



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPgEE**

**UM ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO
EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA COM BASE
NO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS**

Marcos Antonio Dias de Almeida

**Natal, RN – Brasil
Dezembro de 2003**

Marcos Antonio Dias de Almeida

**UM ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO
EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA COM BASE
NO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor em Ciências, na área de Automação e Controle de Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: **Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Júnior**

**Natal, RN – Brasil
Dezembro de 2003**

Marcos Antonio Dias de Almeida

**UM ALGORITMO PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO
EM ALIMENTADORES DE DISTRIBUIÇÃO
DE ENERGIA ELÉTRICA COM BASE
NO MÉTODO DA SOMA DE POTÊNCIAS**

Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor

Aprovado por:

Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Jr.

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra

Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza

Prof. Dr. José Tavares de Oliveira

Prof. Dr. Adrião Duarte Dória Neto

**Natal, RN – Brasil
Dezembro de 2003**

*Aos meus pais, minha esposa Cristina e meus filhos Tiago e Beatriz
pelo apoio, compreensão e incentivo em todos os momentos.*

Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho só foi possível graças à participação de pessoas e instituições que gostaria de registrar os meus sinceros agradecimentos.

- A Deus pela saúde, paz, família e amigos que tem me concedido até o presente momento.
- Em especial, ao professor e amigo Manoel Firmino pela orientação, incentivo, confiança e contribuição com novas idéias.
- A todos os professores e amigos do DEE e DCA pela motivação, carinho e especial atenção que sempre me dispensaram. Particularmente, ao professor José Alberto Nicolau pela amizade fraterna e efetiva participação.
- Ao aluno de Engenharia Elétrica Daniel Braz por sua amizade e colaboração em todas as etapas de desenvolvimento do trabalho.
- Aos professores Francisco Mota, Paulo Motta e ao engenheiro Alexandre Manoel por suas participações no desenvolvimento de *softwares* aplicativos que permitiram a interligação do estimador de estado desenvolvido com o sistema supervisor da COSERN.
- Ao PPgEE da UFRN, nas pessoas do ex-coordenador Adelardo Dantas e do atual Francisco Mota.
- Às instituições de ensino público e gratuito de nosso país, pois, sem elas dificilmente teria alcançado esse nível de graduação. Em particular, à UFRN que já faz parte da minha vida. Desde 1975 integro sua comunidade, primeiramente como aluno do curso de Engenharia Elétrica e a partir de 1978 como professor do Departamento de Engenharia Elétrica.
- À COSERN pelos suportes técnico e financeiro, tendo em vista que parte deste trabalho integrou o programa de P&D da Empresa, correspondente aos ciclos 2000-2001 e 2001-2002.
- Às pessoas que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente.
- Aos pesquisadores cujos trabalhos serviram-me como fonte de consulta.

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
Capítulo 2 – Estimação de Estado pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, com Solução via Equação Normal de Gauss – Aspectos Básicos	
2.1 Introdução	8
2.2 Método dos mínimos quadrados ponderados	8
2.2.1 Equação normal de Gauss	9
2.3 Montagem do modelo de medição	12
2.4 Dados gerais de entrada e saída de um estimador de estado	14
2.5 Observabilidade de sistemas elétricos, medidas redundantes e medidas críticas	15
2.5.1 Observabilidade	16
2.5.2 Medidas redundantes	16
2.5.3 Medidas e conjuntos críticos	17
2.6 Determinação de variâncias de grandezas medidas e pseudomedidas	17
2.6.1 Variâncias de grandezas medidas	18
2.6.2 Variâncias de grandezas pseudomedidas	19
Capítulo 3 – Um Novo Método para Ajuste de Carga de Alimentador Radial	
3.1 Introdução	21
3.2 Uma nova forma de calcular fator de utilização	21
3.3 Algoritmo de ajuste	22
3.3.1 Aplicação do método	24
Capítulo 4 – Estimação de Estado de Alimentadores de Distribuição Através do Método de Schweppe	
4.1 Introdução	26
4.2 Construção do modelo	26
4.3 Algoritmo	30
4.4.1 Aplicação e análise de desempenho	32
Capítulo 5 – Estimador de Estado de Corrente Proporcional	
5.1 Introdução	41
5.2 Construção do modelo	41
5.3 Algoritmo	42
5.3.1 Aplicação e análise de desempenho	43

Capítulo 6 – Estimação de Estado em Subestação de Distribuição

6.1	Introdução	46
6.2	Estimativas de fluxos de potência para a saída de alimentador, considerando um fator de potência estimado (<i>Método A</i>)	46
6.3	Estimativas de fluxos de potência para a saída de alimentador, empregando um algoritmo de estimação de estado (<i>Método B</i>)	47
6.4	Algoritmo	51
6.4.1	Aplicação e análise de desempenho	52

Capítulo 7 – Estimador de Estado Soma de Potências: Modelos Linear e Não-Linear

7.1	Introdução	57
7.2	Fluxo de carga soma de potências	57
7.2.1	Desenvolvimento matemático	58
7.3	Estimador de estado soma de potências: modelo linear	61
7.3.1	Construção do modelo	63
7.3.2	Algoritmo	67
7.3.3	Aplicação do algoritmo e análise de resultados	69
7.4	Estimador de estado soma de potências: modelo não-linear	70
7.4.1	Construção do modelo	71
7.4.2	Algoritmo	77
7.4.3	Aplicação do algoritmo e análise de resultados	79

Capítulo 8 – Análise de Desempenho do Estimador Soma de Potências

8.1	Introdução	82
8.2	Influência dos métodos (<i>A</i> e <i>B</i>), usados na estimativa dos fluxos de potência na saída para alimentador, sobre o desempenho do estimador soma de potências	82
8.3	Influência do número de pontos com telemedição e do número de nós	83
8.4	Influência dos desvios dos fatores de utilização e de potência sobre as variâncias das pseudomedidas de potências injetadas nos nós	86
8.5	Influência do desvio em fator de utilização sobre as grandezas estimadas	87
8.6	Influência do desvio em fator de potência sobre as grandezas estimadas	90
8.7	Estudo comparativo entre os estimadores de estado de corrente proporcional, tradicional (Schweppe) e soma de potências	92

Capítulo 9 – Aplicação Prática do Estimador de Estado Soma de Potências

9.1	Introdução	94
9.2	Implementação prática do estimador para cálculo de perdas técnicas em alimentador	94
9.3	Interface gráfica	98
9.4	Tempos de execução dos aplicativos	101

Capítulo 10 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

10.1 Conclusões gerais	102
10.2 Trabalhos futuros	104

Referências	106
-------------	-----

Apêndice A – Dados de Entrada e Saída

A.1 Introdução	109
A.2 Dados para cálculo de variâncias de medidas e pseudomedidas	109
A.3 Organização de dados de entrada	110
A.4 Potências e tensões estimadas nos nós dos alimentadores-teste	111

Apêndice B – Diagramas Unifilares de Alimentadores Usados como Casos-Teste

B.1 Introdução	127
B.2 Alimentador NEO01N4	127
B.3 Alimentador NTU01J1	129
B.4 Alimentador NEO01N6	132
B.5 Alimentador NTU01J3	133

Símbolos e Abreviaturas

WLS: *Weighted Least Squares* (mínimos quadrados ponderados)

PQV: Conjunto de medição formado por potências ativa, reativa e tensão

PQI: Conjunto de medição formado por potência ativa, reativa e corrente

V_k : Tensão em um nó genérico k

p.u.: Por unidade

km : Trecho de genérico uma linha de transmissão ou alimentador de distribuição, que liga dois nós subseqüentes k e m (m à jusante de k).

θ_{km} : Abertura angular de linha ou trecho

P_{km} : Fluxo de potência ativa do nó k para o nó adjacente m

Q_{km} : Fluxo de potência reativa do nó k para o nó adjacente m

grupo A : Grupo de consumidores ligados em média (no caso, 13,8 kV) ou em alta tensão

GPS: *Global Positioning System*

COS: Centro de Operação do Sistema

Estimador dc : Estimador de estado linear ou linearizado

COSEERN: Companhia Energética do Rio Grande do Norte

\mathbf{z} : Vetor das grandezas medidas

$\hat{\mathbf{z}}$: Vetor \mathbf{z} estimado

\mathbf{x} : Vetor das variáveis de estado (vetor de estado)

$\hat{\mathbf{x}}$: Vetor \mathbf{x} estimado

$\Delta\mathbf{x}$: Vetor de resíduos dos elementos de \mathbf{x}

$\Delta\mathbf{z}$: Vetor de resíduos dos elementos de \mathbf{z}

$\boldsymbol{\eta}$: Vetor aleatório que modela os erros das grandezas medidas

\mathbf{R} : Matriz de covariância dos erros das grandezas medidas e/ou pseudomedidas

\mathbf{H} : Matriz Jacobiana

\mathbf{G} : Matriz de ganho

- P : Potência ativa injetada em um nó de carga
- Q : Potência reativa injetada em um nó de carga
- S : Potência aparente;
- P_S : Potência ativa equivalente ou potência-soma ativa
- Q_S : Potência reativa equivalente ou potência-soma reativa
- P_T : Fluxo de potência ativa que chega a um nó de referência
- Q_T : Fluxo de potência reativa que chega a um nó de referência
- P_{per} : Perda em potência ativa
- Q_{per} : Perda em potência reativa
- \dot{V} : Tensão complexa
- \dot{I} : Corrente complexa
- P^{med} : Potência ativa medida
- Q^{med} : Potência reativa medida
- P^{pmed} ou P_med : Potência ativa pseudomedida
- Q^{pmed} ou Q_med : Potência reativa pseudomedida
- L_r : Limite de erro sistemático
- σ_r : Desvio padrão sistemático
- \bar{V} : Valor médio de n medidas
- $Valor_{med}$: Valor medido de uma grandeza
- acr : Acurácia em porcentagem
- fu : Fator de utilização
- dfu : Desvio em fator de utilização
- fu_{cal} : Fator de utilização calculado
- fp : Fator de potência
- dfp : Desvio em fator de potência

sfp : Seno do ângulo de fator de potência

f_{div} : Fator de diversidade

D_m : Demanda máxima registrada em conta de energia mensal de consumidor do grupo A

fp_m : Fator de potência registrado em conta de energia mensal de consumidor do grupo A

NTU01J1: Alimentador 01, ligado à subestação Natal 1 da COSERN

NTU01J3: Alimentador 03, ligado à subestação Natal 1 da COSERN

NEO01N4: Alimentador 04, ligado à subestação Neópolis da COSERN

NEO01N6: Alimentador 06, ligado à subestação Neópolis da COSERN

P_{GA} : Pot. ativa injetada no ponto de entrega de consumidor do grupo A (nó do grupo A)

Q_{GA} : Pot. reativa injetada no ponto de entrega de consumidor do grupo A (nó do grupo A)

LT: Linha de transmissão

RD: Rede de distribuição

R_{km} : Resistência série de um trecho genérico km

X_{km} : Reatância série de um trecho genérico km

P_{km} : Fluxo de potência ativa do nó k para o nó m em um trecho genérico km

Q_{km} : Fluxo de potência reativa do nó k para o nó m em um trecho genérico km

G_{km} : Condutância da matriz de admitância nodal

B_{km} : Susceptância da matriz de admitância nodal

b_{km} : Susceptância série de um trecho genérico km

g_{km} : Condutância série de um trecho genérico km

I^{med} : Corrente medida

P_{flux}^{med} : Fluxo de potência ativa medido

Q_{flux}^{med} : Fluxo de potência reativa medido

$diag$: Diagonal de uma matriz de mesmo nome

$Valor_{est}$: Valor estimado de uma grandeza

erg : Erro relativo médio global

P_{AL} : Fluxo de potência ativa na saída de um alimentador supervisionado

Q_{AL} : Fluxo de potência reativa na saída de um alimentador supervisionado

fp_{AL} : Fator de potência de um alimentador supervisionado

sfp_{AL} : Seno do ângulo de fator de potência de um alimentador supervisionado

\hat{V}_k^{pmed} : Pseudomedida de tensão nodal estimada em um nó k

$\hat{\theta}_k^{pmed}$: Pseudomedida de ângulo de tensão nodal estimada em um nó k

\hat{P}_k^{pmed} : Pseudomedida de potência ativa injetada e estimada em um nó k

\hat{Q}_k^{pmed} : Pseudomedida de potência reativa injetada e estimada em um nó k

SAGE: Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia

FTP: *File Transfer Protocol*

C++: Linguagem de programação computacional

PERL: Linguagem de programação interpretada (executa tarefas)

LINUX: Plataforma de programação usada em microcomputador

PHP/HTML: Linguagem de programação usada na Internet

WEB: Rede mundial de computador

RRDTool: Linguagem de programação computacional

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Barra de um sistema de potência	12
Figura 3.1 – Diagrama unifilar de um alimentador radial reduzido	22
Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo de ajuste de carga	23
Figura 3.2 – Diagrama unifilar reduzido do alimentador NTU01J1	24
Figura 4.1 – Diagrama unifilar de um alimentador radial	26
Figura 4.2 – Fluxograma do estimador de estado de Schweppe	31
Figura 4.3 – Diagrama unifilar reduzido do alimentador NEO01N4	32
Figura 5.1 – Fluxograma do algoritmo do estimador de estado de corrente proporcional	42
Figura 6.1 – Diagrama unifilar do barramento de saída de uma subestação de média tensão	47
Figura 6.2 – Diagrama unifilar do barramento de média tensão da SE Neópolis (COSERN)	52
Figura 7.1 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial	57
Figura 7.2 – Diagrama do sistema reduzido a dois nós	58
Figura 7.3 – Diagrama unifilar de um trecho de alimentador formado por dois nós	59
Figura 7.4 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição, onde se destaca o alimentador supervisionado	61
Figura 7.5 – Diagrama unifilar da seção de redução 1	62
Figura 7.6 – Diagrama unifilar da seção de redução 2	67
Figura 7.7 – Fluxograma do algoritmo do estimador soma de potências: modelo linearizado	68
Figura 7.8 – Fluxograma do algoritmo do estimador soma de potências: modelo não linear	80
Figura 8.1 – Gráfico de variação de σ_p^2 e σ_Q^2 em função de dfu	86
Figura 8.2 – Gráfico de variação de σ_p^2 e σ_Q^2 em função de dfp	86
Figura 9.1 – Diagrama de blocos do processo de interligação do estimador ao SAGE	96
Figura 9.2 – Diagrama de blocos das etapas de processamento do interligador	96
Figura 9.3 – Diagrama de blocos da interação do estimador com interligador	97

Figura 9.4 – Diagrama de blocos das saídas do estimador	97
Figura 9.5 – Módulo gráfico de apresentação de resultados do programa de estimação (tela principal)	98
Figura 9.6 – Perdas estimadas em potência ativa	99
Figura 9.7 – Perdas estimadas percentuais em potência ativa	100
Figura 9.8 – Corrente medida na saída para o alimentador	100
Figura 9.9 – Fator de potência estimado na saída para o alimentador	100
Figura 9.10 – Perdas estimadas de energia diária e mensal	101
Figura B.1 – Diagrama unifilar do alimentador NEO01N4	127
Figura B.2 – Diagrama unifilar do alimentador NTU01J1	129
Figura B.3 – Diagrama unifilar do alimentador NEO01N6	132
Figura B.4 – Diagrama unifilar do alimentador NTU01J3	133

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Fatores de utilização calculados para o alimentador NTU01J1, operando com carga máxima	24
Tabela 3.2 – Fatores de utilização calculados para o alimentador NTU01J1, operando com carga mínima	24
Tabela 4.1– Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima	34
Tabela 4.2 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima	35
Tabela 4.3 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária	35
Tabela 4.4- Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor \mathbf{z} , operando com carga máxima	37
Tabela 4.5 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor \mathbf{z} , operando com carga mínima	37
Tabela 4.6 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor \mathbf{z} , operando com carga intermediária	37
Tabela 4.7- Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u variável, operando com carga mínima	38
Tabela 4.8 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u fixo, operando com carga mínima	39
Tabela 4.9 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u fixo, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais	40
Tabela 5.1– Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima	43
Tabela 5.2 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima	43
Tabela 5.3 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária	44
Tabela 6.1 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição I)	54

Tabela 6.2 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição II)	54
Tabela 6.3 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição III)	55
Tabela 6.4 – Fatores de potência	55
Tabela 7.1 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima	69
Tabela 7.2 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima	70
Tabela 7.3 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária	70
Tabela 7.4 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima	79
Tabela 7.5 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima	80
Tabela 7.6 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária	80
Tabela 8.1– Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando as potências estimadas na saída para o alimentador (métodos <i>A</i> e <i>B</i>)	82
Tabela 8.2 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga mínima), considerando as potências estimadas na saída para o alimentador (métodos <i>A</i> e <i>B</i>)	83
Tabela 8.3 – Estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando em carga máxima (alimentador com três pontos de medição em tempo real)	84
Tabela 8.4 – Estimação de estado do alimentador NTU01J3, operando em carga máxima (alimentador com dois pontos de medição em tempo real)	85
Tabela 8.5 – Estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando em carga máxima (alimentador com um ponto de medição em tempo real)	85
Tabela 8.6 – Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando dois valores para <i>k_{fu}</i> : 1,0 e 0,4	87
Tabela 8.7 – Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (com carga máxima), considerando dois valores para <i>k_{fu}</i> : 1,0 e 0,4	87
Tabela 8.8 – Potências e tensões nodais estimadas para o NEO01N4 (com carga máxima); <i>k_{fu}</i> =1,0	89
Tabela 8.9 – Potências e tensões nodais estimadas para o NEO01N4 (com carga máxima); <i>k_{fu}</i> =0,4	89
Tabela 8.10 –Potências e tensões nodais estimadas para o NTU01J1 (com carga máxima); <i>k_{fu}</i> =1,0	90
Tabela 8.11 – Potências e tensões nodais estimadas para o NTU01J1 (com carga máxima); <i>k_{fu}</i> =0,4	90

Tabela 8.12 – Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando dois valores para kfp : 0,08 e 0,05	91
Tabela 8.13 – Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (com carga máxima), considerando dois valores para kfp : 0,08 e 0,05	91
Tabela 8.14 – Estimação de estado do alimentador NEO01N6 (com carga máxima), considerando os estimadores CP , TD e SP	92
Tabela 8.15 – Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando os estimadores CP , TD e SP	92
Tabela 8.16 – Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (com carga máxima), considerando os estimadores CP , TD e SP	93
Tabela 9.1 – Tensões e potências ativas e reativas estimadas por nó	99
Tabela A.1 – Organização de dados de nós	110
Tabela A.2 – Organização de dados de trechos	111
Tabela A.3 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais	112
Tabela A.4 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais	114
Tabela A.5 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais	117
Tabela A.6 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais	119
Tabela A.7 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais	120
Tabela A.8 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais	122
Tabela A.9 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (operando c/ carga máxima): potências e tensões estimadas, por nó, considerando $kfu = 0,4$ e $kfu=1,0$	124
Tabela B.1 – Dados dos nós do alimentador NEO01N4	128
Tabela B.2 - Dados dos trechos do alimentador NEO01N4	128
Tabela B.3 – Dados dos nós do alimentador NTU001J1	130
Tabela B.4 - Dados dos trechos do alimentador NTU001J1	130
Tabela B.5 – Dados dos nós do alimentador NEO01N6	132
Tabela B.6 - Dados dos trechos do alimentador NEO01N6	132
Tabela B.7 – Dados dos nós do alimentador NTU001J3	134
Tabela B.8 - Dados dos trechos do alimentador NTU001J3	134

Resumo

A grande maioria dos algoritmos de estimação de estado, que usa o modelo clássico, se destina à aplicação em sistemas de transmissão. Há poucos algoritmos para sistemas de distribuição. Isto se deve em parte, a pequena quantidade de dados de medição disponíveis em tempo real. A maioria dos alimentadores só dispõe de medição de corrente na saída do barramento de média tensão da subestação. Dessa forma, a aplicação de algoritmos tradicionais de estimação de estado para a supervisão de alimentadores pode ser inadequada, mesmo considerando dados obtidos *off-line* através de pseudomedições. Entretanto, a necessidade de automatização da operação dos sistemas de distribuição, principalmente no que diz respeito à seletividade quando da presença de defeitos, fez surgir alguns equipamentos telecomandados, que incorporam módulos de telemedição de algumas grandezas da rede, que podem ser transmitidas em tempo real para o centro de operação do sistema – COS. Isso permite o desenvolvimento de um novo modelo de estimador de estado, envolvendo medidas reais e pseudomedidas de cargas, que são construídas a partir da definição de fatores de potência e de utilização típicos de sistemas de distribuição.

