002. p. 24–28. Citado 3 vezes nas páginas 7, 82 e 84.

LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. Identificação de erros de topologia via multiplicadores de lagrange normalizados e testes de hipóteses. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 14, n. 2, p. 166–175, 2003. Citado na página 6.

LOURENÇO, E. M. et al. A topology error identification method directly based on collinearity tests. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1920–1929, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 79.

MIRANDA, V. et al. Reconstructing missing data in state estimation with autoencoders. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 604–611, 2012. Citado na página 5.

NAKA, S. et al. Practical distribution state estimation using hybrid particle swarm optimization. In: IEEE. *Power Engineering Society Winter Meeting, 2001. IEEE*. [S.l.], 2001. v. 2, p. 815–820. Citado na página 5.

NAKA, S. et al. A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 18, n. 1, p. 60–68, 2003. Citado na página 5.

NIKNAM, T. Application of honey-bee mating optimization on state estimation of a power distribution system including distributed generators. *Journal of Zhejiang University Science A*, Springer, v. 9, n. 12, p. 1753–1764, 2008. Citado na página 5.

PAPOULIS, A. *Probability, random variables, and statistic processes*. [S.l.]: McGraw-Hill Companies. Inc, 1991. Citado na página 80.

PEPERMANS, G. et al. Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy policy*, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 787–798, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 4 e 12.

PRESTON, G. T.; RASTLER, D. M. Distributed generation: competitive threat or opportunity? *Fortnightly*, v. 134, n. 15, 1996. Citado na página 3.

QUINTANA, V.; SIMÕES COSTA, A.; MANDEL, A. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, n. 3, p. 617–626, 1982. Citado na página 52.

SANTOS, M. C. d. Monitoração da geração distribuída em sistemas de distribuição. *Dissertação de Mestrado*, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

SHAFIU, A.; JENKINS, N.; STRBAC, G. Measurement location for state estimation of distribution networks with generation. *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-*, v. 152, n. 2, p. 240–246, Mar. 2005. ISSN 1350-2360. Citado na página 5.

SIMÕES COSTA, A. Determinação de conjunto críticos de medidas em planos de medição usados na estimação de estados em sistemas de potência. In: *Anais do 7o Congresso Brasileiro de Automática*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 830–836. Citado na página 52.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M. Identificação de erros de topologia utilizando multiplicadores de lagrange normalizados e testes de hipóteses. *XIII Congresso Brasileiro de Automática, Florianópolis, SC, Brasil*, p. 271–276, Setembro de 2000. Citado na página 6.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; VIEIRA, F. Topology error identification for orthogonal estimators considering a priori state information. In: *Proc. 15th Power Systems Computation Conf.* [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–6. Citado na página 7.

SIMÕES COSTA, A.; SANTOS, M. C. d. Real-time monitoring of distributed generation based on state estimation and hypothesis testing. In: *IEEE. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne*. [S.l.], 2007. p. 538–543. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

SIMÕES COSTA, A.; VIEIRA, F. Topology error identification through orthogonal estimation methods and hypothesis testing [power systems]. In: *IEEE. Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto*. [S.l.], 2001. v. 3, p. 6–pp. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 53.

SINGH, R.; PAL, B. C.; VINTER, R. B. Measurement placement in distribution system state estimation. *Power Systems, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 24, n. 2, p. 668–675, 2009. Citado na página 5.

SOUZA, A.; LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A. Real-time monitoring of distributed generation through state estimation and geometrically-based tests. In: *IEEE. Bulk Power System Dynamics and Control (iREP)-VIII (iREP), 2010 iREP Symposium*. [S.l.], 2010. p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.

SOUZA, A. T. d. Monitoração da geração distribuída em sistemas de distribuição via testes geométricos de colinearidade. *Dissertação de Mestrado*, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 7, 8, 82, 84, 88 e 93.