O presente trabalho trata do desenvolvimento de um novo modelo de estimador de estado voltado para sistemas de distribuição, particularmente, alimentadores radiais. Baseia-se no algoritmo do fluxo de carga soma de potências. Daí o nome estimador de estado de soma de potências. O método faz a estimação de alimentador por seção, partindo da subestação para os ramais. Para cada seção é construído o modelo de medição. Isto resulta em sistemas de equações não-lineares, sobredeterminados, que requerem uma solução iterativa. Obtém-se essa solução através do método dos mínimos quadrados ponderados via equação normal de Gauss. As grandezas estimadas em uma seção são usadas como pseudomedidas para estimar a seção subsequente. O conjunto de medição de cada seção é constituído por pseudomedidas ou medidas de fluxos de potência nos trechos e tensões nodais, em tempo real, e por pseudomedidas de injeções de potências nos nós. As pseudomedidas de injeções de potência são construídas a partir das equações clássicas de potências injetadas, usadas no estudo de fluxo de carga. Assume-se ainda, que o sistema trifásico pode ser representado por seu equivalente monofásico. A grande vantagem do algoritmo está na simplicidade e rapidez do programa computacional que o implementa. Além disso, é muito eficiente no que diz respeito à exatidão das grandezas estimadas.

Além do estimador soma de potências, este trabalho mostra como outros algoritmos poderiam ser adaptados para prover estimação de estado de subestações e circuitos de média tensão, isto é, o método de Schweppe e um algoritmo baseado em proporcionalidade de corrente, que normalmente é usado em estudos de planejamento de redes. Ambos os estimadores foram implementados não somente como alternativas para o método proposto, mas também procurando obter resultados para servir de suporte para sua validação. Uma vez que na maioria dos casos não há medição de potências na saída para o alimentador e esta é requerida para implementação do método da soma de potências, um novo algoritmo para estimar as grandezas de rede em barra de média tensão foi também desenvolvido.

Abstract

Most algorithms for state estimation based on the classical model are just adequate for use in transmission networks. Few algorithms were developed specifically for distribution systems, probably because of the little amount of data available in real time. Most overhead feeders possess just current and voltage measurements at the middle voltage bus-bar at the substation. In this way, classical algorithms are of difficult implementation, even considering off-line acquired data as pseudo-measurements. However, the necessity of automating the operation of distribution networks, mainly in regard to the selectivity of protection systems, as well to implement possibilities of load transfer maneuvers, is changing the network planning policy. In this way, some equipments incorporating telemetry and command modules have been installed in order to improve operational features, and so increasing the amount of measurement data available in real-time in the System Operation Center (SOC). This encourages the development of a state estimator model, involving real-time information and pseudo-measurements of loads, that are built from typical power factors and *utilization factors* (demand factors) of distribution transformers.

This work reports about the development of a new state estimation method, specific for radial distribution systems. The main algorithm of the method is based on the *power summation load flow*. The estimation is carried out *piecewise*, section by section of the feeder, going from the substation to the terminal nodes. For each section, a measurement model is built, resulting in a nonlinear overdetermined equations set, whose solution is achieved by the Gaussian normal equation. The estimated variables of a section are used as pseudo-measurements for the next section. In general, a measurement set for a generic section consists of pseudo-measurements of power flows and nodal voltages obtained from the previous section – or measurements in real-time, if they exist –, besides pseudo-measurements of injected powers for the *power summations*, whose functions are the load flow equations, assuming that the network can be represented by its single-phase equivalent. The great advantage of the algorithm is its simplicity and low computational effort. Moreover, the algorithm is very efficient, in regard to the accuracy of the estimated values.

Besides the power summation state estimator, this work shows how other algorithms could be adapted to provide state estimation of middle voltage substations and networks, namely Schweppe's method and an algorithm based on current proportionality, that is usually adopted for network planning tasks. Both estimators were implemented not only as alternatives for the proposed method, but also looking for getting results that give support for its validation. Once in most cases no power measurement is performed at beginning of the feeder and this is required for implementing the power summation estimation's method, a new algorithm for estimating the network variables at the middle voltage bus-bar was also developed.

Capítulo 1

Introdução

Um sistema de supervisão e controle para sistemas de potência (em tempo real) é constituído por vários subsistemas (parciais), dentre os quais está o sistema de análise de rede, que é responsável pela execução de várias funções, tais como estimação de estado, estudo de fluxo de carga e despacho corretivo.

O principal objetivo de um estimador de estado é determinar os estados (amplitudes e ângulos de tensões nodais) da parte observável de um sistema de potência, que corresponde à parte supervisionada da rede. Além disso, o estimador de estado, por um processo de filtragem, é capaz de processar medidas com erros grosseiros, detectando suas presenças, identificando-as e eliminando seus efeitos no processo de estimação, desde que haja medidas redundantes em quantidade suficiente.

O problema de estimação de estado estática para sistema de potência, baseada em um estudo de fluxo de carga (modelo de ramos e nós), como também a sua solução pelo método aproximado dos mínimos quadrados ponderados (*Weighted Least Squares – WLS*), foi inicialmente formulado por Schweppe e Wildes (1970). Uma abordagem detalhada e abrangente desse problema pode ser encontrada na obra de Monticelli (1999).

O modelo de estimação de estado formulado por Schweppe e Wildes (1970), tem demonstrado ser uma ferramenta fundamental para automatização da operação e controle de sistemas de potência, tendo permanecido como uma área ativa, atual e controversa. Ultimamente, essa área tem sido o centro de muitas publicações sobre novos e melhores métodos. Entretanto, o método WLS está universalmente estabelecido na estimação do estado de sistemas de potência, devido à grande quantidade de medidas disponíveis em tempo real, que concorrem para o bom desempenho do estimador de estado de Schweppe.

Assim como o estudo de fluxo de carga, o estimador de estado desempenha um papel relevante na operação e planejamento dos sistemas de energia elétrica. Decisões de construção de novas subestações, linhas de transmissão, redes de distribuição, recondutoramento, ou até postergação de obras, são tomadas com base em estudos de fluxo de carga e/ou estimação de estado.

A grande maioria dos algoritmos já desenvolvidos, baseados no modelo de Schweppe, destina-se à aplicação em sistemas elétricos de geração e transmissão. Há poucos algoritmos para sistemas de distribuição. Isso se deve em parte, à pequena quantidade de dados de medição disponíveis em tempo real. A maioria dos alimentadores não dispõe de qualquer equipamento de medição instalado, além de amperímetros na saída do barramento de média tensão da subestação. Dessa forma, a aplicação de algoritmos

tradicionais de estimação de estado para a supervisão de alimentadores pode ser inadequada, mesmo considerando dados obtidos *off-line* através de pseudomedições.

Wu e Nayer (1990) desenvolveram um método de estimação de estado para alimentadores de distribuição radiais balanceados, que usa um conjunto de medição PQV (potência ativa, potência reativa e tensão) em uma formulação de mínimos quadrados ponderados. O processamento é geograficamente distribuído. Para isso, o alimentador é dividido em áreas. Cada área tem seu próprio processador e sistema de aquisição de dados em tempo real. Então, o método requer um número elevado de processadores, trabalhando em paralelo, e de medidas *on-line*. Esse número elevado de medidas *on-line*, nas condições atuais dos sistemas de distribuição, é praticamente impossível. Segundo os próprios autores, a comunicação entre os processadores pode ser lenta e os tempos de retardo de comunicação entre eles podem ser imprevisíveis, tornando difícil um processamento sincronizado. Para simplificações dos cálculos são feitas aproximações nos elementos das matrizes Jacobiana e de ganho. Essas aproximações consistem em negligenciar os termos envolvendo r e x (são considerados pequenos). Em distribuição, nem sempre esses termos são pequenos a ponto de poderem ser desprezados.

A fim de trabalhar com um número mínimo de medidas remotas disponíveis em tempo real, Roytelman e Shahidehpour (1993), propuseram um método novo de estimação de estado para sistemas de distribuição. As medidas PQI (potência ativa, potência reativa e corrente) são transformadas em equivalentes de corrente (consideradas medidas indiretas), as quais são decompostas em suas partes real e imaginária. Os ângulos das correntes medidas diretamente no alimentador são determinados, de forma aproximada, por uma solução de fluxo de carga. O método faz um ajuste de carga de transformadores de distribuição (previsão de carga), tal que resultem em fluxos de potências iguais às medições reais. Quando isso acontece considera que o problema da estimação de estado do alimentador supervisionado está resolvido. A maioria das correntes tomadas como medidas, na verdade, são pseudomedidas ou estimativas de corrente, feitas a partir de uma curva média de carga e fator de carga, que é atualizado a cada hora, de acordo com a curva de carga registrada para o alimentador. Resumindo, a cada hora são determinadas pseudomedidas de amplitude de corrente que são usadas na estimação de estado do sistema de distribuição. Essas pseudomedidas horárias não são suficientes para o que se exige, em termos de exatidão de um estimador de estado, que deve produzir respostas em janelas de tempo mais reduzidas.

Baran e Kelley (1994) apresentaram o desenvolvimento de um método trifásico de estimação de estado para aumentar a exatidão dos dados obtidos a partir de um procedimento de previsão de carga. No trabalho, foi desenvolvido um método baseado em um tratamento de mínimos quadrados ponderados (aproximação WLS), aplicado a uma formulação de análise nodal trifásica. Os elementos da matriz Jacobiana são considerados invariáveis com as iterações, o que decorre de linearizações baseadas nas hipóteses $V_k \cong 1,0$ p.u., $\cos\theta_{km} \cong 1$, $\sin\theta_{km} \cong 0$, para trechos da linha (as cargas são representadas com conexão para o neutro, em um sistema a quatro fios). Essas hipóteses não se verificam, entretanto, para alimentadores muito carregados. Algumas medidas de amplitude de corrente de linha são admitidas ao longo do alimentador. A principal dificuldade com a medição de corrente de linha, alegada pelos autores, reside no fato de que os termos correspondentes da matriz Jacobiana não podem ser aproximados por termos constantes.

Em 1995, Baran e Kelly apresentaram outro trabalho sobre o mesmo tema. O novo método proposto pelos autores permite a estimação de estado de alimentadores com topologia radial ou pouco malhada. Assim como no caso anterior, esse é um método trifásico de estimação de estado, que se fundamenta na aproximação WLS. A diferença principal entre os dois está no fato de que este método se baseia em correntes de ramo, ao invés de tensões nodais, como no caso anterior. As medidas de fluxos de potência e pseudomedidas de injeções de potência são convertidas em medidas equivalentes de corrente, que são decompostas em suas partes real e imaginária. Na conversão de fluxos de potência medidos, P_{km} e Q_{km} , em correntes equivalentes, os autores fazem $|V_k|^2 = 1$ p.u., que vem a ser uma aproximação grosseira para o caso de alimentador fortemente carregado. A partir de uma estimativa de ângulo de fator de potência, as amplitudes das correntes medidas são decompostos em partes real e imaginária. Para melhorar a eficiência computacional do algoritmo, os autores trabalham com uma regra de redução de alimentador. Para isso, “podam” os ramais, concentrando suas cargas no tronco do alimentador. Essa técnica é inadequada, quando se deseja estimar carga de transformador de distribuição ou de consumidor primário (consumidor do *grupo A*), que estão ligados nesses ramais.

Com o intuito de manter os elementos da matriz Jacobiana invariáveis com as iterações, Lu et al. (1995) apresentaram uma formulação de um estimador, baseada em injeção de corrente e corrente de ramo. Nesse caso, as medidas de potência são transformadas em medidas equivalentes de corrente. O algoritmo usa o método da equação normal de Gauss para calcular os estados (amplitude e ângulo de tensões nodais), em tempo real. Nos exemplos apresentados para validação do método, consideram muitas medidas em tempo real (12 a 50 medidas), simuladas pela solução de um fluxo de carga trifásico. Embora sem apresentar qualquer justificativa, os autores atribuem, aleatoriamente, erros $\pm 10\%$ e $\pm 30\%$ para grandezas medidas reais e pseudomedidas, respectivamente. Também não há qualquer fundamentação para a adoção dos pesos de $1/3$ para as medidas reais e $1/50$ para as pseudomedidas.

O tratamento adotado por Li (1996) requer um modelo estocástico de carga, o qual é influenciado pelas condições de variação do tempo e condições climáticas. A formulação baseia-se em um modelo trifásico da rede. Os erros das cargas são assumidos para variar de 20% a 50%, dependendo do tipo de consumidor. O algoritmo se baseia na aproximação WLS. Para análise de desempenho do estimador proposto, o autor adotou dois casos-teste simplificados: um deles bastante reduzido, constituído por 5 nós, e o outro considerado como um alimentador longo, com 20 nós. O estudo foi realizado para um circuito de baixa tensão. Considera, ainda, medição de fluxos de potência na saída para o circuito, quando na realidade é mais comum a medição de amplitude de corrente. Enfim, os casos apresentados correspondem a uma condição de teste do algoritmo bastante diferente da realidade prática.

Melipoulos e Zhang (1996), primeiramente apresentam um algoritmo para cálculo trifásico de fluxo de carga. O modelo é desenvolvido para um sistema trifásico a quatro fios. Tanto no cálculo de fluxo de carga, quanto no de estimação de estado, demonstram uma preocupação particular com cargas distribuídas, o que é perfeitamente dispensável, uma vez que a grande maioria das cargas é concentrada, como, aliás, corresponde à realidade prática. Assim como no método de Lu et al (1995), os modelos do fluxo de carga

e do estimador são baseadas em injeção de corrente. O algoritmo de estimação de estado pressupõe a existência de um sistema de supervisão com várias medidas de tensão e de corrente ao longo do alimentador. Os autores propõem um sistema de aquisição de dados, que se comunica com um sistema GPS (*Global Positioning System*) e este, por sua vez, faz a sincronização das medidas. Em seguida, devolve-as via rádio para o mesmo sistema de aquisição de dados. O algoritmo requer muitas medidas, que são simuladas através de solução de um fluxo de carga trifásico. A essas medidas são adicionados resíduos, aleatoriamente. Portanto, o modelo de estimador de estado proposto apóia-se na disponibilidade de grande quantidade de medidas, obtidas por um sistema de aquisição de dados complexo, fugindo, assim, da realidade prática.

Trabalhos anteriores sobre estimação de estado em redes de distribuição, à exceção do trabalho desenvolvido por Ghosh et al. (1997), têm procurado adaptar a aproximação WLS, aplicada a sistemas de transmissão, para sistemas de distribuição. Então, intrinsecamente, as medidas são consideradas uniformemente distribuídas e descorrelacionadas (erros independentes). Em sistemas de distribuição existem poucas medidas em tempo real, portanto, há necessidade de construção de pseudomedidas, que em conjunto com as medidas reais, irão torná-los observáveis. Entretanto, essa reunião de dados pode levar a problemas de convergência. Isso acontece sempre que há um grau elevado de *mismatch* entre os pesos associados às estimativas de demanda e os dados medidos, conforme relatam os próprios autores. O trabalho é apresentado como uma forma alternativa aproximada para estimação de estado em sistema de distribuição, que usa uma extensão de fluxo de carga probabilístico para sistema de distribuição radial. O algoritmo considera as medidas em tempo real como restrições de solução e as estimativas de carga de consumidores como pseudomedidas correlacionadas, com comportamento estocástico, que são bem ajustadas pela função densidade de probabilidade *beta*. Para chegar a essa aproximação, os autores trabalharam dados de demanda horária (kW), gravados de estabelecimentos puramente comerciais, em um circuito de baixa tensão real. Os resultados do estimador foram apresentados para uma versão reduzida de um circuito de distribuição com 6 nós, em baixa tensão. Os alimentadores primários reais são circuitos bem mais complexos, portanto, as técnicas propostas deveriam ter sido aplicadas em alimentadores primários reais para permitir melhor avaliação do desempenho do estimador.

A necessidade de automatização da operação dos sistemas de distribuição, principalmente no que diz respeito à seletividade quando da presença de defeitos, fez surgir alguns equipamentos telecomandados, que incorporam módulos de medição de algumas grandezas da rede, que podem ser transmitidas em tempo real para o centro de operação do sistema – COS. Isso permite o desenvolvimento de um modelo de estimação de estado, envolvendo medidas reais e pseudomedidas de cargas, que são construídas a partir da definição de fatores de potência e de utilização típicos de sistemas de distribuição. Esse modelo torna-se bastante simplificado, se for baseado no algoritmo de fluxo de carga soma de potências (CESPEDES, 1990), que é muito usado em redes de distribuição. Uma primeira formulação, considerando a hipótese de linearidade da rede (modelo linear ou *dc*) em uma representação monofásica, foi apresentada por Medeiros Jr. et al. (2002).

Uma segunda formulação apresentada por Almeida e Medeiros Jr. (2002), constitui o modelo não-linear de estimação de estado baseado no algoritmo do fluxo de carga soma de potências. Este modelo é a principal motivação do presente trabalho.

Devido ao reduzido número de medidas em tempo real em sistemas de distribuição, há a necessidade de construção de uma grande quantidade de pseudomedidas, para tornar observável o sistema que se deseja supervisionar. Esse fato pode afetar o desempenho de um estimador de estado de distribuição, principalmente, no que tange à acurácia das grandezas estimadas. Isso acontece, particularmente, com potências de carga de transformadores de distribuição e de consumidores do *grupo A*. Isto pode ocorrer tanto no modelo trifásico, quanto no monofásico. Portanto, pela rapidez e simplicidade de cálculo, optou-se por um modelo monofásico para o estimador de estado soma de potências. No futuro, com o incremento da quantidade de medidas em tempo real, recomenda-se um modelo trifásico.

O presente trabalho tem o objetivo geral de proporcionar informações em tempo real para tomada de decisões mais realistas no que tange a problemas de operação e planejamento de redes de distribuição. Atualmente, a solução de muitos desses problemas se fundamenta em uma estimativa da pior condição de operação da rede em um futuro próximo, quer do ponto de vista de carregamento dos alimentadores de média tensão, quer do ponto de vista de seu perfil de tensão. A fim de evitar problemas de incompatibilidade de pseudomedidas de cargas com as medidas de corrente, um algoritmo de associação dessas pseudomedidas às medidas de corrente em tempo real é introduzido, possibilitando um ajuste dos pesos atribuídos às pseudomedidas. Além disso, resíduos excessivos podem ser corrigidos localmente, sem envolver toda a rede, uma vez que a formulação explora a topologia radial do alimentador, estimando-o por parte.

Além deste capítulo introdutório, o presente trabalho é composto de mais nove capítulos e dois apêndices, que estão descritos resumidamente abaixo. Do quarto ao sétimo capítulo são desenvolvidos cinco algoritmos para estimação de estado, todos voltados para sistemas primários de distribuição de energia elétrica (subestação de média tensão e alimentadores). No final de cada um desses capítulos, são apresentados e discutidos resultados de estimação de estado de sistemas de distribuição reais.

No Cap. 2 apresenta-se a fundamentação matemática para solução do problema de estimação de estado pelo método dos mínimos quadrados ponderados. Além disso, mostra-se como são montados os modelos de circuito e de medição, onde as principais características de um estimador de estado WLS são destacadas. Os conceitos básicos de medidas redundantes e críticas são abordados. Assumindo que as medidas e pseudomedidas são descorrelacionadas, estabelecem-se considerações e aproximações para o cálculo das incertezas (variâncias), requeridas pelo modelo de medição adotado.

Tradicionalmente, fatores de utilização históricos têm sido usados na determinação de cargas para estudo de fluxo de carga. Para os propósitos deste trabalho, esses fatores são empregados na construção de pseudomedidas de potências ativas e reativas nos nós de carga do alimentador supervisionado. O Cap. 3 trata de um método mais refinado de ajuste de carga, em que os fatores de utilização são calculados com base em correntes e tensões medidas em tempo real.

O Cap. 4 trata da estimação de estado de alimentadores pelo método de Schweppe. Medições de amplitudes de corrente em tempo real e pseudomeições de injeções de

potências nos nós são utilizadas. As mesmas equações usadas no estudo de fluxo de carga tradicional são também empregadas na construção dos modelos de circuito e de medição, implicando em tomar como variáveis de estado as tensões e ângulos nodais. Com base nessas considerações, desenvolve-se um algoritmo e o respectivo programa computacional.

Algumas empresas de distribuição de energia elétrica realizam estimação de estado de seus alimentadores através de um programa de fluxo de carga que permite um ajuste linear das potências injetadas nos nós, de modo que a corrente calculada na saída para o alimentador convirja, dentro de uma tolerância pré-estabelecida, para a correspondente corrente medida. Neste trabalho, convencionou-se chamar este estimador de “estimador de estado de corrente proporcional”. O Cap. 5 reporta-se a tal estimador de estado.

O algoritmo do estimador de estado soma de potências requer medição de potências ativa e reativa na saída para o alimentador supervisionado. Como na grande maioria dos casos não há essa medição, então, se faz necessário estimar esses fluxos de potência. No caso deste trabalho, essas potências são determinadas com base em uma estimativa de fator de potência ou através de um algoritmo de estimador de estado, desenvolvido com essa finalidade. Este algoritmo realiza estimação de estado de subestação de média tensão, o qual está descrito no Cap. 6.

O Cap. 7 apresenta a maior contribuição deste trabalho. Contém o desenvolvimento e testes de um algoritmo de estimação de estado, voltado para alimentadores radiais, que se baseia no método de redução de rede, usado no fluxo de carga soma de potências. O modelo proposto faz a estimação do alimentador por seção, partindo da subestação para os ramos. As grandezas estimadas em uma seção são usadas como pseudomedidas para estimar uma seção subsequente. Para cada seção, são construídos um modelo de circuito e o correspondente modelo de medição. O conjunto de medição desse último é constituído por medidas de fluxos de potência em tempo real e por pseudomedidas de injeções de potências nos nós. O modelo de circuito é formado pelas equações clássicas de potências injetadas e pela lei dos nós. Além de tensões e ângulos nodais, fluxos de potência e injeções de potências também são usados como variáveis de estado. A fim de facilitar a fundamentação do método proposto, desenvolve-se primeiramente, um modelo linearizado, e, em seguida, o modelo não-linear.

No Cap. 8 faz-se uma análise de desempenho do algoritmo do estimador de estado soma de potências. Para isso, apresentam-se resultados de estimações de estado de diversos alimentadores reais. Esses resultados são comparados com os resultados dos demais algoritmos dos estimadores de estado abordados neste trabalho. Outros aspectos importantes, tais como convergência do método e erros de grandezas estimadas, são discutidos. Realiza-se ainda um estudo de impacto das variâncias dos erros das pseudomedidas sobre as acurácias das grandezas estimadas.

O programa computacional do estimador de estado soma de potências está, atualmente, sendo utilizado pela Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN), para estimar perdas técnicas em tempo real em alguns de seus alimentadores. Para colocá-lo em funcionamento em conjunto com o sistema supervisório da empresa, foi necessário o desenvolvimento de mais dois *softwares*: um para interligação e outro para interface gráfica. O último fornece resultados da estimação de estado em terminais de

vídeo de microcomputador. Detalhes funcionais desses programas, juntamente com alguns resultados obtidos em tempo real, são encontrados no Cap. 9.

O Cap. 10 apresenta as conclusões gerais e sugestões para desenvolvimento de trabalhos futuros.

Os programas que implementam os algoritmos dos estimadores de estado, estudados neste trabalho, solicitam dois tipos de dados de entrada: dados fixos (topologia e parâmetros do circuito, erros de medição e incertezas associadas às pseudomedições) e dados medidos em tempo real (tensões, correntes de ramo e fluxos de potência). No Apêndice *A* encontram-se os dados usados para cálculo de variâncias de medidas e pseudomedidas, usadas pelos algoritmos dos referidos estimadores de estado. Mostram-se também a organização dos dados fixos e os dados de nós e trechos dos alimentadores usados como casos-teste. Além disso, apresentam-se tabelas que contêm valores de potências e tensões, estimadas nos nós de carga desses alimentadores. No Apêndice *B* fornecem-se os diagramas unifilares desses alimentadores com os respectivos dados de trechos e nós.

Capítulo 2

Estimação de Estado pelo Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, com Solução via Equação Normal de Gauss – Aspectos Básicos

2.1 Introdução

Desde que foi formulada por Schweppe e Wildes (1970), a estimação de estado é reconhecida como a ferramenta adequada para modelar sistemas de potência em tempo real. O estimador de estado de sistemas de potência consiste em um conjunto de algoritmos para processar medidas em tempo real. Essas medidas são em geral redundantes e corrompidas por erros de medição, erros de conversão analógico-digital e ruídos de transmissão de dados. O estimador processa essas medidas (geralmente amplitudes de tensão, injeções de potência ativa e reativa em barras, fluxos de potência e correntes nas linhas) com o objetivo de fornecer estimativas confiáveis para os estados (ângulos e amplitudes das tensões nodais) da rede. A partir dos estados, é possível determinar outras variáveis, como fluxo de potência nas linhas de transmissão, injeções de potência nas barras, etc. A falta de medidas em tempo real poderá ser suprida, em algumas situações, por pseudomedidas obtidas através de técnicas de previsão de carga.

Neste capítulo, são abordados conceitos básicos da teoria de estimação de estado clássica, aplicada a sistemas de potência: método dos mínimos quadrados ponderados; modelos de circuito e de medição; observabilidade de um sistema supervisionado, medidas redundantes; medidas e conjuntos críticos; cálculo de variâncias de grandezas medidas e pseudomedidas.

2.2 Método dos mínimos quadrados ponderados

Segundo Simões Costa e Salgado (2002), os estimadores de estado, que processam um conjunto de medidas simultaneamente, são conhecidos como sendo do tipo lote (*batch*). Dentro dessa classe de estimadores, o mais comum é formulado com base no método dos mínimos quadrados ponderados, que é o método clássico para solução desse tipo de estimador. Todos algoritmos de estimação de estado desenvolvidos neste trabalho têm essas características.

Conforme se sabe, do cálculo de fluxo de carga, todas as grandezas necessárias à supervisão de uma rede, tais como fluxos de potências ativa e reativa, correntes e injeções de potências ativa e reativa, podem ser calculados a partir do vetor das tensões complexas (vetor de estado, \mathbf{x}). O seu conhecimento, a partir de medição direta nas diversas barras ou nós da rede, torna-se praticamente impossível, devido principalmente à dificuldade em se medir os ângulos de defasagem das tensões. Entretanto, algumas das grandezas que podem

ser facilmente medidas, podem ser expressas como um conjunto de funções das tensões complexas, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$.

Considerando um sistema elétrico composto por N nós, n variáveis de estado e m grandezas medidas (amplitudes de tensões nodais, potências ativas e reativas, amplitudes de correntes de ramos, etc.), pode-se escrever um sistema de equações não-lineares e/ou lineares $\mathbf{h}(\mathbf{x})$, que relaciona o conjunto de medidas, \mathbf{z} , desse sistema com as variáveis de estado, \mathbf{x} , e com os erros de medição, $\boldsymbol{\eta}$, isto é,

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

onde:

\mathbf{z} : vetor das grandezas medidas, de ordem $(m \times 1)$;

$\mathbf{h}(\mathbf{x})$: funções não-lineares e/ou lineares das variáveis de estado;

\mathbf{x} : vetor das variáveis de estado, de ordem $(n \times 1)$, onde $m > n$ (sistema sobredeterminado);

$\boldsymbol{\eta}$: vetor aleatório que modela os erros das grandezas medidas, de ordem $(m \times 1)$.

Pressupõe-se que $\boldsymbol{\eta}$ tem média zero e obedece a uma distribuição Gaussiana. Assim, para o valor esperado e para a variância, têm-se:

$$E(\boldsymbol{\eta}) = 0; \quad E(\boldsymbol{\eta} \boldsymbol{\eta}^T) = \mathbf{R} \quad (2.2)$$

onde \mathbf{R} é a matriz de covariância dos erros de medição, de ordem $(m \times m)$.

Considerando os erros das medidas como sendo decorrelacionados, então, a matriz \mathbf{R} , torna-se uma matriz diagonal, cujos elementos são definidos por $R_{ii} = \sigma_i^2$ (variâncias).

Conforme relacionadas em (2.1), as funções $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ só dependem das variáveis de estado, \mathbf{x} . Elas são obtidas através da aplicação das leis de Ohm e Kirchhoff (modelo de circuito). A rigor essas funções deveriam depender também dos parâmetros do circuito elétrico, mas, para fins do modelo de estimação de estado adotado neste trabalho, supõe-se que a topologia e os parâmetros são conhecidos com exatidão, de modo que se justifica a notação simplificada apresentada em (2.1).

2.2.1 Equação normal de Gauss

A solução do problema de estimação de estado, pelo método dos mínimos quadrados ponderados, consiste basicamente em estimar o vetor de estado, \mathbf{x} , de forma a minimizar a função objetivo, que se refere ao modelo de medição. Ou seja, minimiza-se a função objetivo representada pelo somatório dos quadrados dos resíduos, ponderados pelos inversos das variâncias (pesos), σ_i^2 , dos erros associados às medidas, z_i , ou seja,

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \frac{[z_i - h_i(\mathbf{x})]^2}{\sigma_i^2} \Leftrightarrow J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (2.3)$$

De acordo com (2.3), observa-se em que quanto menores as variâncias, maiores serão os pesos das medidas correspondentes sobre os resultados da estimação de estado. Conseqüentemente, medidas com incertezas maiores terão pesos menores.

Para minimizar a função objetivo $J(\mathbf{x})$, definida pela equação (2.3), deve-se ter em mente que a função $h_i(\mathbf{x})$ é não-linear e uma solução explícita não pode ser encontrada, sendo portanto necessário recorrer a um processo iterativo. Dentre os métodos apropriados para a solução do problema, destaca-se o método de Newton pelas suas excelentes características.

Seja \mathbf{x}_0 uma estimativa inicial para \mathbf{x} . Assim, a expansão em série de Taylor de $h_i(\mathbf{x})$, em torno de \mathbf{x}_0 , resulta em

$$h_i(\mathbf{x}) = h_i(\mathbf{x}_0) + \nabla^T h_i(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x} + (\sigma \rightarrow 0) \quad (2.4)$$

ou, generalizando

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}_0) + \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x} \quad (2.5)$$

onde $\mathbf{H}(\mathbf{x})$ é a matriz Jacobiana, de ordem $(m \times n)$. Os elementos dessa matriz são obtidos derivando as funções $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ em relação ao vetor de estado \mathbf{x} : $\mathbf{H}(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$

Substituindo agora a equação (2.5) na equação (2.3), obtém-se

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \{[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0)] - \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x}\}^T \mathbf{R}^{-1} \{[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0)] - \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x}\} \quad (2.6)$$

Fazendo $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0)$ e substituindo em (2.6), resulta

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x}]^T \mathbf{R}^{-1} [\Delta \mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}_0) \Delta \mathbf{x}] \quad (2.7)$$

A equação (2.7) pode ser reescrita na forma

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\Delta \mathbf{z}^T \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z} - 2 \mathbf{B} \Delta \mathbf{x} + \Delta \mathbf{x}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}) \quad (2.8)$$

então, os termos \mathbf{A} e \mathbf{B} são dados por

$$\mathbf{A} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}_0)$$

$$\mathbf{B} = \Delta\mathbf{z}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}_0) = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\Delta\mathbf{z}$$

Como $J(\mathbf{x})$ expressa por (2.8) é quadrática, então, o valor de $\Delta\mathbf{x}$ ótimo é dado por

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = -\frac{1}{2}\mathbf{A}^{-1}(-2\mathbf{B}) = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} \Leftrightarrow \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{B}$$

ou seja,

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = [\mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}_0)]^{-1}[\mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\Delta\mathbf{z}] \quad (2.9)$$

ou ainda,

$$[\mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}_0)]\Delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\Delta\mathbf{z} \quad (2.10)$$

A equação (2.10) é conhecida como a equação normal de Gauss, que escrita de maneira compacta, assume a forma

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_0)\Delta\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}_0)\mathbf{R}^{-1}\Delta\mathbf{z} \quad (2.11)$$

onde $\mathbf{G} = \mathbf{H}^T\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}$, é uma matriz quadrada, de ordem $(n \times n)$, conhecida como matriz de ganho. Para que se possa resolver (2.11), é condição necessária que a essa matriz seja não-singular.

O vetor dos desvios, $\Delta\hat{\mathbf{x}}$, é obtido resolvendo a equação normal de Gauss. Considerando que $\hat{\mathbf{x}}$ dado por

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_0 + \Delta\hat{\mathbf{x}} \quad (2.12)$$

é uma melhor estimativa para \mathbf{x} do que \mathbf{x}_0 , desenvolve-se então um processo iterativo, a partir das equações (2.9) e (2.12), obtendo-se

$$\hat{\mathbf{x}}^{(t+1)} = \hat{\mathbf{x}}^{(t)} + [\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})]^{-1}\{\mathbf{H}^T(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})\mathbf{R}^{-1}[\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})]\} \quad (2.13)$$

cujos critérios de parada é

$$\max|\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(t)}| \leq \varepsilon \quad (2.14)$$

onde $\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(t)} = \hat{\mathbf{x}}^{(t+1)} - \hat{\mathbf{x}}^{(t)}$ é um elemento do vetor dos resíduos na iteração t (contador de iterações) e ε é uma tolerância pré-estabelecida.

Deve-se ressaltar que a equação (2.13) define formalmente o processo iterativo, embora não seja usada, necessariamente, para a implementação computacional do

algoritmo. Dependendo do modelo de medição adotado e, conseqüentemente do modelo de circuito, a inversão matricial indicada pode ser demasiadamente onerosa, do ponto de vista computacional. Nesse caso, o emprego das equações (2.11) e (2.12) se mostra mais recomendável, escolhendo um método numérico adequado para a solução de (2.11).

É importante lembrar que o processo iterativo deriva de uma linearização de funções não-lineares, $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. Se o modelo de medição dado por (2.1) possuir somente funções lineares, então, de acordo com (2.9), o vetor de estado estimado, $\hat{\mathbf{x}}$, pode ser calculado, de forma direta, por (2.15). Esta é a equação do estimador de estado linearizado, onde se observa que $\hat{\mathbf{x}}$ pode ser obtido por uma solução explícita da equação normal de Gauss, isto é,

$$\left[\mathbf{H}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{H}(\mathbf{x}) \right] \hat{\mathbf{x}} = \mathbf{H}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{z} \quad (2.15)$$

ou, formalmente

$$\hat{\mathbf{x}} = [\mathbf{G}(\mathbf{x})]^{-1} [\mathbf{H}^T(\mathbf{x})\mathbf{R}^{-1}\mathbf{z}] \quad (2.16)$$

2.3 Montagem do modelo de medição

O modelo de medição é construído a partir das equações de circuito do sistema elétrico supervisionado (aplicação das leis de Kirchhoff e Ohm). Monticelli (1999), no estudo de estimador de estado linearizado, introduziu alguns conceitos e procedimentos que facilitam a montagem desse modelo. Esta seção trata desses assuntos.

Considere que se deseja estimar, pelo método dos mínimos quadrados ponderados, a barra de um sistema de potência, cujo diagrama unifilar está mostrado na Fig.2.1. Nesse diagrama, P_T é o fluxo de de potência ativa medido na entrada da barra e P_1 e P_2 são fluxos de potências medidos na saída para os circuitos.

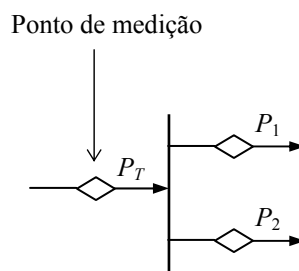


Figura 2.1 - Barra de um sistema de potência

De acordo com Monticelli (1999), a montagem do modelo de medição segue os seguintes passos:

a) Inicialmente, contrói-se o modelo de circuito, o qual é constituído pelas equações do circuito elétrico que se deseja observar. No caso da Fig. 2.1, por exemplo, a equação do balanço de potências ativas na barra (lei dos nós) é dada por

$$P_T = P_1 + P_2$$

b) Definem-se as variáveis de estado. São escolhidas nas equações do modelo de circuito. Uma vez calculadas, permitem a determinação das demais variáveis do circuito que se deseja observar. Na equação acima, P_1 e P_2 são escolhidas como variáveis de estado, então, o vetor de estado, \mathbf{x} , é

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

É importante observar que a quantidade de variáveis de estado deve ser igual ao número total de variáveis das equações do modelo de circuito menos o número de equações.

c) Identificam-se as variáveis dependentes. Desde que se definam as variáveis de estado, as demais passam a ser dependentes. São assim chamadas porque dependem das variáveis de estado para se tornarem conhecidas. Na equação acima foram escolhidas P_1 e P_2 como variáveis de estado. Então, naturalmente, P_T passa a ser variável dependente.

d) Monta-se o modelo de medição, que é formado pelas funções $\mathbf{h}(\mathbf{x})$. Estas relacionam as grandezas medidas com as variáveis de estado. Quando uma variável de estado é medida ou pseudomedida ela dá origem a uma função que relaciona o valor medido com ela própria. Se uma variável dependente também é medida ou pseudomedida, ela é expressa em termos das variáveis de estado, e também resulta em uma função. Portanto, para o exemplo dado têm-se as seguintes funções

$$P_1^{med} \rightarrow h_1 = P_1$$

$$P_2^{med} \rightarrow h_2 = P_2$$

$$P_T^{med} \rightarrow h_3 = P_1 + P_2$$

Vale salientar que o número de funções, requerido pelo modelo de medição, deve ser igual ao número total de variáveis medidas e/ou pseudomedidas. Ou seja, é igual ao número de elementos do conjunto de medição, formado pelas medidas e/ou pseudomedidas, que originam o vetor de medição, \mathbf{z} . No caso do exemplo, \mathbf{z} é dado por

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_T \end{bmatrix}$$

Derivando as funções $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ em relação às variáveis de estado, chega-se à matriz Jacobiana $\mathbf{H}(\mathbf{x})$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial P_1} & \frac{\partial h_1}{\partial P_2} \\ \frac{\partial h_2}{\partial P_1} & \frac{\partial h_2}{\partial P_2} \\ \frac{\partial h_3}{\partial P_1} & \frac{\partial h_3}{\partial P_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Considerando os erros das grandezas medidas ou pseudomedidas descorrelacionados, então, a matriz de covariância, \mathbf{R} , toma a forma diagonal

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{P_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{P_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{P_T}^2 \end{bmatrix}$$

onde:

$\sigma_{P_1}^2$: variância da medida do fluxo de potência P_1 ;

$\sigma_{P_2}^2$: variância da medida do fluxo de potência P_2 ;

$\sigma_{P_T}^2$: variância da medida do fluxo de potência P_T .

2.4 Dados gerais de entrada e saída de um estimador de estado

De um modo geral, os dados de entrada, necessários para realização da estimação de estado de um sistema de potência, são:

- Topologia de rede;
- Dados elétricos de linhas ou trechos (parâmetros elétricos);
- Definição de barras ou nós de carga;
- Conjunto das medidas *on-line*, em alguns casos, complementado com pseudomedidas;
- Erros de medições e/ou de pseudomedições (dados fixos).

Esses erros têm diversas fontes. As principais são:

- Acurácias de instrumentos de medição;
- Acurácias de transformadores para instrumentos, quando as medições são indiretas;
- Falha na digitação de dados fixos;
- Transmissão de dados;

- Topologia de rede (estado de chaveamento de disjuntores e/ou chaves, erroneamente informado);
- Propagação de incertezas sobre pseudomedidas.

Geralmente, a pseudomedida de uma grandeza é construída a partir de outras grandezas obtidas do sistema elétrico. Por exemplo, em sistemas de distribuição, é comum a construção de pseudomedidas de potências injetadas nos nós a partir de estudos de previsão de carga. Para ilustrar, considere um nó de um alimentador, no qual está instalado um transformador de distribuição de 45 kVA. Adotando-se um fator de utilização de 0,80 e um fator de potência de 0,92 (valores típicos), pode-se fazer uma previsão de demanda de 33,12 kW para o transformador. Se esse valor fizer parte do vetor de medição, \mathbf{z} , então, é tomado como uma pseudomedida. Outros tipos de pseudomedidas podem ser previstos para compor o conjunto de medição: amplitudes e ângulos de tensões nodais, fluxos de potência, amplitudes de corrente, dentre outros.

Geralmente, as quantidades pseudomedidas apresentam erros elevados, bem superiores aos erros normalmente encontrados nos valores medidos. É claro que os erros das pseudomedidas serão tanto maiores, quanto maiores forem os erros nos dados considerados para construí-las. Na maioria das vezes, as pseudomedidas são calculadas a partir de duas ou mais grandezas dotadas de erros, resultando, portanto, em propagação de incertezas que, obviamente, podem contribuir para agravar o problema.