STOCK, F.; SIMÕES COSTA, A.; SOUZA, A. T. d. Estimador de estados para sistemas de distribuição com capacidade de monitoração em tempo real de geração distribuída. In: *XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande, PB. Anais do XIX CBA. Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Automática. [S.l.: s.n.], 2012. v. 1, p. 1–8. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 8.*

TENG, J.-H. Handling current-magnitude measurement in transmission and distribution system state estimator. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, IET*, v. 147, n. 4, p. 202–206, 2000. Citado na página 5.

TREVINO, C. Cases of difficult convergence in load-flow problems. *IEEE Paper*, v. 1, n. 2, p. 3, 1970. Citado na página 41.

TURKSON, J.; WOHLGEMUTH, N. Power sector reform and distributed generation in sub-saharan africa. *Energy Policy, Elsevier*, v. 29, n. 2, p. 135–145, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 11.

WANG, C.; NEHRIR, M. H. Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems. *Power Systems, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 19, n. 4, p. 2068–2076, 2004. Citado na página 4.

WANG, H.; SCHULZ, N. N. A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact. *Power Systems, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 19, n. 1, p. 207–213, 2004. Citado na página 5.

WRIGHT, A.; FORMBY, J.; NEW, D. *Overcoming barriers to scheduling embedded generation to support distribution networks. [S.l.]: Atomic Energy Research Establishment, Energy Technology Support Unit, New and Renewable Energy Programme, 2000. Citado na página 3.*

WU, J.; HE, Y.; JENKINS, N. A robust state estimator for medium voltage distribution networks. *Power Systems, IEEE Transactions on, IEEE*, v. 28, n. 2, p. 1008–1016, 2013. Citado na página 5.

Apêndices

APÊNDICE A – Matrizes Generalizadas em *Por Unidade*

No Capítulo 3, os elementos do SD são modelados a partir de suas matrizes generalizadas, de forma que as Equações (3.4), (3.5) e (3.6) possam ser aplicadas. Entretanto, esse equacionamento considera unidades reais.

Neste apêndice, é demonstrado o procedimento para se determinar as matrizes generalizadas em *por unidade* (*p.u.*), para um elemento genérico do SD.

Considere S_{base} como a potência base trifásica do SD, V_{baseu} e V_{based} como as tensões base de fase dos nós a montante e a jusante, respectivamente, do elemento genérico apresentado na Figura 2. Considere também a Equação (3.4):

$$[V_{abc}]_u = [\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d + [\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d \quad (\text{A.1})$$

Dividindo-se os elementos da Equação (A.1) pela tensão V_{baseu} , chega-se à:

$$\frac{[V_{abc}]_u}{V_{baseu}} = \frac{[\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d}{V_{baseu}} + \frac{[\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d}{V_{baseu}} \quad (\text{A.2})$$

Considerando que a tensão em *pu* de um nó k é dada por:

$$[V_{pu}]_k = \frac{[V_{abc}]_k}{V_{basek}} \quad (\text{A.3})$$

podemos reescrever a Equação (A.2) como:

$$[V_{pu}]_u = \frac{[\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d}{V_{baseu}} + \frac{[\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d}{V_{baseu}} \quad (\text{A.4})$$

É possível se relacionar as tensões de base a montante e a jusante do elemento genérico através de:

$$\mathcal{K} = \frac{V_{baseu}}{V_{based}} \quad (\text{A.5})$$

Manipulando-se a Equação (A.5) de forma a substituímos V_{base_u} no lado direito da Equação (A.4) chega-se à:

$$[V_{pu}]_u = \frac{[\mathbf{a}] \cdot [V_{abc}]_d}{\mathcal{K} \cdot V_{base_d}} + \frac{[\mathbf{b}] \cdot [I_{abc}]_d}{\mathcal{K} \cdot V_{base_d}} \quad (\text{A.6})$$

Aplicando-se novamente a definição dada pela Equação (A.3) à Equação (A.6):

$$[V_{pu}]_u = \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot [\mathbf{a}] \cdot [V_{pu}]_d + \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot [\mathbf{b}] \cdot \frac{[I_{abc}]_d}{V_{base_d}} \quad (\text{A.7})$$

Note que a constante \mathcal{K} depende do elemento. Para uma linha de transmissão, geralmente não se realiza troca de base, de modo que $\mathcal{K} = 1$. Já para um banco de transformadores, \mathcal{K} pode ser definida através da relação de transformação do mesmo.

A relação da Equação (A.3) pode ser aplicada também à corrente incidente em um nó genérico k :

$$[I_{pu}]_k = \frac{[I_{abc}]_k}{I_{base_k}} \quad (\text{A.8})$$

Manipulando-se a Equação (A.8) e a substituindo na Equação (A.7) chega-se à:

$$[V_{pu}]_u = \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot [\mathbf{a}] \cdot [V_{pu}]_d + \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot \frac{I_{base_d}}{V_{base_d}} \cdot [\mathbf{b}] \cdot [I_{pu}]_d \quad (\text{A.9})$$

Por se tratar de uma modelagem matricial, onde a potência total fornecida ao nó d é dada pelo somatório das potências fornecidas por cada fase, podendo ser expressa por:

$$S_d = [V_{abc}]_d^T \cdot [I_{abc}]_d^* \quad (\text{A.10})$$

Assim sendo, trata-se de uma modelagem fase a fase de cada nó, de forma que a corrente base injetada num dado nó k , I_{base_k} , pode ser expressa por:

$$I_{base_k} = \frac{S_{base}}{V_{base_k}} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo a Equação (A.11) na Equação (A.9):

$$[V_{pu}]_u = \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot [\mathbf{a}] \cdot [V_{pu}]_d + \frac{S_{base}}{\mathcal{K} \cdot V_{base_d}^2} \cdot [\mathbf{b}] \cdot [I_{pu}]_d \quad (\text{A.12})$$

É possível expressar a Equação (3.4) em $p.u.$:

$$[V_{pu}]_u = [\mathbf{a}_{pu}] \cdot [V_{pu}]_d + [\mathbf{b}_{pu}] \cdot [I_{pu}]_d \quad (\text{A.13})$$

onde:

$$\begin{cases} [\mathbf{a}_{pu}] &= \frac{1}{\mathcal{K}} \cdot [\mathbf{a}] \\ [\mathbf{b}_{pu}] &= \frac{S_{base}}{\mathcal{K} \cdot V_{base_d}^2} \cdot [\mathbf{b}] \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

Aplicando este mesmo procedimento para as Equações (3.5) e (3.6), determina-se o equivalente em $p.u.$ das demais matrizes generalizadas:

$$\begin{cases} [\mathbf{c}_{pu}] &= \frac{\mathcal{K} \cdot V_{base_d}^2}{S_{base}} \cdot [\mathbf{c}] \\ [\mathbf{d}_{pu}] &= \mathcal{K} \cdot [\mathbf{d}] \\ [\mathcal{A}_{pu}] &= \mathcal{K} \cdot [\mathcal{A}] \\ [\mathcal{B}_{pu}] &= \frac{S_{base}}{V_{base_d}^2} \cdot [\mathcal{B}] \end{cases} \quad (\text{A.15})$$

É importante ressaltar que a tensão V_{base} é relativa à tensão de fase, diferentemente de sistemas $p.u.$ convencionais onde essa tensão corresponde à tensão entre fases (tensão de linha).

APÊNDICE B – Aglutinação de Elementos em Cascata

Considere dois elementos do SD conectados um ao outro em cascata, conforme exibido na Figura 19.

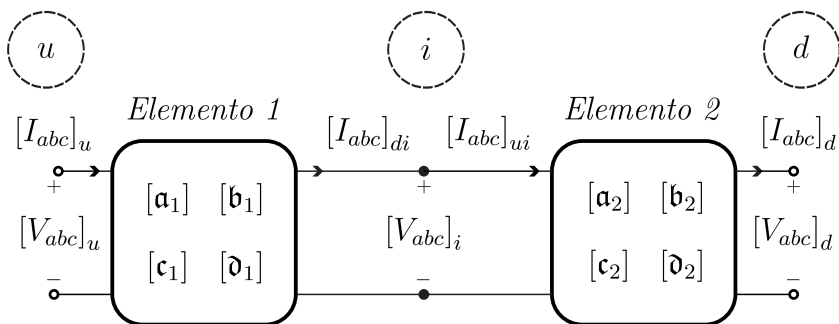


Figura 19 – Elementos do SD em Cascata

Considere também que o nó intermediário i seja um nó de passagem, e que não exista nenhum outro ramo conectado a ele. É possível aglutinar esses dois elementos, de tal forma que o nó i seja virtualmente removido do SD sem que incorra erros nas tensões e correntes no restante da rede.