Os principais dados esperados da estimação de estado de uma rede elétrica são as estimativas de suas variáveis de estado (geralmente ângulos e amplitudes de tensões nodais). No estudo de fluxo de carga também se determinam as variáveis de estado do sistema, entretanto, existem diferenças fundamentais entre um estimador de estado e um fluxo de carga, apesar das equações serem as mesmas.

De acordo com Monticelli (1983), a diferença fundamental entre os dois problemas está no fato de que o estimador de estado manipula dados redundantes e sujeitos a erros, muitas vezes grosseiros (dados ruins). Os dados redundantes levam a um sistema com mais equações do que incógnitas. Portanto, outra diferença entre fluxo de carga e estimador de estado clássico, é que o primeiro trabalha com um sistema determinado (número de equações igual ao número de incógnitas), já no caso do segundo, o sistema de equações é sobredeterminado. O estimador de estado além de calcular os estados da rede observável, por um processo de filtragem, é capaz de processar medidas com erros grosseiros, detectando suas presenças, identificando-as e eliminando seus efeitos no processo de estimação. Além disso, outra característica importante do estimador é que ele pode fornecer o estado de barras não-supervisionadas. Essas últimas características somente são possíveis, se houver informação de medidas redundantes em número suficiente e em locais apropriados na parte do sistema sob supervisão.

2.5 Observabilidade de sistemas elétricos, medidas redundantes e medidas críticas

Os conceitos de observabilidade de um sistema de potência e de medidas críticas estão diretamente relacionados com as medidas que formam o conjunto de medição. No que diz respeito ao problema de estimação de estado, é importante identificar a(s)

medida(s) crítica(s) dentro desse conjunto, pois ao perdê-la(s) o sistema passa a ser não-observável. Portanto, é mais seguro trabalhar com medidas redundantes, se possível.

2.5.1 Observabilidade

Sob o ponto de vista de estimação de estado, diz-se que um sistema elétrico é observável quando as variáveis de estado do sistema podem ser determinadas por um estimador de estado através do processamento das medidas que formam o conjunto de medição. Em caso contrário, a rede é considerada não-observável com respeito ao conjunto de medição (SIMÕES COSTA; SALGADO, 2002).

O algoritmo da estimação de estado clássica ou tradicional (modelo de Schweppe) é formulado como um problema de otimização, constituído por um sistema de equações sobredeterminado, que é resolvido pelo método dos mínimos quadrados ponderados, conforme se relatou anteriormente. A condição de solução desse algoritmo é determinada pela análise de observabilidade. Isto é, dado um sistema elétrico e um conjunto de medidas, essa análise determina se o problema de estimação de estado é solucionável ou não. É feita com base no posto da matriz Jacobiana, \mathbf{H} , que deve ter posto cheio. Em outras palavras, considera-se que um sistema de potência é algebricamente observável, com respeito a um conjunto de m medidas, se a matriz Jacobiana tem seu posto igual a n , onde n é dimensão do vetor de estado \mathbf{x} . Nesse caso, a matriz de ganho, \mathbf{G} , é não-singular e a equação normal de Gauss, dada na forma (2.10) ou (2.15), pode ser resolvida, resultando no vetor de estado estimado $\hat{\mathbf{x}}$.

Neste trabalho não haverá preocupação com observabilidade do sistema elétrico que se deseja supervisionar, porque no conjunto de medição serão inseridas tantas pseudomedidas, quantas forem necessárias. Resta ter cuidado com a solução da equação normal de Gauss, pois, pode apresentar problemas numéricos durante a solução iterativa, impedindo a sua convergência devido ao mal condicionamento de \mathbf{G} , ou quando os valores iniciais atribuídos aos estados estão muito distantes dos valores reais. Isso também pode acontecer quando há diferenças elevadas entre os pesos associados às incertezas das grandezas medidas que compõem o conjunto de medição (GHOSH et al., 1997).

2.5.2 Medidas redundantes

De acordo com o modelo de medição, um sistema elétrico totalmente observável, que dispõe de m grandezas medidas e n variáveis de estado ($m > n$), origina um sistema de equações sobredeterminado, com m equações e n incógnitas. Se ao conjunto dessas m medidas for acrescentada uma quantidade p de medidas, estas p medidas serão definidas como medidas redundantes, pois não aumentarão a observabilidade algébrica do sistema.

Comumente, o grau de redundância global (g_{rd}) das medidas, obtidas no sistema supervisionado, é definido pela razão entre m e n ($g_{rd} = \frac{m}{n}$). Uma condição necessária para que o problema de estimação de estado tenha solução é que $m \geq n$, ou $g_{rd} \geq 1$. Em estudos de fluxo de carga $g_{rd} = 1$, pois, $m = n$.

As medidas redundantes proporcionam uma maior segurança para a observabilidade do sistema supervisionado, pois, mesmo com a perda de uma medida qualquer, o sistema continuará observável, possibilitando a estimação de seus estados (LONDON; BRETAS, 1998). A redundância de grandezas medidas em um conjunto de medição é um pré-requisito para o sucesso de qualquer esquema de validação de dados. Para que um estimador de estado seja robusto, tanto no caso de perdas de medidas, quanto no processamento de medidas com erros grosseiros, é necessário que o nível de redundância das medidas seja elevado (LONDON Jr.; ALBERTO; BRETAS, 2001). Portanto, sistemas de telemedição altamente redundantes seriam ideais. Entretanto, considerando que os custos envolvidos na realização de medições *on-line* são elevados, freqüentemente as redes elétricas não são supervisionadas com um nível de redundância desejável. Particularmente, esse é o caso de circuitos de distribuição.

2.5.3 Medidas e conjuntos críticos

Conforme ressaltado anteriormente, o conceito de medidas críticas, para estimação de estado em sistemas de potência, está diretamente relacionado ao princípio de observabilidade das redes elétricas. A ocorrência de medidas e conjuntos críticos revela falta de redundância, caracterizando uma condição limite para a observabilidade e para a depuração de dados. A exploração da redundância entre as quantidades medidas permite detectar e identificar a presença de erros grosseiros.

Couto Filho et al. (1998) apresentam as seguintes definições para medidas críticas e conjunto crítico:

- Medidas críticas: São medidas de um conjunto de medição que ao serem perdidas tornam o sistema não-observável.
- Conjunto crítico: É um conjunto formado por medidas não-críticas, no qual a eliminação de qualquer medida a ele pertencente torna as demais críticas.

Geralmente, a identificação de medidas com erros grosseiros é feita através do cálculo dos resíduos ponderados e/ou normalizados das grandezas medidas ($z_i - \hat{z}_i$). O emprego dessas técnicas torna-se impossível quando não há medidas redundantes no conjunto de medição (MONTICELLI, 1999), como acontece comumente em estimação de estado de sistemas de distribuição. Portanto, os algoritmos dos estimadores de estado apresentados neste trabalho não têm capacidade detectar e identificar essas medidas.

2.6 Determinação de variâncias de grandezas medidas e pseudomedidas

Conforme já se mencionou, a estimação de estado pelo método dos mínimos quadrados ponderados requer cálculo de variâncias dos erros das grandezas medidas e/ou pseudomedidas do conjunto de medição, para construção da matriz de covariância, \mathbf{R} . Um método de cálculo de variâncias, que leva em conta a propagação de incertezas, é apresentada a seguir.

2.6.1 Variâncias de grandezas medidas

Dentre os diversos tipos de erros sistemáticos, há o erro sistemático instrumental, que resulta da calibração do instrumento de medição (VUOLO, 1992). Esse erro é indicado pelo fabricante no painel do próprio instrumento e/ou no manual de utilização. Normalmente, o fabricante define um limite de erro para a escala do instrumento, o qual é conhecido como classe de exatidão ou acurácia. Obviamente, quando o instrumento tem uma única escala, a acurácia da escala é a do próprio instrumento.

Segundo Vuolo (1992), não existe nenhum método padrão bem estabelecido para determinação da variância sistemática, σ_r^2 , correspondente aos erros sistemáticos. A partir de alguma hipótese sobre distribuição de erros, pode-se estimar um limite de erro sistemático (L_r). No caso de se tomar uma distribuição Gaussiana para os erros e considerar um limite de erro com nível de confiança de 95%, é prática corrente fazer L_r igual a duas vezes o valor do desvio padrão sistemático (σ_r), ou seja,

$$L_r \cong 2\sigma_r \quad (2.17)$$

Na prática, freqüentemente, essa relação é usada como regra geral. Portanto, será adotada para calcular variâncias dos erros sistemáticos dos instrumentos de medição usados neste trabalho.

De acordo com (2.17), pode-se escrever

$$\sigma_r \cong \frac{L_r}{2} \quad (2.18)$$

É comum o limite de erro sistemático ser determinado em função da acurácia da escala do instrumento e do valor médio das medidas realizadas, ou seja,

$$L_r = \frac{acr}{100} \times \bar{V} \Rightarrow \sigma_r = \frac{acr}{2 \times 100} \times \bar{V}$$

onde:

acr : acurácia da escala do instrumento de medição, em porcentagem;

\bar{V} : valor médio das medidas, assim definido

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$$

onde n é o número de medidas e V_i uma medida genérica.

Uma aproximação usada aqui consiste em considerar o valor médio igual ao valor medido ($\bar{V} = Valor_{med}$), então, resulta

$$L_r \cong \frac{acr}{100} \times Valor_{med} \Rightarrow \sigma_r = \frac{acr}{200} \times Valor_{med}$$

Uma vez que se conhece σ_r , pode-se determinar a variância

$$\sigma_r^2 \cong \left(\frac{acr}{200} \right)^2 \times (Valor_{med})^2$$

Quando duas grandezas são medidas em uma mesma escala ou através de instrumentos diferentes, mas ajustados em escalas que têm a mesma classe de exatidão, tais que se obtenha $Valor_{med1}$ e $Valor_{med2}$, pode-se tirar uma relação entre as variâncias associadas a essas medidas, isto é,

$$\sigma_{r1}^2 = \left(\frac{acr}{200} \right)^2 \times (Valor_{med1})^2$$

$$\sigma_{r2}^2 = \left(\frac{acr}{200} \right)^2 \times (Valor_{med2})^2$$

onde σ_{r1}^2 e σ_{r2}^2 são as variâncias de $Valor_{med1}$ e $Valor_{med2}$, respectivamente.

Dividindo σ_{r1}^2 por σ_{r2}^2 , resulta em

$$\sigma_{r2}^2 = \frac{\sigma_{r1}^2}{(Valor_{med1})^2} \times (Valor_{med2})^2 \quad (2.19)$$

2.6.2 Variâncias de grandezas pseudomedidas

Comumente, pseudomedidas de grandezas elétricas são determinadas a partir de grandezas medidas, estimadas ou calculadas. Admitindo que essas grandezas têm erros, há, portanto, uma propagação de incertezas sobre os valores pseudomedidos que precisa ser determinada. De acordo com Vuolo (1992), a propagação de incertezas sobre grandezas dependentes de outras, na forma $w=f(x,y,z)$, é, em uma primeira aproximação, dada por

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \sigma_z^2 \quad (2.20)$$

desde que os erros de x , y e z sejam considerados completamente independentes. Em (2.20), σ_w^2 é a variância da grandeza genérica w e $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ são as variâncias de x , y e z , respectivamente.

Aplicando (2.20) para calcular a variância de uma grandeza que resulta do produto de outras, tal como $w = x y z$, obtém-se

$$\sigma_w^2 = (yz)^2 \sigma_x^2 + (xz)^2 \sigma_y^2 + (xy)^2 \sigma_z^2$$

No caso de grandeza que depende da soma e/ou diferença de outras, tal como $w = \pm x \pm y \pm z$, a sua variância é dada pela soma das variâncias de x , y e z , isto é,

$$\sigma_w^2 = \sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2$$

Considerando dois valores de uma grandeza w , que são determinados através de funções lineares: $w_1 = ax$ e $w_2 = bx$, e admitindo que a e b são constantes isentas de erros ou com erros desprezíveis, somente a variável x é considerada para cálculo das incertezas. Então, aplicando (2.20) em w_1 e w_2 , resulta

$$\sigma_{w_1}^2 = a^2 \times \sigma_x^2 = \frac{w_1^2}{x^2} \times \sigma_x^2$$

$$\sigma_{w_2}^2 = b^2 \times \sigma_x^2 = \frac{w_2^2}{x^2} \times \sigma_x^2.$$

Assim como tirou-se uma relação entre as variâncias associadas com duas grandezas medidas, na forma (2.19), de modo similar pode-se relacionar $\sigma_{w_2}^2$ com $\sigma_{w_1}^2$, w_1 e w_2 , resultando em

$$\sigma_{w_2}^2 = \frac{\sigma_{w_1}^2}{w_1^2} \times w_2^2 \quad (2.21)$$

É importante observar que as variâncias, usadas nos modelos de medição dos estimadores de estado desenvolvidos neste trabalho, são calculadas com base nos conceitos apresentados nesta seção.

Capítulo 3

Um Novo Método para Ajuste de Carga de Alimentador Radial

3.1 Introdução

Tradicionalmente, fatores de utilização e de potência são estabelecidos para calcular as potências injetadas em nós de sistemas de potência, com a finalidade de se estudar de fluxo de carga. Este capítulo trata de um método mais refinado de ajuste de carga, exclusivo para alimentadores radiais, que emprega fatores de utilização que variam em tempo real, isto é, são determinados a partir de correntes e tensões medidas em tempo real, em diferentes pontos do alimentador.

3.2 Uma nova forma de calcular fator de utilização

A proposta consiste em calcular um fator de utilização para cada ponto do alimentador que dispõe de medição em tempo real (ALMEIDA; MEDEIROS JR.; SILVEIRA, 2003). Para isso emprega-se a seguinte expressão

$$fu_i = \frac{\sqrt{3} \times V_{med\ i} \times I_{med\ i}}{\frac{1}{f_{div,T}} \times \sum_{j=1}^{nt} S_{Tj} + \frac{1}{f_{div,GA}} \times \sum_{k=1}^{ng} \frac{Dm_k}{fpm_k}} \quad (3.1)$$

onde:

fu_i : fator de utilização determinado para cada ponto de medição, onde $i = 1, \dots, n_{pm}$, sendo n_{pm} o número de pontos de medição;

$f_{div,T}$: fator de diversidade aplicado às potências nominais dos transformadores de distribuição;

$f_{div,GA}$: fator de diversidade aplicado às demandas máximas dos consumidores do grupo A ;

$V_{med\ i}$: tensão de linha medida em tempo real nos pontos de medição;

$I_{med\ i}$: corrente medida em tempo real nos pontos de medição;

S_{Tj} : potência nominal de um transformador de distribuição, onde $j = 1, \dots, nt$ (nt é o número de transformadores de distribuição ligados à jusante do ponto de medição);

Dm_k e fpm_k : demanda máxima e fator de potência indutivo, respectivamente, obtidos da conta de energia mensal de um consumidor do grupo A , onde $k = 1, \dots, ng$ (ng é o número de consumidores do grupo A ligados à jusante do ponto de medição).

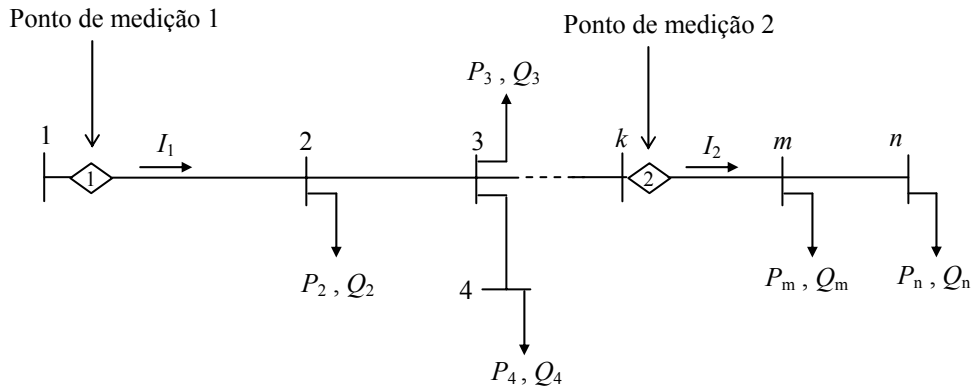


Figura 3.1 – Diagrama unifilar de um alimentador radial reduzido

Tomando como exemplo o alimentador reduzido, ilustrado na Fig. 3.1, que contém dois pontos de medição, então, calculam-se dois fatores de utilização, fu_1 e fu_2 , os quais são usados para ajustar as cargas à jusante desses pontos.

A expressão (3.1) é determinada a partir da definição clássica de fator de utilização. Os valores calculados dependem das amplitudes de tensão e corrente, medidas em tempo real, e de fatores de diversidade, pré-estabelecidos para os transformadores de distribuição e para os consumidores do grupo A .

Considerando que $\frac{1}{f_{div}}$ é definido como fator de contribuição, então, os termos

$$\frac{1}{f_{div,T}} \times \sum_{j=1}^{nt} S_{Tj} \quad \text{e} \quad \frac{1}{f_{div,GA}} \times \sum_{k=1}^{ng} \frac{Dm_k}{fpm_k},$$

representam, respectivamente, as parcelas de contribuição (em potência aparente) dos transformadores de distribuição e dos consumidores do grupo A , ligados à jusante do ponto de medição, para o fluxo de potência aparente que sai de cada ponto de medição.

3.3 Algoritmo de ajuste

Cada fator de utilização é aplicado às cargas à jusante do ponto de medição correspondente. Por exemplo, os fatores de utilização fu_1 e fu_2 , calculados nos pontos de medição 1 e 2 (Fig. 3.1), são aplicados às cargas dos nós vinculados a esses pontos de medição. Isto é, o fator de utilização fu_1 é usado no ajuste das cargas localizadas entre os pontos de medição 1 e 2, aqui definidas como cargas vinculadas ao ponto 1. Já o fator de utilização fu_2 é empregado para ajustar as cargas vinculadas ao ponto de medição 2, que, no caso, são todas as cargas à jusante do ponto 2. Empregam-se os mesmos procedimentos quando houver mais pontos de medição.

Tudo que foi dito acima pode ser resumido nos seguintes passos:

1. Definir os fatores de diversidade para transformadores de distribuição e consumidores do *grupo A*;
2. Obter as tensões e correntes medidas em tempo real nos pontos de medição;
3. Identificar as cargas à jusante de cada ponto de medição e determinar o fator de utilização correspondente através de (3.1);
4. Calcular as potências das cargas vinculadas a cada ponto de medição, aplicando os respectivos fatores de utilização.

Com base nesses passos, desenvolveu-se programa computacional cujo fluxograma está resumido na figura abaixo.

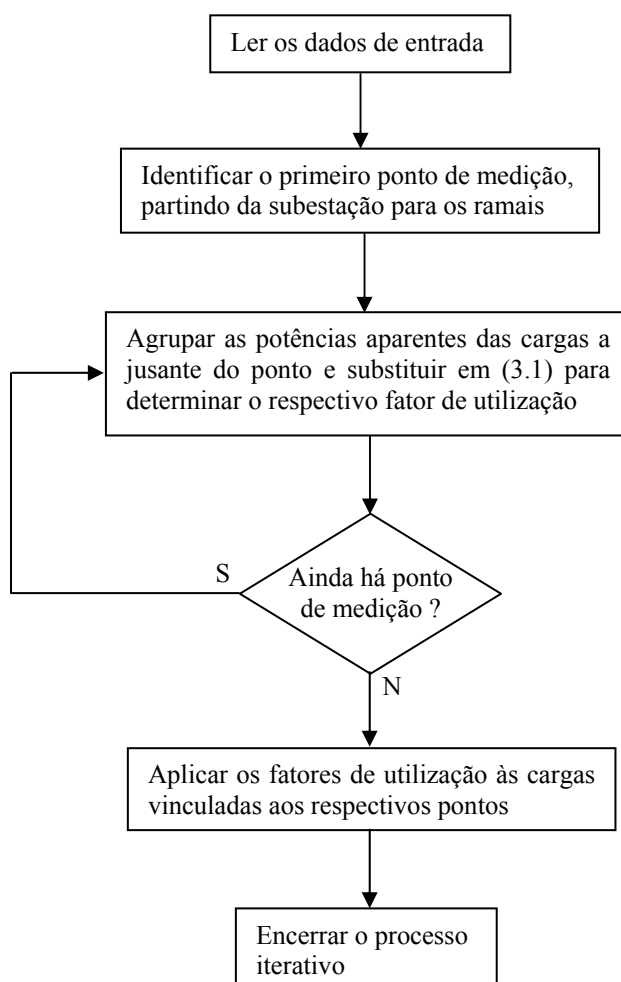


Figura 3.2 – Fluxograma do algoritmo de ajuste de carga

A entrada de dados do programa é constituída por:

- a) Dados fixos: topologia da rede, cargas nos nós e fatores de diversidade de transformadores de distribuição e consumidores do grupo A.
- b) Dados medidos em tempo real: tensões e correntes nos pontos de medição.