Pelo modelo do quadripolo, temos que as tensões e correntes a montante e a jusante de cada ramo podem ser relacionada por suas respectivas matrizes generalizadas, conforme a Equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_u \\ [I_{abc}]_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_1] & [b_1] \\ [c_1] & [d_1] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_i \\ [I_{abc}]_{di} \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_i \\ [I_{abc}]_{ui} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [a_2] & [b_2] \\ [c_2] & [d_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_d \\ [I_{abc}]_d \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

A partir das considerações realizadas a respeito do nó i , é possível afirmar pela lei de Kirchoff das correntes que:

$$[I_{abc}]_{di} = [I_{abc}]_{ui} = [I_{abc}]_i \quad (\text{B.3})$$

Aplicando-se a Equação (B.3) às Equações (B.1) e (B.2), e substituindo uma na outra, chega-se a uma equação com as matrizes generalizadas em cascata:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_u \\ [I_{abc}]_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{a}_1] & [\mathbf{b}_1] \\ [\mathbf{c}_1] & [\mathbf{d}_1] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\mathbf{a}_2] & [\mathbf{b}_2] \\ [\mathbf{c}_2] & [\mathbf{d}_2] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_d \\ [I_{abc}]_d \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

de maneira que seja possível reescrever a Equação (B.4) como:

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}]_u \\ [I_{abc}]_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{a}_{eq}] & [\mathbf{b}_{eq}] \\ [\mathbf{c}_{eq}] & [\mathbf{d}_{eq}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [V_{abc}]_d \\ [I_{abc}]_d \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

onde:

$$\begin{bmatrix} [\mathbf{a}_{eq}] & [\mathbf{b}_{eq}] \\ [\mathbf{c}_{eq}] & [\mathbf{d}_{eq}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{a}_1] & [\mathbf{b}_1] \\ [\mathbf{c}_1] & [\mathbf{d}_1] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [\mathbf{a}_2] & [\mathbf{b}_2] \\ [\mathbf{c}_2] & [\mathbf{d}_2] \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

O uso da Equação (B.5) permite que as variáveis elétricas equivalentes ao nó i não mais precisem ser calculadas, permitindo a remoção virtual desse nó. O ramo equivalente é representado na Figura 20.

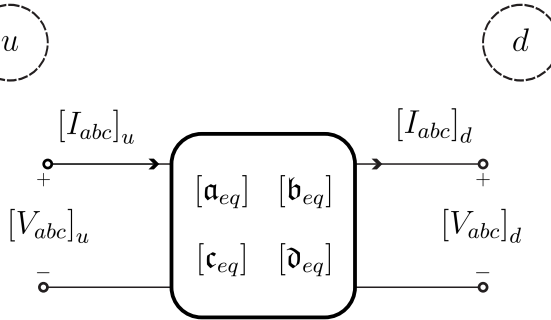


Figura 20 – Quadripolo Equivalente de Ramais Aglutinados

Por fim, determinam-se as matrizes generalizadas utilizadas na Equação (3.6), $[\mathcal{A}_{eq}]$ e $[\mathcal{B}_{eq}]$. Embora em muitos casos as Equações (3.7) e (3.8) sejam aplicáveis, a aglutinação de elementos pode gerar matrizes $[\mathbf{a}_{eq}]$ singulares, impossibilitando a sua inversão.