3.3.1 Aplicação do método

As tabelas a seguir mostram fatores de utilização, calculados pelo método, para o alimentador NTU01J1 (COSERN), que é composto por 104 nós.

Tabela 3.1 – Fatores de utilização calculados para o alimentador NTU01J1, operando com carga máxima

Grandezas	Pontos de medição		
	1	2	3
Tensão medida (kV)	14,1*	13,5	13,3
Corrente medida (A)	172,0*	140,0	40,0
Fatores de utilização	0,84	0,98	0,83

Tabela 3.2 – Fatores de utilização calculados para o alimentador NTU01J1, operando com carga mínima

Grandezas	Pontos de medição		
	1	2	3
Tensão medida (kV)	14,2*	13,6	13,4
Corrente medida (A)	95,0*	70,0	22,0
Fatores de utilização	0,47	0,49	0,45

(*): Tensão e corrente medidas em tempo real

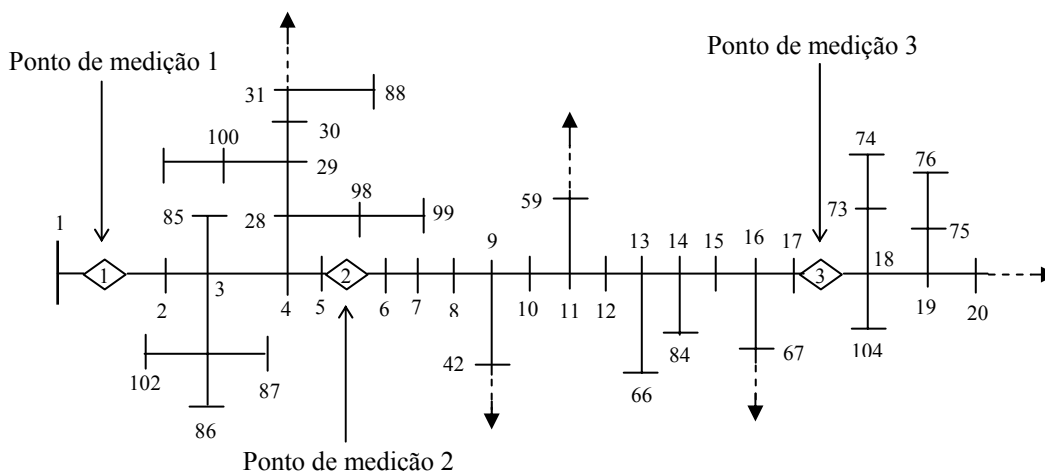


Figura 3.2 – Diagrama unifilar reduzido do alimentador NTU01J1

A Fig. 3.2 mostra o diagrama unifilar reduzido desse alimentador (o diagrama completo pode ser visto no Apêndice B). Os dados dos nós e dos trechos são encontrados no Apêndice A. Os fatores de utilização foram calculados considerando-se duas condições de operação do alimentador: cargas máxima e mínima. Em ambas condições foram adotados valores típicos de fatores de diversidade para os transformadores de distribuição e para os consumidores do grupo A, $f_{div,T}=1,0$ e $f_{div,GA}=1,2$, respectivamente.

De acordo com o algoritmo, as cargas dos nós localizados entre os pontos de medição 1 e 2 são ajustadas por f_{u1} . As cargas dos nós situados entre os pontos de medição 2 e 3 são ajustadas por f_{u2} . Já as demais cargas, à jusante do ponto de medição 3, são ajustadas por f_{u3} . Cabe salientar que esse método se aplica exclusivamente para sistemas radiais.

Nos procedimentos usuais de análise de redes de distribuição, geralmente, se estabelece um fator de utilização para transformadores de distribuição e outro para consumidores primários (grupo A). Em alguns casos, procura-se agrupar os transformadores por classe de consumidores (comercial, residencial, rural e misto) e, a partir daí, define-se um fator de utilização para cada classe. Os valores adotados são fixos, independentemente, da hora do dia (não variam com a curva de carga diária). No estudo de fluxo de carga, que comumente é feito para a condição de carga máxima, empregam-se valores elevados (entre 0,8 e 1,0).

Neste trabalho, a estimação de estado de alimentador é feita em tempo real, com base em medidas e, principalmente, em pseudomedidas de potências injetadas nos nós. O emprego de fatores de utilização fixos, como no caso do estudo de fluxo de carga, não é indicado, pois, irão causar problemas de incompatibilidade entre os valores pseudomedidos e os medidos em tempo real (amplitudes de corrente e de fluxos de potência).

O método proposto resolve esse problema, pois, propicia um ajuste de carga mais próxima da realidade, uma vez que os fatores de utilização são calculados de acordo com a variação de tensões e correntes medidas em tempo real (acompanham a curva de carga do alimentador supervisionado). No final do Cap. 4, apresentam-se resultados de estimação de estado de alimentadores reais, que demonstram a importância do método.

Capítulo 4

Estimación de Estado de Alimentadores de Distribuição Através do Método de Schweppe

4.1. Introdução

Este capítulo trata da estimación de estado de alimentador radial através do método de Schweppe. O modelo emprega medição em tempo real de amplitudes de correntes de ramo e/ou de fluxos de potência, em alguns pontos do alimentador, e, principalmente, pseudomedições de injeções de potências nos nós. As mesmas equações usadas no estudo de fluxo de carga são também empregadas na construção do modelo, onde as tensões e os ângulos nodais são tomados como variáveis de estado. Apresenta também o desenvolvimento de um programa computacional, desenvolvido para o algoritmo, e os resultados de um caso-teste real (alimentador da COSERN).

4.2. Construção do modelo

O modelo apresentado a seguir adota como exemplo o diagrama unifilar de um alimentador genérico, mostrado na figura abaixo. Nesse diagrama pode-se observar dois pontos de medição *on-line*: um na saída para o alimentador (ponto 1) e outro no local de instalação de uma chave telecomandada (ponto 2), que possui módulo de telemedição.

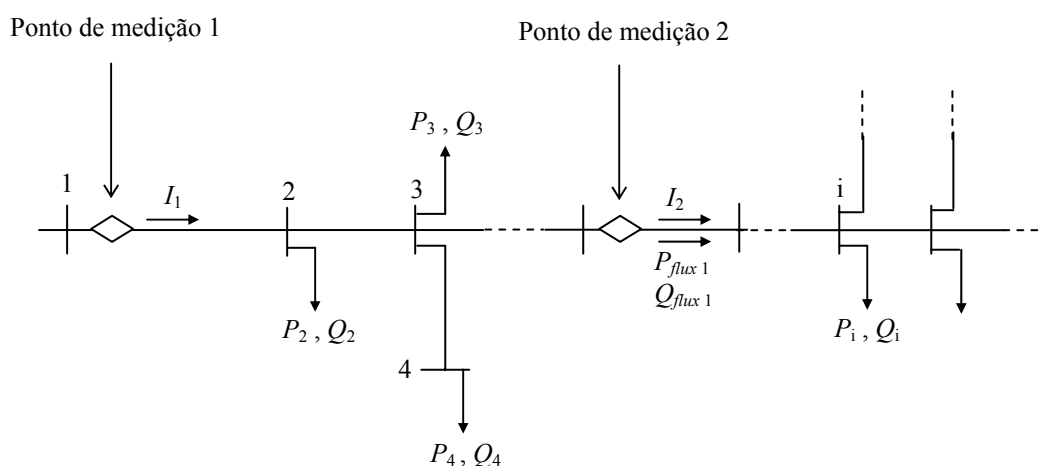


Figura 4.1 – Diagrama unifilar de um alimentador radial

Na Fig. 4.1, I_1 e I_2 são amplitudes de corrente de ramo medidas nos pontos de medição 1 e 2, P_{flux1} e Q_{flux1} são fluxos de potência medidos em 2; P_i e Q_i são pseudomedidas de potências ativa e reativa injetadas em um nó genérico i . Os nós do alimentador são classificados em três tipos: nós de transformador de distribuição (nós de distribuição), nós de consumidores do *grupo A* (nós do *grupo A*) e nós de passagem ou derivação.

Consideram-se nós de derivação ou passagem os pontos de derivação de ramais, ou de instalação de chaves ou religadores, que dispõem de módulos de telemedição. Nesses nós não há cargas instaladas, ou seja, as injeções de potências são nulas. Essas informações podem ser exploradas na estimação de estado. No presente trabalho, são tomadas como pseudomedidas que assumem valor o zero ($P=0$ e $Q=0$) e desvio padrão baixíssimo, da ordem de 10^{-4} , resultando, portanto, em pesos elevados.

As pseudomedidas de injeções de potências nos nós de distribuição são calculadas a partir das potências nominais (S) dos transformadores de distribuição, e de fatores potência (fp) e de utilização (fu), ou seja,

$$P = S \times fp \times fu \quad (4.1)$$

$$Q = S \times sfp \times fu \quad (4.2)$$

onde, $sfp = (1 - fp^2)^{1/2}$ (seno do ângulo de fator de potência).

Os fatores de potência adotados para os transformadores de distribuição se baseiam em critérios de operação do sistema ou dados históricos de carga. Esses critérios podem levar em conta a classificação do transformador no que tange ao tipo de carga predominante que alimenta: comercial, residencial, rural ou mista.

No caso de nó do *grupo A*, as pseudomedidas de injeções de potências são determinadas com base em demandas máximas registradas (D_m) e em fatores de potência medidos (fp_m), colhidos nas contas mensais de energia elétrica, isto é,

$$P_{GA} = fu \times D_m \quad (4.3)$$

$$Q_{GA} = fu \times Q_m \quad (4.4)$$

onde, $Q_m = D_m \times \tan[\cos^{-1}(fp_m)]$.

É importante ressaltar que os fatores de utilização, empregados na construção dessas pseudomedidas, tanto nos nós de distribuição, quanto nos nós do *grupo A*, são calculados com base no método apresentado no Cap. 3.

O conjunto de medição (vetor \mathbf{z}) é formado pelas medidas da(s) amplitude(s) de corrente(s) de ramo, e/ou dos fluxos de potência, em conjunto com as pseudomedidas das injeções de potências nos nós. Então, tomando como exemplo o alimentador mostrado na Fig. 4.1, tem-se

$$\mathbf{z} = [P_2^{pmed} \dots P_{nj}^{pmed} \quad Q_2^{pmed} \dots Q_{nj}^{pmed} \quad I_1^{med} \dots I_p^{med} \quad P_{flux\ 1}^{med} \dots P_{flux\ q}^{med} \quad Q_{flux\ 1}^{med} \dots Q_{flux\ q}^{med}]^T$$

onde n_j é o número de nós à jusante do nó 2, p é o número de pontos de medição de corrente em tempo real e q é o número de pontos de medição de fluxos de potência.

Os sobrescritos *med* e *pmed*, que aparecem nos elementos de \mathbf{z} , identificam grandezas medidas ou pseudomedidas. Já os subscritos *flux* identificam os fluxos de potências medidos.

O modelo de medição considera que os erros das medidas e pseudomedidas são independentes, e assumem uma distribuição Gaussiana. Então, a matriz de covariância, \mathbf{R} , é uma matriz diagonal, de ordem $m \times m$, onde m é o número de elementos do vetor de medição \mathbf{z} . Portanto, os elementos da diagonal são as variâncias dos erros das grandezas que formam o conjunto de medição, isto é,

$$\mathbf{R} = diag\{ \sigma_{P_2^{pmed}}^2 \dots \sigma_{P_{nj}^{pmed}}^2 \quad \sigma_{Q_2^{pmed}}^2 \dots \sigma_{Q_{nj}^{pmed}}^2 \quad \sigma_{I_1^{med}}^2 \dots \sigma_{I_p^{med}}^2 \quad \sigma_{P_{flux\ 1}^{med}}^2 \dots \sigma_{P_{flux\ q}^{med}}^2 \quad \sigma_{Q_{flux\ 1}^{med}}^2 \dots \sigma_{Q_{flux\ q}^{med}}^2 \}$$

É importante ressaltar que essas variâncias são calculadas a partir das definições dadas na Seção 2.6. Por exemplo, as variâncias das pseudomedidas de injeções de potência em nó de distribuição são calculadas aplicando-se (2.20) em (4.1) e (4.2), resultando em

$$\sigma_P^2 = S^2 \times (fu^2 \times \sigma_{fp}^2 + fp^2 \times \sigma_{fu}^2) \quad (4.5)$$

$$\sigma_Q^2 = S^2 \times \left[fu^2 \times \frac{fp^2}{1 - fp^2} \times \sigma_{fp}^2 + (1 - fp^2) \times \sigma_{fu}^2 \right], \quad \text{para } 0 \leq fp < 1 \quad (4.6)$$

onde:

σ_P^2 e σ_Q^2 : variâncias de P e Q ;

σ_{fu}^2 e σ_{fp}^2 : variâncias de fu e fp , as quais são calculadas a partir dos desvios estabelecidos para fu (dfu) e para fp (dfp).

De maneira semelhante, as variâncias das pseudomedidas de injeções de potência em nó do grupo A , são calculadas aplicando-se (2.20) em (4.3) e (4.4), ou seja,

$$\sigma_{P_{GA}}^2 = fu^2 \times \sigma_{D_m}^2 + D_m^2 \times \sigma_{fu}^2 \quad (4.7)$$

$$\sigma_{Q_{GA}}^2 = fu^2 \times \sigma_{Q_m}^2 + Q_m^2 \times \sigma_{fu}^2 \quad (4.8)$$

em que:

$\sigma_{P_{GA}}^2$ e $\sigma_{Q_{GA}}^2$: variância de P_{GA} e de Q_{GA} ;

$\sigma_{D_m}^2$: variância de D_m ;

$\sigma_{Q_m}^2$: variância de Q_m .

Considerando as tensões e ângulos nodais como sendo as variáveis de estado (vetor de estado, \mathbf{x}), resulta

$$\mathbf{x} = [\theta_1 \cdots \theta_n \quad V_1 \cdots V_n]^T$$

onde n varia de 2 até o número de nós.

As funções do modelo de medição $h_i(\mathbf{x})$, correspondentes às pseudomedidas de potências injetadas nos nós, são montadas a partir das equações de injeção de potências,

$$P_k = V_k^2 G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_k V_m [G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)]$$

então, para um nó genérico, k , têm-se as funções

$$P_k^{pmed} \rightarrow h_{P_k} = V_k^2 G_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

$$Q_k^{pmed} \rightarrow h_{Q_k} = -V_k^2 B_{kk} + \sum_{m \in \Omega_k} V_k V_m [G_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)]$$

onde Ω_k é conjunto de nós ligados diretamente ao nó k ; V_k e V_m são as amplitudes das tensões nos nós inicial e final, respectivamente, do trecho km ; θ_k e θ_m são os ângulos das tensões V_k e V_m ; G_{km} e B_{km} são elementos da matriz de admitância nodal

Trabalhando com o circuito equivalente, π , de uma linha de transmissão e desprezando a susceptância *shunt*, b_{km}^{sh} , determinam-se os fluxos de potência P_{km} e Q_{km} ,

$$P_{km} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

$$Q_{km} = -b_{km} V_k^2 - V_k V_m [-b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + g_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

onde g_{km} e b_{km} são a condutância e a susceptância série, respectivamente, do trecho genérico km .

Com base nessas equações constroem-se as funções $h_i(\mathbf{x})$, correspondentes às medidas de amplitudes de correntes de ramo, ou seja,

$$I_u^{med} \rightarrow h_{I_u} = \frac{\sqrt{P_{km}^2 + Q_{km}^2}}{V_k}$$

e de fluxos de potência

$$P_{flux\ v}^{med} \rightarrow h_{P_{flux\ v}} = g_{km} V_k^2 - V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + b_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

$$Q_{flux\ v}^{med} \rightarrow h_{Q_{flux\ v}} = -b_{km} V_k^2 + V_k V_m [b_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) - g_{km} \text{sen}(\theta_k - \theta_m)]$$

onde $u = 1, \dots, p$ e $v = 1, \dots, q$.

As funções $h_{P_k}(\mathbf{x})$, $h_{Q_k}(\mathbf{x})$, $h_{I_u}(\mathbf{x})$, $h_{P_{flux\ v}}(\mathbf{x})$ e $h_{Q_{flux\ v}}(\mathbf{x})$ formam um sistema de equações não-lineares, que é resolvido pela equação normal de Gauss, na forma (2.10). Nesse caso, a matriz Jacobina, \mathbf{H} , é originada pelas derivadas dessas funções em relação às variáveis de estado.

De acordo com a equação (2.13), é necessário determinar $\Delta \mathbf{z}$ a cada iteração. Para primeira iteração tem-se

$$\Delta \mathbf{z}_0 = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}_0)$$

onde \mathbf{x}_0 é o vetor de estado inicial, estabelecido para inicializar o processo. Da segunda iteração em diante, $\Delta \mathbf{z}$ é calculado com base no vetor de estado estimado,

$$\Delta \mathbf{z}^{(t)} = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})]$$

onde t é o contador de iterações.

4.3 Algoritmo

O algoritmo do modelo desenvolvido para o esse estimador pode ser resumido no fluxograma mostrado Fig. 4.2.

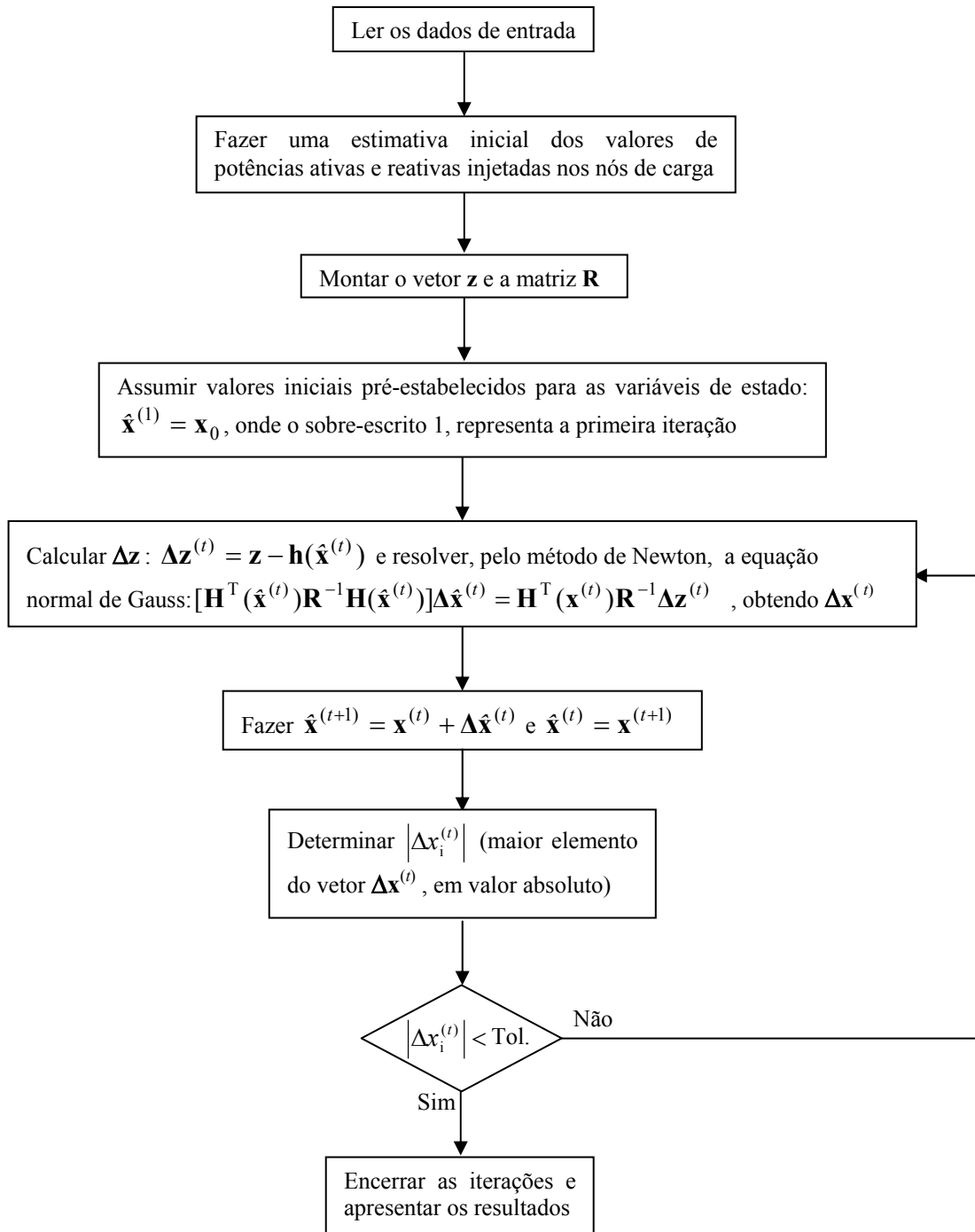


Figura 4.2 – Fluxograma do estimador de estado de Schweppe

Os dados de entrada são formados por dois conjuntos:

- Dados fixos: Topologia e parâmetros do alimentador supervisionado; potências nominais dos transformadores de distribuição; fator de potência predefinido para esses transformadores; demandas máximas e fatores de potência, obtidos de contas mensais de energia elétrica de consumidores do grupo A; desvios adotados para fatores de potência e de utilização; classes de exatidão dos instrumentos de medição
- Dados medidos em tempo real: correntes e fluxos de potência nos pontos de medição.

Os principais dados de saída são as variáveis de estado (vetor de estado estimado \hat{x}). De posse dessas variáveis, calculam-se as grandezas da rede que interessam, e também o vetor das grandezas medidas e pseudomedidas, que fazem parte do conjunto de medição (vetor \hat{z} das grandezas medidas e pseudomedidas, que são estimadas).

4.3.1 Aplicação e análise de desempenho

O programa computacional que implementa o algoritmo foi testado em diversos alimentadores reais. Dentre esses, está o alimentador NEO01N4 (COSERN), composto por 66 nós, cujo diagrama unifilar reduzido está mostrado abaixo. Como se observa, o alimentador possui dois pontos de medição *on-line*: um na saída para o alimentador e o outro no nó 19. O diagrama unifilar completo do alimentador e os dados fixos de entrada do programa, são encontrados nos apêndices A e B.

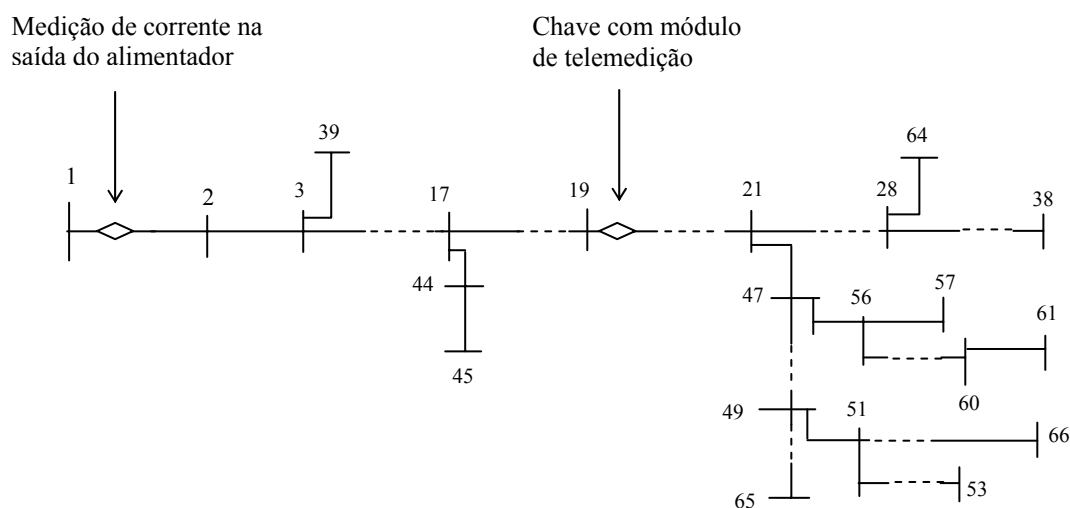


Figura 4.3 – Diagrama unifilar reduzido do alimentador NEO01N4

O programa foi executado para três janelas de medição, cujos dados, colhidos do arquivo de dados do sistema supervisorio (SAGE), da COSERN, são dados abaixo. No SAGE, as grandezas medidas *on-line* são disponibilizadas a cada intervalo de tempo de 5 minutos (Janela de Medição).

- a) Janela de Medição I (carregamento máximo: 18:30h)
- Corrente na saída para o alimentador: 162 A
 - Tensão no barramento da subestação: 14 kV
 - Fluxos de potência na chave: 2370 kW e 858 kvar
 - Corrente na chave telecomandada: 106 A
 - Tensão na chave telecomandada: 13,7 kV
- b) Janela de Medição II (carregamento mínimo: 5:45h)
- Corrente na saída para o alimentador: 94 A
 - Tensão no barramento da subestação: 14,1 kV
 - Fluxos de potência na chave: 1418 kW e 638 kvar
 - Corrente na chave telecomandada: 67 A
 - Tensão na chave telecomandada: 13,4 kV
- c) Janela de Medição III (carregamento intermediário: 12:30h)
- Correntes na saída para o alimentador: 115 A
 - Tensão no barramento da subestação: 13,9 kV
 - Fluxos de potência na chave: 1690 kW e 665 kvar
 - Corrente na chave telecomandada: 76 A
 - Tensão na chave telecomandada: 13,8 kV

As observações a seguir influenciam no resultado da estimação, portanto, é importante que sejam esclarecidas.

- Estabeleceu-se um fator de potência (fp) de 0,92 (valor típico) para todos os transformadores de distribuição. Os fatores de potência dos consumidores do *grupo A* foram obtidos de suas contas mensais de energia elétrica.
- Adotaram-se os seguintes desvios para o fator de potência dos transformadores e para os fatores de utilização:
 - Desvio em fator em potência (dfp) de transformador de distribuição: $dfp = \pm kfp \times fp$, onde kfp (escolhido de forma empírica) é a constante de ajuste de dfp . No trabalho, considerou-se $kfp = 0,05$. Resultando, portanto, em $dfp = \pm 0,05 \times 0,92 = \pm 0,046$. Este valor está dentro da faixa de variação normalmente adotada para fator de potência de transformador de distribuição.
 - Desvio em fator de utilização (dfu): $dfu = \pm kfu \times fu_{cal}$, onde kfu é a constante de ajuste de dfu . Considerando o elevado grau de incerteza sobre as pseudomedidas de P e Q , adotou-se, inicialmente, um valor alto para kfu , isto é, $kfu = \pm 0,40$ ($dfu = \pm 0,40 \times fu_{cal}$). No Cap. 8 faz-se um estudo da influência de dfu e dfp sobre os valores das grandezas estimadas.

- Classe de exatidão dos instrumentos de medição (obtidas de catálogos de fabricantes): 2% para o medidor de energia ativa e reativa; 2,5% para os medidores de corrente e tensão. Considerou-se que os erros dos transformadores para instrumentos (TC e TP) já estão incluídos nesses valores.

Estabeleceu-se como critério de parada do processo iterativo a condição em que o maior resíduo em tensão e em ângulo (valor absoluto), é menor do que uma tolerância, definida como 10^{-5} . Tendo em vista que os valores das potências especificadas não são fixos, como em um cálculo usual de fluxo de carga, mas sim determinados pelo processo de estimacão, não há como avaliar resíduos de potência, na forma tradicional. Entretanto, é possível introduzir um teste de convergência em potência para seus valores resultantes de iterações sucessivas. Porém, observou-se que se torna desnecessária a verificaco de convergência em potência para a tolerância adotada.

O programa computacional foi executado considerando-se duas situações:

- 1) Os fluxos de potência medidos não são incluídos no conjunto de medição
- 2) Os fluxos de potência medidos são incluídos no conjunto de medição

1) Resultados do programa para a primeira situação (os fluxos de potência medidos não são incluídos no conjunto de medição, vetor **z**)

Inicialmente, não se levou em conta medições dos fluxos de potências ao longo dos alimentadores, tendo em vista que a grande maioria são dispõe de medição de corrente na saída do barramento na subestaco. Nas tabelas 4.1 a 4.3, apresentam-se as grandezas medidas em tempo real e os principais resultados da estimacão de estado do alimentador NEO01N4 (COSERN).

Tabela 4.1- Resultados da estimacão de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	70,9	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	103,5	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	163,2	0,76
Corrente na chave (A)	106,0	105,7	-0,23
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0*	2322,0	-2,03
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0*	806,6	-6,04
Tensão na chave (kV)	13,7	13,4	-2,05
Erro relativo médio global			-3,02
Número de iterações	5		

Tabela 4.2- Resultados da estimacão de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	26,3	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	38,2	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	95,1	1,23
Corrente na chave (A)	67,0	66,7	-0,65
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1418,0*	1484,3	4,67
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	638,0*	494,6	-22,50
Tensão na chave (kV)	13,4	13,6	1,27
Erro relativo médio global			-10,30
Número de iteraes	5		

Tabela 4.3- Resultados da estimacão de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	36,1	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	52,7	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	115,0	115,9	0,79
Corrente na chave (A)	76,0	75,8	-0,26
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1690,0*	1679,1	-0,65
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	665,0*	579,6	-12,82
Tensão na chave (kV)	13,8	13,5	-1,96
Erro relativo médio global			-5,82
Número de iteraes	5		

(*): Os fluxos de potências medidos não estão incluídos no conjunto de medio

Os erros relativos percentuais (er) fornecidos nas tabelas são calculados com base nos valores medidos, isto é,

$$er(\%) = 100 \times \frac{Valor_{est} - Valor_{med}}{Valor_{med}} \quad (4.9)$$

onde, $Valor_{med}$ e $Valor_{est}$ representam os valores medidos e estimados. A partir desses erros, calculam-se os erros relativos médios globais (erg)

$$erg = \sqrt{\frac{1}{n_e} \sum_{i=1}^{n_e} (er_i)^2} \quad (4.10)$$

em que er_i  o erro relativo percentual de uma medida genérica e n_e  a quantidade de er .

É importante salientar que os erros apresentados nas tabelas deste capítulo e dos demais, são calculados com base nas definições dadas em (4.9) e (4.10).

Nas tabelas acima, pode-se observar que os erros em Q são superiores aos erros em P , no ponto de medição da chave. A explicação para tal fato se baseia nos erros relativos das variâncias das pseudomedidas de potências injetadas nos nós. Na análise realizada a seguir, estuda-se o comportamento dessas variâncias, dadas por (4.5) e (4.6), em relação aos respectivos valores de P e Q .

Por definição, a variância é dada pelo quadrado do desvio padrão. Então os erros relativos de σ_P^2 e σ_Q^2 devem ser calculados em relação a P^2 e Q^2 , respectivamente.

Sejam $e_{\sigma_P^2}$ e $e_{\sigma_Q^2}$ os erros relativos de σ_P^2 e σ_Q^2 em relação a P^2 e Q^2 , dados por

$$e_{\sigma_P^2} = \frac{\sigma_P^2}{P^2} \quad \text{e} \quad e_{\sigma_Q^2} = \frac{\sigma_Q^2}{Q^2}$$

Substituindo as variáveis P^2 , Q^2 , σ_P^2 e σ_Q^2 por suas expressões, dadas em (4.1), (4.2), (4.5) e (4.6), obtêm-se

$$\frac{\sigma_P^2}{P^2} = \frac{\sigma_{fp}^2}{fp^2} + \frac{\sigma_{fu}^2}{fu^2}$$

$$\frac{\sigma_Q^2}{Q^2} = \frac{fp^2 \times \sigma_{fp}^2}{(1 - fp^2)^2} + \frac{\sigma_{fu}^2}{fu^2}$$

A fim de estabelecer uma comparação entre esses erros relativos, estabelece-se a desigualdade

$$\frac{\sigma_Q^2}{Q^2} > \frac{\sigma_P^2}{P^2} \Rightarrow \left[\frac{fp^2 \times \sigma_{fp}^2}{(1 - fp^2)^2} + \frac{\sigma_{fu}^2}{fu^2} \right] > \left[\frac{\sigma_{fp}^2}{fp^2} + \frac{\sigma_{fu}^2}{fu^2} \right]$$

Resolvendo essa desigualdade, resulta em

$$\frac{fp^4}{(1 - fp^2)^2} > 1 \Rightarrow fp > 0,707$$

Portanto, a utilização de um fator de potência maior do que 0,707 implica em maiores erros relativos em Q , quando comparados com os correspondentes erros em P , independentemente dos valores adotados para o fator de utilização (fu) e para os desvios σ_{fp} e σ_{fu} . Caso contrário, os erros relativos em P serão maiores.

Comumente os alimentadores de distribuição e os seus transformadores, operam com fator de potência dentro da faixa $0,92 \pm 0,05$ (valor típico). Então, é comum empregar-se esse valor para construir as pseudomedidas de P e Q . Portanto, implica em maior erro relativo em que Q estimado, do que em P , também estimado, conforme se demonstra acima.

1) Resultados do programa para a segunda situação (os fluxos de potência medidos são incluídos no conjunto de medição, vetor z)

Ao se incluírem as medidas de fluxos de potência, porventura existentes, no modelo de medição, verifica-se uma melhora no desempenho do estimador no que tange aos erros dos fluxos de potências, conforme se pode comprovar com os resultados dados nas tabelas 4.4 a 4.6. Isso se deve, principalmente, em razão dos fluxos de potência medidos funcionarem como restrição no processo de estimção. O que não acontece na situação anterior.

Tabela 4.4 - Resultados da estimção de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor z , operando com carga máxima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	71,4	-----
Balano de reativos (kvar)	-----	104,2	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	163,3	0,80
Corrente na chave (A)	106,0	106,4	0,30
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0**	2319,2	-2,10
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0**	852,6	-0,60
Tensão na chave (kV)	13,7	13,4	-2,10
Erro relativo médio global			1,48
Número de iterações	5		

Tabela 4.5 - Resultados da estimção de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor z , operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	26,3	-----
Balano de reativos (kvar)	-----	38,2	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	95,2	1,30
Corrente na chave (A)	67,0	66,4	-0,80
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1418,0**	1428,7	0,80
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	638,0**	627,2	-1,70
Tensão na chave (kV)	13,4	13,6	1,20
Erro relativo médio global			1,19
Número de iterações	5		

Tabela 4.6 - Resultados da estimacão de estado do alimentador NEO01N4, incluindo os fluxos medidos no vetor z , operando com carga intermediária

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	36,3	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	53,0	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	115,0	116,0	0,80
Corrente na chave (A)	76,0	76,2	0,30
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1690,0**	1658,9	-1,80
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	665,0**	657,5	-1,10
Tensão na chave (kV)	13,8	13,5	-2,00
Erro relativo médio global			1,38
Número de iteraes	5		

(**): Os fluxos de potências medidos estão incluídos no conjunto de medio

Através de investigaes constatou-se que problema de convergência pode ocorrer com o estimador de estado de Schweppe, caso as pseudomedidas das injees de potências sejam incompatíveis com as medidas de corrente de ramo, que são corriqueiras nos sistemas de distribuio. Segundo a método proposto neste trabalho, os fatores de utilizao, determinados em tempo real (ver Cap. 3), são aplicados às cargas de modo a realizar um ajuste prévio das potências injetadas nos nós, aos valores das grandezas medidas, em cada janela de medio. Com esse procedimento não se verificou nenhum problema de convergência do método.

Quando se emprega um fator de utilizao fixo, as pseudomedidas das potências injetadas nos nós podem resultar em correntes de ramo superiores aos correspondentes valores medidos. Isto pode levar o método a convergir para um ponto de operao indesejado, em que n de carga se apresenta como nó de gerao. Além disso, podem surgir erros muito elevados entre valores estimados e os correspondentes valores medidos.

A explicao para esses fatos está na presença de erros grosseiros no conjunto das medidas processadas pelo estimador, os quais geram deteriorao nos estados estimados. Essa deteriorao acontece porque o estimador, que se baseia no método dos mínimos quadrados ponderados, minimiza a soma ponderada do quadrado dos resíduos e, portanto, os resíduos de valores elevados terão um grande efeito sobre o resultado final da estimacão. A seguir, apresentam-se resultados que comprovam esses fatos.

Para isso, realizou-se a estimacão do alimentador NTU01J3 (COSERN), considerando três casos:

- a) Faz-se um ajuste prévio das cargas através de fatores de utilizao, calculados pelo método apresentado no Cap.3.
- b) Faz-se um ajuste prévio das cargas empregando-se um fator de utilizao fixo.
- c) Não se faz ajuste prévio das cargas (fator de utilizao igual 1).

a) Resultados para o primeiro caso (as cargas são ajustadas previamente através de fatores de utilização, calculados com base no método dado no Cap. 3)

O processo iterativo convergiu em 6 iterações. Os resultados mais significativos estão fornecidos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados da estimacão de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u variável, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	11,4	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	23,0	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	90,0	88,2	-1,94
Corrente na chave (A)	45,0	45,5	1,06
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	985,5*	997,7	1,24
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	421,5*	402,5	4,50
Tensão na chave (kV)	13,8	13,6	1,03
Erro relativo médio global			2,36
Número de iteraes	6		

b) Resultados para o segundo caso (as cargas são ajustadas previamente por um fator de utilizao fixo)

Adotando-se um fator de utilizao de 0,80, houve convergência em 12 iteraes. Porém, para uma soluço não desejada. Nos resultados da Tabela 4.8, podem-se observar os erros absurdos nos valores estimados dos fluxos de potência. Além disso, verifica-se na Tabela 4.9 o caso de não de carga que se apresenta como não de gerao (não 61). Nessa tabela mostram-se apenas alguns nós do alimentador, onde se destaca o não problemático. Os subscritos p_{med} e est em P e Q identificam as potências pseudomedidas e estimadas, respectivamente.

Tabela 4.8 – Resultados da estimacão de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u fixo, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	12,3	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	24,0	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	90,0	90,7	0,8
Corrente na chave (A)	45,0	44,9	-0,2
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	985,5*	244,0	-97,5
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	421,5*	1058,8	151,2
Tensão na chave (kV)	13,8	13,6	-1,4
Erro relativo médio global			80,47
Número de iteraes	12		

Tabela 4.9 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J3, com as cargas ajustadas através de f_u fixo, operando com carga mínima: Potências injetadas e tensões nodais

Nó	P_{pmed} (kW)	P_{est} (kW)	Q_{pmed} (kvar)	Q_{est} (kvar)	V (kV)
2	55,2	47,5	23,5	21,1	13,8
3	55,2	47,5	23,5	21,1	13,8
4	44,0	39,2	22,5	21,0	13,7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	121,2	85,0	35,4	33,7	13,6
34	15,7	15,1	2,2	2,2	13,7
35	22,1	20,8	9,4	9,0	13,7
36	55,2	47,4	23,5	21,1	13,7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
61*	1085,2	-1814,4	356,7	190,4	13,6
62	55,2	47,6	23,5	22,4	13,6
63	36,4	33,1	13,2	13,0	13,6
64	82,8	65,7	35,3	32,9	13,6
65	46,3	41,0	27,5	26,5	13,6
66	82,8	65,6	35,3	32,9	13,6

A justificativa para os resultados destacados com sombra, nas tabelas 4.8 e 4.9, está na presença de erros grosseiros no conjunto de medidas e pseudomedidas processadas pelo estimador, os quais geram deterioração nos estados estimados, conforme discutido anteriormente no primeiro parágrafo da página 38.

c) Resultados para o terceiro caso (não se faz ajuste prévio das cargas, isto é, fator de utilização igual 1)

Não houve convergência. Vale salientar que o critério de parada é o mesmo dos casos anteriores.

É importante observar que os mesmos problemas relatados acima, com respeito ao alimentador NTU01J3, surgiram também na estimação de outros alimentadores reais.

Enfim, analisando os resultados fornecidos nas tabelas acima, para os casos em que não houve problema de convergência, conclui-se que o estimador de estado de Schweppe produziu resultados satisfatórios. Porém, isso só foi possível mediante a aplicação do método de ajuste prévio de carga, desenvolvido no Cap. 3. Esse método, além de resolver os problemas de convergência, apresentados nos casos estudados, ainda tem a vantagem de propiciar um ajuste de carga mais próximo da realidade, pois, os fatores de utilização são calculados de acordo com a variação de tensões e correntes medidas em tempo real (acompanham a curva de carga).