Aplicando-se a Equação (3.6) para à elemento, levando em conta a Equação (B.3), chega-se à:

$$[V_{abc}]_i = [\mathcal{A}_1] \cdot [V_{abc}]_u - [\mathcal{B}_1] \cdot [I_{abc}]_i \quad (\text{B.7})$$

$$[V_{abc}]_d = [\mathcal{A}_2] \cdot [V_{abc}]_i - [\mathcal{B}_2] \cdot [I_{abc}]_d \quad (\text{B.8})$$

Substituindo-se a Equação (B.7) em (B.8), obtêm-se:

$$[V_{abc}]_d = [\mathcal{A}_2] \cdot \{[\mathcal{A}_1] \cdot [V_{abc}]_u - [\mathcal{B}_1] \cdot [I_{abc}]_i\} - [\mathcal{B}_2] \cdot [I_{abc}]_d \quad (\text{B.9})$$

A corrente $[I_{abc}]_i$ é dada a partir da segunda linha da Equação (B.2):

$$[I_{abc}]_i = [c_2] \cdot [V_{abc}]_d + [\mathfrak{d}_2] \cdot [I_{abc}]_d \quad (\text{B.10})$$

Entretanto, como visto no Capítulo 3, devido à hipótese de ausência de admitância *shunt* na modelagem das linhas, para todos os elementos presentes nos SD simulados neste trabalho, a matriz $[c]$ é nula. Assim, reescrevendo a Equação (B.10):

$$[I_{abc}]_i = [\mathfrak{d}_2] \cdot [I_{abc}]_d \quad (\text{B.11})$$

Substituindo-se a Equação (B.11) em (B.9), e operando-se os elementos do lado direito:

$$\begin{aligned} [V_{abc}]_d &= [\mathcal{A}_2] \cdot [\mathcal{A}_1] \cdot [V_{abc}]_u \\ &\quad - \{[\mathcal{A}_2] \cdot [\mathcal{B}_1] \cdot [\mathfrak{d}_2] + [\mathcal{B}_2]\} \cdot [I_{abc}]_d \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

ou ainda:

$$[V_{abc}]_d = [\mathcal{A}_{eq}] \cdot [V_{abc}]_u - [\mathcal{B}_{eq}] [I_{abc}]_d \quad (\text{B.13})$$

onde:

$$\begin{cases} [\mathcal{A}_{eq}] &= [\mathcal{A}_2] \cdot [\mathcal{A}_1] \\ [\mathcal{B}_{eq}] &= [\mathcal{A}_2] \cdot [\mathcal{B}_1] \cdot [\mathfrak{d}_2] + [\mathcal{B}_2] \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

A aplicação das Equações (B.6) e (B.14) permite o aglutinamento de dois elementos em cascata, procedimento que reduz o número de nós do SD, diminuindo assim a sua complexidade e aumentando a redundância global do plano de medição do sistema.

APÊNDICE C – Simulação de Medidas

Para aplicar a metodologia de monitoramento de redes de distribuição em ambiente de laboratório, faz-se necessário a utilização de um simulador de medidas. A partir da modelagem do sistema, de um aplicativo de fluxo de potência e do desvio padrão associado a cada informação, medidas e pseudomedidas do plano de medição podem ser simuladas computacionalmente.

Considere um plano de medição qualquer, localizado em um SD. A partir da modelagem dos componentes do sistema e do vetor de estados reais x , obtido através de um algoritmo de fluxo de potência, é possível determinar os valores verdadeiros de todas as medições. Assim sendo, reescrevendo a Equação (4.6), temos:

$$v_{real} = h_m(x) \quad (C.1)$$

onde $h_m(x)$ é calculado de acordo com a Seção 4.5.

Como visto na Subseção 4.3.1, o vetor de medidas v_m é dado pela Equação (4.3), reproduzida abaixo:

$$v_m = v_{real} + \eta_m = h_m(x) + \eta_m \quad (C.2)$$

O objetivo do simulador de medidas é calcular o vetor v_m simulado, de acordo com a Equação (C.2). Logo, faz-se necessário determinar o vetor de erros de medição η_m .

Na Seção 4.3.1, é visto que os vetor η_m é modelado como uma variável aleatória gaussiana com média nula e desvio-padrão σ . Desta maneira, considere σ_m um vetor $m \times 1$ contendo os desvios-padrão de cada medidor no plano de medição.