Capítulo 5

Estimador de Estado de Corrente Proporcional

5.1 Introdução

Algumas empresas de distribuição de energia elétrica realizam estimação de estado de seus alimentadores através de um algoritmo que ajusta as cargas nos nós de forma que a corrente calculada na saída para o alimentador seja igual ao correspondente valor medido. O modelo emprega um programa de fluxo de carga para determinar essa corrente. A razão entre as amplitudes das correntes medida e calculada é usada para fazer um ajuste linear das cargas, de modo que a corrente calculada convirja, dentro de uma tolerância pré-estabelecida, para a corrente medida. Neste trabalho, convencionou-se chamar o algoritmo de Estimador de Estado de Corrente Proporcional.

Qualquer método de solução de fluxo de carga (Newton, soma de potências, dentre outros) pode ser empregado na determinação da corrente na saída para o alimentador. No modelo de estimação de estado apresentado aqui, optou-se pela utilização do algoritmo de fluxo de carga soma de potências.

5.2 Construção do modelo

Considerando que qualquer método de solução de fluxo de carga pode ser usado pelo estimador de corrente proporcional, então, as equações do modelo são as mesmas do algoritmo de fluxo de carga que estiver sendo utilizado. Comumente, as variáveis de estado são as amplitudes e os respectivos ângulos das tensões nodais.

Os dados de entrada do estimador são os mesmos requeridos pelo algoritmo de fluxo de carga (dados fixos), acrescidos da amplitude da corrente medida na saída para o alimentador supervisionado:

- Dados fixos: topologia e parâmetros da rede; potências ativas e reativas injetadas nos nós. São feitas estimativas iniciais para essas potências, empregando-se as equações (4.1) a (4.4).
- Dado medido em tempo real: corrente na saída para o alimentador.

Uma vez fornecidos os dados de entrada, o algoritmo de fluxo de carga é inicializado. Após convergir, a corrente na saída para o alimentador é calculada e, em seguida, comparada com o valor medido, resultando em um erro. Se este erro for menor do que uma tolerância pré-estabelecida, o processo iterativo será encerrado. Caso contrário, é feito um ajuste linear nas potências injetadas nos nós, e o fluxo de carga é executado novamente. O procedimento é repetido, até haver convergência em corrente.

O ajuste linear das potências injetadas nos nós é feito por um fator de corrente proporcional, k , assim definido:

$$k = \frac{\text{corrente medida}}{\text{corrente calculada}} \quad (5.1)$$

5.3 Algoritmo

O algoritmo pode ser resumido no fluxograma mostrado abaixo.

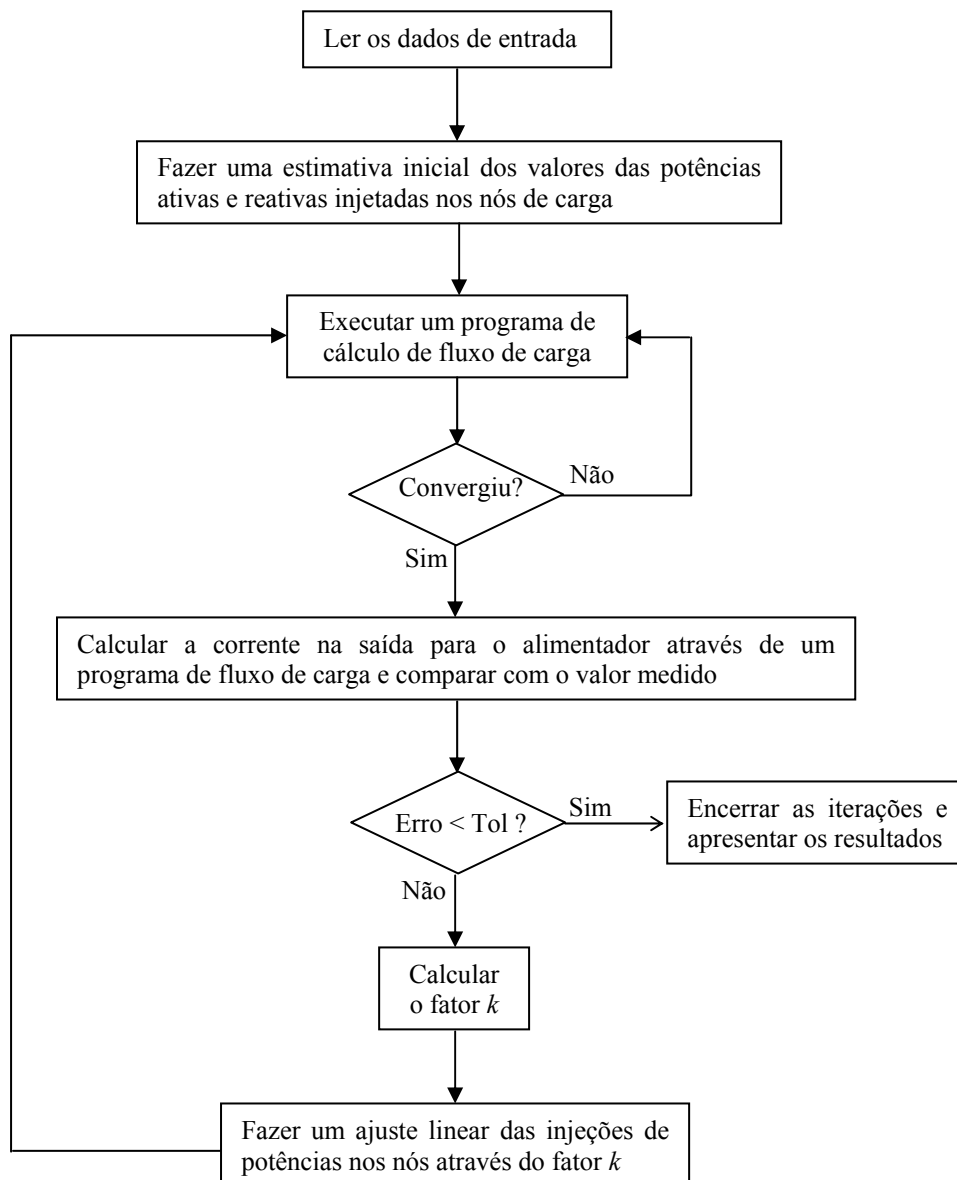


Figura 5.1 – Fluxograma do algoritmo do estimador de estado de corrente proporcional

5.3.1 Aplicação e análise de desempenho

A fim de verificar o desempenho do programa computacional que implementa o algoritmo, considerou-se como caso-teste o alimentador NEO01N4, que já vem sendo usado, com as mesmas condições de carga: máxima, mínima e intermediária. Os principais resultados da estimação de estado estão mostrados nas tabelas abaixo.

Os erros apresentados nas tabelas estão calculados de acordo as definições dadas em (4.9) e (4.10).

Tabela 5.1- Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	66,7	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	97,8	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	162,0	0,00
Corrente na chave (A)	106,0	100,3	-5,37
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2268,6	-4,28
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0	686,1	-20,03
Tensão na chave (kV)	13,7	13,6	-0,42
Erro relativo médio global			9,47
Número total de iterações	16*		

Tabela 5.2 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	22,3	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	32,8	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	94,0	0,00
Corrente na chave (A)	67,0	58,0	-13,43
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1418,0	1336,8	-5,72
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	638,0	401,3	-37,10
Tensão na chave (kV)	13,4	13,9	3,69
Erro relativo médio global			17,90
Número total de iterações	13*		

Tabela 5.3 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	33,5	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	49,1	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	115,0	115,0	0,00
Corrente na chave (A)	76,0	71,0	6,53
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1690,0	1608,0	4,85
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	665,0	483,9	27,24
Tensão na chave (kV)	13,8	13,6	1,06
Erro relativo médio global			12,72
Número total de iterações	13*		

(*): O número total de iterações é dado pela soma das iterações do fluxo de carga

Com respeito aos fatores de utilização e de potência usados na determinação das pseudomedidas iniciais, relativas às injeções de potência nos nós, é importante fazer os seguintes esclarecimentos:

- O fator de utilização, usado para realizar o ajuste prévio das cargas nos nós, foi calculado por (3.1). Para isso, consideraram-se, somente, a corrente e a tensão medidas na saída para o alimentador.
- Considerou-se um fator de potência de 0,92 para potências nominais dos transformadores de distribuição. No caso das cargas dos consumidores do *grupo A*, empregaram-se as demandas máximas e os fatores de potência colhidos nas contas mensais de energia elétrica (v. Apêndice B).

Adotou-se como critério de parada o valor absoluto do resíduo de corrente ΔI . Este deverá ser menor do que uma tolerância de 10^{-3} , ou seja:

$$\Delta I = |I_{med} - I_{cal}| < 10^{-3}$$

onde:

I_{med} : amplitude de corrente medida na saída para o alimentador;

I_{cal} : amplitude de corrente calculada na saída para o alimentador.

As empresas de distribuição que usam esse método, geralmente o fazem para condição estática de carga máxima do alimentador, isto é, empregam a maior corrente, medida em um determinado período, para calcular o fator k . As potências das cargas dos consumidores do *grupo A* são mantidas fixas durante o processo iterativo (não são ajustadas por k). Somente as potências dos transformadores são ajustadas.

Observou-se que esse procedimento causa problema de convergência ao processo iterativo do algoritmo, quando o estimador está sendo executado em tempo real. A solução foi fazer um ajuste prévio das potências injetadas nos nós (transformadores e consumidores do *grupo A*), através da aplicação de fatores de utilização, calculados pelo método apresentado no Cap. 3 (fator de utilização calculado em tempo real).

Constatou-se, ainda, que o ajuste linear das cargas, de forma indiscriminada, pode dar origem a erros grosseiros em grandezas estimadas. Como é o caso dos erros em corrente e nos fluxos de potência estimados no ponto de instalação da chave, conforme se observa nas tabelas acima. Além disso, o método usa como dado de entrada em tempo real, apenas a corrente medida na saída para o alimentador, desprezando as demais medidas em outros pontos. Este fato conduz a erros elevados nas grandezas estimadas, representando, portanto, uma desvantagem significativa, quando comparado com outros métodos de estimação que empregam o maior número de medidas possível.

Capítulo 6

Estimação de Estado em Subestação de Distribuição

6.1 Introdução

O algoritmo do estimador de estado soma de potências, que será tratado no capítulo seguinte, necessita da medição dos fluxos de potência na saída para o alimentador supervisionado. Na maioria dos casos há medição de amplitude de tensão na barra da subestação e de corrente na saída para o alimentador, então, fazendo-se uma estimativa para o seu fator de potência, é possível “pseudomedir” esses fluxos.

Neste capítulo, serão abordados dois métodos, designados por *A* e *B*, com esse objetivo. O *Método A* faz uma estimativa do fator de potência com base em dados de carga. O *Método B* emprega um algoritmo de estimação de estado, que foi desenvolvido especificamente com esse propósito, aqui denominado Estimador de Estado de Subestação.

6.2 Estimativas de fluxos de potência na saída para o alimentador, considerando um fator de potência estimado (*Método A*)

Através do *Método A* faz-se uma estimativa para o fator de potência, geralmente, a partir dos tipos de carga predominantes no alimentador (residencial, rural, comercial ou misto). O nível de tensão, a medição de reativos nas barras da subestação em que está ligado o alimentador, e a experiência do pessoal que opera e planeja o sistema, também fornecem indicativos para se fazer uma estimativa do fator de potência. Com base nessas informações e conhecendo-se as tensões nas barras da subestação, e as correntes nas suas saídas, pode-se realizar uma estimativa dos fluxos de potência para o alimentador, por meio das equações de definição de potências ativa e reativa, isto é,

$$P_{AL} = V_m \times I_m \times fp_{AL} \quad (6.1)$$

$$Q_{AL} = V_m \times I_m \times sfp_{AL} \quad (6.2)$$

onde:

P_{AL} : pseudomedida do fluxo de potência ativa na saída para o alimentador, em p.u.;

Q_{AL} : pseudomedida do fluxo de potência reativa na saída para o alimentador, em p.u.;

V_m : tensão medida no barramento da subestação em que está ligado o alimentador, em p.u.;

I_m : corrente medida na saída para o alimentador, em p.u.;

fp_{AL} : estimativa do fator de potência para o alimentador;

sfp_{AL} : seno do ângulo de fator de potência.

6.3 Estimativas de fluxos de potência na saída para o alimentador, empregando um algoritmo de estimação de estado (*Método B*)

O algoritmo desenvolvido faz a estimação de estado de barramento de subestação de distribuição, com o objetivo de determinar os fluxos de potência nas saídas para os alimentadores, que, para os propósitos deste trabalho, é a motivação maior.

O algoritmo baseia-se no método dos mínimos quadrados. Portanto, é preciso construir os modelos de circuito e de medição. Para isso, tome-se como exemplo o diagrama unifilar do barramento de média tensão de uma subestação, representado na figura abaixo, ao qual estão ligados cinco alimentadores.

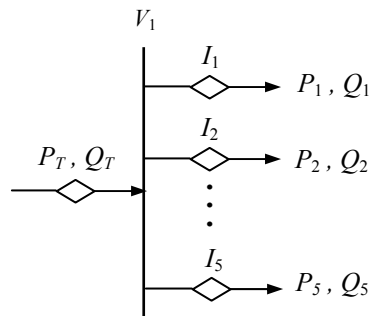


Figura 6.1 – Diagrama unifilar do barramento de média tensão (13,8 kV) de subestação de distribuição

Aplicando as equações 6.1 e 6.2, a fim de determinar os fluxos de potência nas saídas para os alimentadores, resultam em

$$P_1 = V_1 \times I_1 \times fp_1$$

⋮

$$P_5 = V_1 \times I_5 \times fp_5$$

$$Q_1 = V_1 \times I_1 \times sfp_1$$

⋮

$$Q_5 = V_1 \times I_5 \times sfp_5$$

onde:

V_1 : amplitude da tensão medida no barramento;

P_T e Q_T : fluxos de potência medidos na entrada do barramento;

I_1, \dots, I_5 : amplitudes das correntes medidas nas saídas para os alimentadores;

P_1, \dots, P_5 e Q_1, \dots, Q_5 : pseudomedidas das potências ativa e reativa nas saídas para os alimentadores.

Escrevendo as equações para as correntes correspondentes aos fluxos, obtêm-se

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{V_1} \\ &\vdots \\ I_5 &= \frac{\sqrt{P_5^2 + Q_5^2}}{V_1} \end{aligned}$$

Aplicando a lei dos nós à barra, resulta em

$$P_T = P_1 + \dots + P_5$$

$$Q_T = Q_1 + \dots + Q_5$$

De posse dessas equações, estabelecem-se as variáveis de estado e, conseqüentemente, o vetor de estado

$$\mathbf{x} = [V_1 \ P_1 \ \dots \ P_5 \ Q_1 \ \dots \ Q_5]^T, \text{ onde o T significa transposto.}$$

Uma vez definidas as variáveis de estado, as demais, obviamente, são dependentes, ou sejam: P_T , Q_T e I_1, \dots, I_5 .

O conjunto de medição é formado pelas grandezas medidas e pseudomedidas, constituindo, assim, o vetor de medição

$$\mathbf{z} = [V_1^{med} \ I_1^{med} \ \dots \ I_5^{med} \ P_1^{pmed} \ \dots \ P_5^{pmed} \ Q_1^{pmed} \ \dots \ Q_5^{pmed} \ P_T^{med} \ Q_T^{med}]^T$$

Relembrando que cada variável de estado ou variável dependente, quando medida ou pseudomedida, dá origem a uma função $h_i(\mathbf{x})$ no modelo de medição, têm-se

$$\begin{aligned} V_1^{med} &\rightarrow h_1 = V_1 \\ I_1^{med} &\rightarrow h_2 = \frac{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}{V_1} \\ &\vdots \\ I_5^{med} &\rightarrow h_6 = \frac{\sqrt{P_5^2 + Q_5^2}}{V_1} \end{aligned}$$

$$P_1^{pmed} \rightarrow h_7 = P_1$$

⋮

$$P_5^{pmed} \rightarrow h_{11} = P_5$$

$$Q_1^{pmed} \rightarrow h_{12} = Q_1$$

⋮

$$Q_5^{pmed} \rightarrow h_{16} = Q_5$$

$$P_T^{med} \rightarrow h_{17} = P_1 + \dots + P_5$$

$$Q_T^{med} \rightarrow h_{18} = Q_1 + \dots + Q_5$$

Essas funções formam um sistema composto por equações lineares e não-lineares. Portanto, deverá ser resolvido, iterativamente, através da equação normal de Gauss. Então, é preciso construir as matrizes Jacobiana, \mathbf{H} , e a matriz de covariância \mathbf{R} . A primeira é formada pelas derivadas das funções $h_i(\mathbf{x})$ em relação as variáveis de estado \mathbf{x} , ou seja:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial V_1} & \frac{\partial h_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial P_5} & \frac{\partial h_1}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_2}{\partial V_1} & \frac{\partial h_2}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial P_5} & \frac{\partial h_2}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_2}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_6}{\partial V_1} & \frac{\partial h_6}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_6}{\partial P_5} & \frac{\partial h_6}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_6}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_7}{\partial V_1} & \frac{\partial h_7}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_7}{\partial P_5} & \frac{\partial h_7}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_7}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_{11}}{\partial V_1} & \frac{\partial h_{11}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_{11}}{\partial P_5} & \frac{\partial h_{11}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_{11}}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_{12}}{\partial V_1} & \frac{\partial h_{12}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_{12}}{\partial P_5} & \frac{\partial h_{12}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_{12}}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_{16}}{\partial V_1} & \frac{\partial h_{16}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_{16}}{\partial P_5} & \frac{\partial h_{16}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_{16}}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_{17}}{\partial V_1} & \frac{\partial h_{17}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_{17}}{\partial P_5} & \frac{\partial h_{17}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_{17}}{\partial Q_5} \\ \frac{\partial h_{18}}{\partial V_1} & \frac{\partial h_{18}}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial h_{18}}{\partial P_5} & \frac{\partial h_{18}}{\partial Q_1} & \dots & \frac{\partial h_{18}}{\partial Q_5} \end{bmatrix}$$

Ao se realizar as derivadas, \mathbf{H} apresenta-se com a forma abaixo, onde a letra x representa os elementos que variam no decorrer do processo iterativo. Os demais elementos permanecem fixos, isto é, mantêm os valores 1 ou zero.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 \\ x & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 \\ x & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 \\ x & 0 & 0 & 0 & 0 & x & 0 & 0 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Observa-se que a matriz Jacobiana é bastante esparsa, o que possibilita o emprego de técnicas de compactação e esparsidade na solução do sistema linear. É importante observar também que muitas linhas são constituídas somente por zeros e “uns”. O valor 1 corresponde às derivadas das variáveis de estado em relação a elas próprias. Isso acontece quando se define como variável de estado uma grandeza medida ou pseudomedida, que também se deseja estimar.

Considerando os erros das grandezas medidas e pseudomedidas como sendo totalmente independentes, a matriz de covariância, \mathbf{R} , assume as características de uma matriz diagonal, conforme se mostra de forma compacta, abaixo. Uma vez que o vetor \mathbf{z} tem dimensão 18x1, implica em \mathbf{R} com dimensão 18x18. As variâncias são determinadas aplicando-se os conceitos discutidos na Seção 2.6.

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{\sigma_{V_1}^2, \sigma_{I_1}^2, \dots, \sigma_{I_5}^2, \sigma_{P_1}^2, \dots, \sigma_{P_5}^2, \sigma_{Q_1}^2, \dots, \sigma_{Q_5}^2, \sigma_{P_T}^2, \sigma_{Q_T}^2\}$$

onde:

$\sigma_{V_1}^2$: variância da medida de tensão V_1 ;

$\sigma_{P_T}^2$: variância da pseudomedida do fluxo de potência ativa P_T ;

$\sigma_{Q_T}^2$: variância da pseudomedida do fluxo de potência reativa Q_T ;

$\sigma_{I_k}^2$: variância da média de corrente I_k ;

$\sigma_{P_k}^2$: variância da pseudomedida de fluxo de potência ativa P_k ;

$\sigma_{Q_k}^2$: variância da pseudomedida do fluxo de potência reativa Q_k ;

em que $k=1,\dots,5$ (número de alimentadores).

O conjunto de dados de entrada do programa computacional que implementa o algoritmo, como nos casos anteriores, é composto de:

- Dados fixos: Topologia da subestação; classe de exatidão dos instrumentos de medição; fatores de potência pré-estabelecidos para os alimentadores e seus respectivos desvios.
- Dados medidos em tempo real: Potências ativa e reativa na entrada da barra de média tensão; tensão medida nessa barra; correntes medidas nas saídas para os alimentadores.