Em ambiente Matlab®, a função $nrand([i \ j])$ gera uma matriz $i \times j$, cujos elementos são valores aleatórios, que seguem a distribuição normal (média nula e $\sigma = 1$). Assim, o vetor η_m pode ser modelado, a partir de σ_m , por:

$$\eta_m = diag \{ nrand([m \ 1]) \} . \sigma_m \quad (C.3)$$

Substituindo a Equação (C.3) na Equação (C.2):

$$v_m = h_m(x) + \text{diag} \{ \text{nrnd}([m \ 1]) \} \cdot \sigma_m \quad (\text{C.4})$$

A aplicação da Equação (C.4) permite a simulação de qualquer plano de medição.

Anexos

ANEXO A – Tensões de Linha e de Fase em Sistemas Desequilibrados

Extraído de (KERSTING, 2012). Modificado pelo Autor.

Para um sistema trifásico equilibrado, em que todas as tensões possuem o mesmo módulo, e estão defasadas em 120° , a relação entre as tensões de fase e linha é dada por:

$$[V_{abc}] = t_s^* \cdot [V_{Lab}] \quad (\text{A.1})$$

onde:

$$t_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 30^\circ \quad (\text{A.2})$$

A relação (A.1), entretanto, não é válida para sistemas desequilibrados, nos quais as tensões de fase e linha não possuem as mesmas magnitudes e/ou estão defasadas de 120° entre si.

Para obter-se as tensões de linha a partir das tensões de fase, basta aplicarmos a definição de tensão de linha, ou seja, para a tensão V_{Lab} :

$$V_{Lab} = V_a - V_b \quad (\text{A.3})$$

Aplicando a relação (A.3) para todas as tensões de linha, chega-se à seguinte relação matricial:

$$[V_{Lab}] = [D] \cdot [V_{abc}] \quad (\text{A.4})$$

onde:

$$[D] = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

A Equação (A.4) fornece as tensões de linha, a partir das tensões de fase, para qualquer sistema, desequilibrado ou não. Entretanto, a Equação (A.4) não pode ser utilizada para obter as tensões de fase a partir das tensões de linha, posto que a matriz $[D]$ é singular, e portanto, não inversível.

Pela teoria de componente simétricas, um sistema trifásico desequilibrado pode ser transformado em um sistema de sequência zero, e dois sistemas equilibrados de sequência positiva e negativa:

$$[V_{L012}] = [A_s]^{-1} \cdot [V_{Labc}] \quad (\text{A.6})$$

onde:

$$[A_s] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a_s^2 & a_s \\ 1 & a_s & a_s^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

e:

$$a_s = 1 \angle 120^\circ \quad (\text{A.8})$$

Por serem equilibradas, as tensões de linha de sequência positiva e negativa se relacionam às suas respectivas tensões de fase de maneira similar à Equação (A.1). Assim, levando em conta a ordenação adequada das seqüências nula, positiva e negativa, é possível definir a seguinte relação matricial:

$$[V_{012}] = [T] \cdot [V_{L012}] \quad (\text{A.9})$$

onde:

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & t_s^* & 0 \\ 0 & 0 & t_s \end{bmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Aplicando o inverso da relação dada pela Equação (A.6), é possível obter as tensões de fase V_{abc} a partir das suas componentes simétricas:

$$[V_{abc}] = [A_s] \cdot [V_{012}] \quad (\text{A.11})$$

Regressivamente, substituindo (A.9) em (A.11):

$$[V_{abc}] = [A_s] \cdot [T] \cdot [V_{L012}] \quad (\text{A.12})$$

e substituindo (A.6) em (A.12), chega-se à relação matricial:

$$[V_{abc}] = [F] \cdot [V_{Labc}] \quad (\text{A.13})$$

onde:

$$[F] = [A_s] \cdot [T] \cdot [A_s]^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.14})$$

Equação (A.13) permite determinar as tensões de fase, a partir das tensões de linha, para tanto para sistemas equilibrados, quanto desequilibrados.