Nos resultados do algoritmo, além da estimação dos fluxos de potências nas saídas para os alimentadores ($\hat{P}_1, \dots, \hat{P}_5$ e $\hat{Q}_1, \dots, \hat{Q}_5$), que é o objetivo principal, obtêm-se também as demais grandezas que fazem parte do conjunto de medição, em outras palavras, obtém-se $\hat{\mathbf{z}}$ (vetor \mathbf{z} estimado).

6.4 Algoritmo

O algoritmo do estimador proposto pode ser resumido nos passos a seguir. O seu fluxograma é similar ao do algoritmo do estimador de estado tradicional, mostrado na Fig. 4.2.

1. Ler os dados de entrada;
2. Calcular os fluxos de potência nas saídas para os alimentadores. Para isso, utilizar as estimativas dos fatores de potência;
3. Montar as matrizes \mathbf{z} e \mathbf{R} ;
4. Construir as matrizes \mathbf{H} e $\Delta\mathbf{z}$, onde: $\Delta\mathbf{z}^{(t)} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}^{(t)})$, em que t é o contador de iterações. Em $t=1$, tem-se $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$ (vetor dos valores iniciais pré-estabelecidos);
5. Resolver iterativamente (método de Newton) a equação normal de Gauss a fim de obter $\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(t)}$ e $\hat{\mathbf{x}}^{(t+1)}$; fazer $\hat{\mathbf{x}}^{(t)} = \hat{\mathbf{x}}^{(t+1)}$;
6. Comparar o maior resíduo em potência do vetor $\Delta\hat{\mathbf{x}}^{(t)}$, em valor absoluto $|\Delta x_i^{(t)}|$, com uma tolerância predefinida. Se for menor, encerrar o processo iterativo e apresentar os resultados. Caso contrário, voltar ao quarto passo.

6.4.1 Aplicação e análise de desempenho

O algoritmo foi testado em diversos casos reais. A seguir, apresentam-se os resultados da estimação do barramento de média tensão (13,8 kV) da subestação Neópolis (COSERN), ao qual estão ligados cinco alimentadores. No barramento há medição da tensão (V_1) e do fluxo de potência ativa (P_T). O fluxo de potência reativa (Q_T) é pseudomedido. As correntes são medidas nas saídas para os alimentadores. A figura a seguir mostra o diagrama unifilar do barramento, onde estão representados o transformador (T) e o banco de capacitores (C).

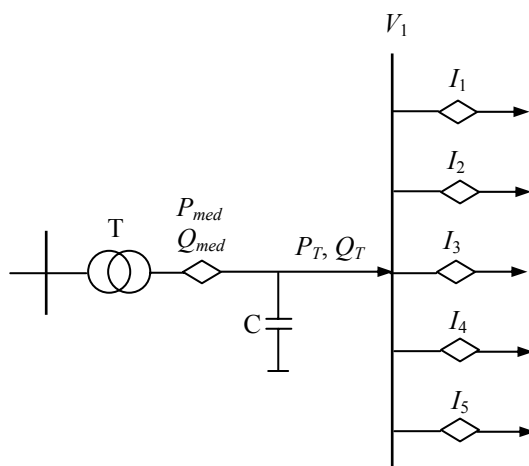


Figura 6.2 – Diagrama unifilar do barramento de média tensão subestação Neópolis (COSERN)

Os dados fornecidos abaixo são provenientes de medições reais, realizadas em um dia útil e em horas típicas da curva de carga diária (5:30h, 12:30h e 18:30h). Foram colhidos no arquivo de dados do sistema supervisório da COSERN (SAGE). Conforme já se mencionou, os dados monitorados pelo SAGE, são disponibilizados em intervalos de tempo de cinco minutos (Janela de Medição).

a) Janela de Medição I (18:30h)

- Correntes nas saídas para os alimentadores:
 - NEO01N1: 81 A;
 - NEO01N2: 94 A;
 - NEO01N3: 142 A;
 - NEO01N4: 162 A;
 - NEO01N5: 109 A
- Tensão na barra: 14 kV;
- Potência ativa na entrada da barra: 12900 kW;

- Potência reativa, pseudomedida na entrada da barra: 6100 kvar.

b) Janela de Medição II (5:45h)

- Correntes nas saídas para os alimentadores:
 - NEO01N1: 52 A;
 - NEO01N2: 72 A;
 - NEO01N3: 102 A;
 - NEO01N4: 94 A;
 - NEO01N5: 88 A;
- Tensão na barra: 14,1 kV;
- Potência ativa na entrada da barra: 9000 kW;
- Potência reativa, pseudomedida na entrada da barra: 4300 kvar.

c) Janela de Medição III (12:30h)

- Correntes nas saídas para os alimentadores:
 - NEO01N1: 105 A;
 - NEO01N2: 74 A;
 - NEO01N3: 109 A;
 - NEO01N4: 115 A;
 - NEO01N5: 115 A;
- Tensão na barra: 13,9 kV;
- Potência ativa na entrada da barra: 11200 kW;
- Potência reativa, pseudomedida na entrada da barra: 5500 kvar.

No estudo, considerou-se um fator de potência de $0,92 \pm 5\%$, para todos os alimentadores. Assumiu-se, também, uma acurácia de 5% para o medidor de potência ativa, e 2,5 % para os medidores de corrente e tensão (já estão incluídos os erros dos transformadores para instrumentos). Os resultados da estimação estão apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 6.1 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição I)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat.(%)
Tensão na barra da SE (kV)	14,00	14,02	0,13
Corrente na saída para o alimentador NEO01N1 (A)	81,0	81,1	0,15
Corrente na saída para o alimentador NEO01N2 (A)	94,0	94,2	0,18
Corrente na saída para o alimentador NEO01N3 (A)	142,0	142,4	0,31
Corrente na saída para o alimentador NEO01N4 (A)	162,0	162,6	0,36
Corrente na saída para o alimentador NEO01N5 (A)	109,0	109,2	0,22
Potências na entrada do barramento (kW)	12900,0	12997,7	0,75
(kvar)	6072,5	5997,7	-1,23
Potências na saída para o alimentador NEO01N1 (kW)	-----	1796,8	-----
(kvar)	-----	806,8	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N2 (kW)	-----	2083,0	-----
(kvar)	-----	942,9	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N3 (kW)	-----	3134,6	-----
(kvar)	-----	1461,3	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N4 (kW)	-----	3570,2	-----
(kvar)	-----	1684,5	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N5 (kW)	-----	2412,5	-----
(kvar)	-----	1102,2	-----
Erro relativo médio global			0,55
Número de iterações	3		

Tabela 6.2 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição II)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat.(%)
Tensão na barra da SE (kV)	14,10	14,12	0,15
Corrente na saída do alimentador NEO01N1 (A)	52,0	52,1	0,14
Corrente na saída do alimentador NEO01N2 (A)	72,0	72,2	0,23
Corrente na saída do alimentador NEO01N3 (A)	102,0	102,4	0,36
Corrente na saída para o alimentador NEO01N4 (A)	94,0	94,3	0,32
Corrente na saída para o alimentador NEO01N5 (A)	88,0	88,3	0,29
Potências na entrada do barramento (kW)	9000,0	9075,3	0,84
(kvar)	4275,3	4216,6	-1,37
Potências na saída para o alimentador NEO01N1 (kW)	-----	1161,6	-----
(kvar)	-----	522,2	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N2 (kW)	-----	1604,3	-----
(kvar)	-----	735,7	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N3 (kW)	-----	2264,0	-----
(kvar)	-----	1068,8	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N4 (kW)	-----	2088,6	-----
(kvar)	-----	978,4	-----
Potências na saída para o alimentador NEO01N5 (kW)	-----	1956,8	-----
(kvar)	-----	911,4	-----
Erro relativo médio global			0,62
Número de iterações	3		

Tabela 6.3 – Resultados da estimação de estado da barra de média tensão da SE Neópolis (Janela de Medição III)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat.(%)
Tensão na barra da SE (kV)	13,90	13,93	0,19
Corrente na saída para o alimentador NEO01N1 (A)	105,0	105,4	0,36
Corrente na saída para o alimentador NEO01N2 (A)	74,0	74,2	0,22
Corrente na saída para o alimentador NEO01N3 (A)	109,0	109,4	0,37
Corrente na saída para o alimentador NEO01N4 (A)	115,0	115,5	0,40
Corrente na saída para o alimentador NEO01N5 (A)	115,0	115,5	0,40
Potências na entrada para o barramento	(kW)	11200,0	11325,5
	(kvar)	5484,5	5383,7
Potências na saída para o alimentador NEO01N1	(kW)	-----	2295,9
	(kvar)	-----	1090,5
Potências na saída para o alimentador NEO01N2	(kW)	-----	1624,9
	(kvar)	-----	748,4
Potências na saída para o alimentador NEO01N3	(kW)	-----	2382,1
	(kvar)	-----	1135,9
Potências na saída para o alimentador NEO01N4	(kW)	-----	2511,2
	(kvar)	-----	1204,4
Potências na saída para o alimentador NEO01N5	(kW)	-----	2511,2
	(kvar)	-----	1204,4
Erro relativo médio global			0,81
Número de iterações	3		

Conforme se observa nas tabelas, houve convergência em 3 iterações. O processo é encerrado sempre que o maior resíduo em potência (valor absoluto), apresenta-se menor do que a tolerância, definida como 10^{-5} . É importante ressaltar que, embora a tolerância tenha sido aplicada a todas as grandezas do vetor x , é possível usar tolerâncias diferentes para grandezas físicas distintas.

De acordo com os erros relativos dados nas tabelas, pode-se concluir que o estimador faz uma excelente aproximação dos valores estimados aos valores medidos em tempo real. Na abaixo, apresentam-se os fatores de potência medidos na entrada do barramento da subestação e os fatores de potência estimados nas saídas para os alimentadores.

Tabela 6.4 – Fatores de potência

Janelas de Medição	Fatores de potência medidos na barra de MT da subestação	Fatores de potência estimados (<i>Método B</i>) nas saídas para os alimentadores				
		NEO01N1	NEO01N2	NEO01N3	NEO01N4	NEO01N5
I	0,904	0,911	0,909	0,904	0,902	0,908
II	0,903	0,910	0,907	0,902	0,903	0,904
III	0,898	0,906	0,899	0,898	0,898	0,898

Um aspecto relevante diz respeito à medição do fluxo de potência reativa (Q_T) na entrada do barramento. Usualmente, as potências ativa e reativa são medidas na saída do transformador de força (Fig. 6.2). Mas, entre o transformador e o barramento há um banco

de capacitores instalado. Então, quando o banco é ligado, o valor medido (Q_{med}) não corresponde ao valor do fluxo de reativo que chega ao barramento. Como o algoritmo requer esse valor, foi necessário calculá-lo. Em outras palavras, foi necessário construir a sua pseudomedida. Para isso, empregou-se a expressão

$$Q_T = \sqrt{\left(\sqrt{3} \times V_{1,med} \times \sum_{i=1}^n I_{i,med} \right)^2 - (P_{med})^2}$$

onde n é o número de alimentadores ligados ao barramento, $V_{1,med}$ é a tensão de linha medida no barramento e P_{med} é a potência ativa trifásica medida na saída do transformador.

Capítulo 7

Estimador de Estado Soma de Potências: Modelos Linear e Não-Linear

7.1 Introdução

Este capítulo trata de um novo método de estimação de estado voltado para sistemas de distribuição, particularmente, para alimentadores radiais. Baseia-se no mesmo princípio de redução de rede usado pelo fluxo de carga soma de potências. Apresenta o desenvolvimento de dois modelos: o linearizado e o não-linear. Assim como nos casos dos estimadores de estado anteriores, o estimador soma de potências emprega o método dos mínimos quadrados ponderados. O modelo linearizado é solucionado de forma direta, através da equação normal de Gauss, na forma (2.15). A solução do modelo não-linear resulta da aplicação da mesma equação, mas, nesse caso, na forma iterativa, conforme definida em (2.10). Assume ainda, que o sistema trifásico pode ser representado por seu equivalente monofásico.

O método proposto faz a estimação do alimentador, por seção, partindo da subestação para os ramais. As grandezas estimadas em uma seção são usadas como pseudomedidas, para estimar a seção subsequente. O conjunto de medição de cada seção é constituído por medidas e/ou pseudomedidas de fluxos de potência e de amplitudes de tensão, e, principalmente, por pseudomedidas de injeções de potências nos nós.

7.2 Fluxo de carga soma de potências

Para entender com clareza o modelo do estimador de estado soma de potências é importante que se faça uma breve apresentação do fluxo de carga soma de potências, que foi desenvolvido para sistemas de distribuição radial.

É formulado a partir da redução de um sistema elétrico radial, conforme o mostrado na Fig. 7.1, em um circuito equivalente, composto por dois nós: o nó fonte e nó de carga (Fig.7.2).

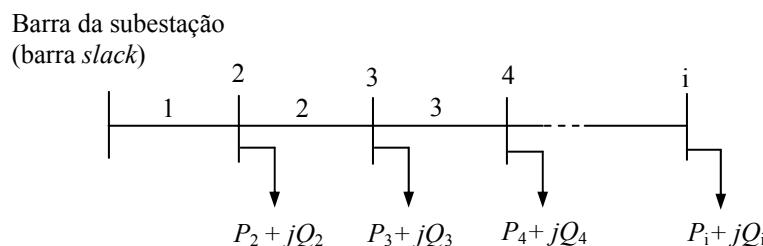


Figura 7.1 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial

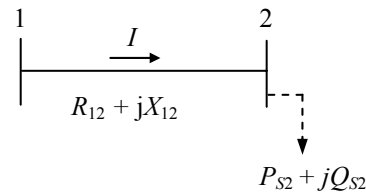


Figura 7.2 – Diagrama do sistema reduzido a dois nós

No sistema mostrado na Fig. 7.1, as injeções de potências nos nós, representadas por P_i e Q_i , são conhecidas como potências próprias. Já as potências P_{S2} e Q_{S2} , no nó 2 da Fig. 7.2, são denominadas de potências-soma ou potências equivalentes. Convencionou-se representar essas potências por uma seta tracejada, e as potências próprias por uma seta cheia.

De posse do equivalente reduzido, determina-se uma equação bi-quadrada que permite obter a solução de fluxo de carga, trabalhando somente com as amplitudes das tensões nodais. A grande vantagem do algoritmo está na simplicidade do programa computacional que o implementa. Além disso, é muito eficiente na solução exata de fluxo de carga de circuitos radiais (CESPEDES, 1990).

O método pode ser aplicado para resolver fluxo de carga em circuito radial monofásico ou trifásico. Neste trabalho, o modelo que será tomado como base assume que o sistema trifásico pode ser representado por seu equivalente monofásico. Portanto, aqui será tratado somente do modelo monofásico, onde os alimentadores primários são representados por seus parâmetros elétricos, dados em p.u. As cargas, incluindo os capacitores *shunt* para compensação de reativo, são representadas por suas componentes ativa e reativa, também, em p.u.

7.2.1 Desenvolvimento matemático

As potências-soma, P_S e Q_S , são determinadas somando-se as potências próprias do nó de carga com as potências próprias dos nós à jusante desse nó. Não esquecendo de acrescentar as perdas ativa e reativa (P_{per} e Q_{per}), referentes a todos os trechos que se encontram à frente do nó de carga. Para o nó 2 da Fig 7.2, por exemplo, têm-se

$$P_{S2} = P_2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^p P_i + \sum_{j=1}^n P_{per_j} \quad (7.1)$$

$$Q_{S2} = Q_2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 2}}^p Q_i + \sum_{j=1}^n Q_{per_j} \quad (7.2)$$

onde, p e n representam o número de nós e trechos situados à jusante do nó 2, respectivamente.

Para demonstração da equação bi-quadrada, considere a figura abaixo.

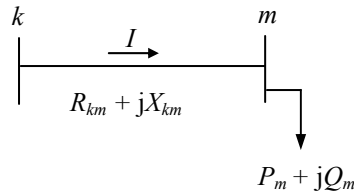


Figura 7.3 – Diagrama unifilar de um trecho de alimentador formado por dois nós

onde, identificam-se a corrente complexa no trecho km , \dot{I} , as tensões nodais complexas, \dot{V}_k e \dot{V}_m , nos nós k e m , e os parâmetros elétricos do trecho, R_{km} e X_{km} .

A corrente \dot{I} é dada por

$$\dot{I} = \frac{\dot{V}_k - \dot{V}_m}{R_{km} + jX_{km}}$$

Sabendo que

$$\dot{V}_k = V_k \angle \theta_k = V_k e^{j\theta_k}$$

$$\dot{V}_m = V_m \angle \theta_m = V_m e^{j\theta_m}$$

$$\dot{S}_m = P_m + jQ_m = \dot{V}_m \times \dot{I}^*$$

Combinando as equações, obtém-se

$$P_m + jQ_m = \frac{V_m V_k e^{j\theta_{mk}} - V_m^2}{R_{km} - jX_{km}}$$

Desenvolvendo essa equação, separando as partes real e imaginária, e trabalhando-as convenientemente, resultam em

$$V_m^4 + [2(P_m R_{km} + Q_m X_{km}) - V_k^2] V_m^2 + (P_m^2 + Q_m^2)(R_{km}^2 + X_{km}^2) = 0 \quad (7.3)$$

$$\theta_{mk} = \text{sen}^{-1} \left[\frac{(R_{km} Q_m - X_{km} P_m)}{V_m V_k} \right] \quad (7.4)$$

onde, V_k e V_m são as amplitudes das tensões nos nós k e m , e P_m e Q_m são as potências ativa e reativa injetadas no nó m .

Usando (7.3), pode-se determinar a amplitude de V_m , desde que sejam conhecidos os valores de V_k , R_{km} , X_{km} , P_{Sm} e Q_{Sm} . Então, para um trecho qualquer, como o mostrado na Fig. 7.3, a solução proposta para o problema consiste em resolver (7.3) de forma direta, independentemente dos ângulos das tensões nas barras. Uma vez determinadas as amplitudes das tensões, pode-se calcular θ_{mk} , através de (7.4), e os fluxos de potência.

O cálculo das perdas ativa e reativa, em cada trecho, é feito a partir da equação que relaciona a perda complexa, a queda de tensão e a corrente no trecho, isto é,

$$\dot{S}_{per_{km}} = \Delta \dot{V}_{km} \times \dot{I}^*$$

de onde se obtêm

$$P_{per_{km}} = \frac{(P_m^2 + Q_m^2)}{V_m^2} \times R_{km}$$

$$Q_{per_{km}} = \frac{(P_m^2 + Q_m^2)}{V_m^2} \times X_{km}$$

em que:

$S_{per_{km}}$: perda complexa no trecho km ;

$$\Delta \dot{V}_{km} = \dot{V}_k - \dot{V}_m ;$$

\dot{I}^* : conjugado da corrente complexa \dot{I} ;

$P_{per_{km}}$: perda ativa no trecho km ;

$Q_{per_{km}}$: perda reativa no trecho km .

O método apresentado acima pode ser sumarizado nos seguintes passos:

- 1) Ler os dados de entrada (dados de nós e trechos).
- 2) Assumir valores iniciais para as tensões nodais (1 p.u.) e para as perdas nos trechos (zero).
- 3) Calcular as potências equivalentes nos nós (potências-soma). Esse passo é realizado fazendo uma varredura dos nós finais para os nós iniciais, isto é, dos ramais para a subestação, constituindo a iteração à montante (*backward sweep*).
- 4) Calcular as tensões nodais e as perdas ativa e reativa por trecho. Alocar essas perdas no nó final do trecho. Nesse passo a varredura desenvolve-se

dos nós iniciais para os nós finais, ou seja, da subestação para os ramais, resultando na iteração à jusante (*forward sweep*).

- 5) Calcular a perda total e comparar com o correspondente valor da iteração anterior. Se a variação for maior do que um erro especificado (tolerância) voltar ao terceiro passo. Caso contrário, encerrar o processo iterativo.

7.3 Estimador de estado soma de potências: modelo linear

Nesta seção inicia-se o desenvolvimento do estimador soma de potências, voltado para sistemas de distribuição radiais. Por ser um modelo novo, requer o desenvolvimento de técnicas dirigidas exclusivamente para o problema. O estudo começa com o emprego de um modelo linear, pois, de acordo com Simões Costa e Salgado (2002), o estimador de estado linearizado é uma importante ferramenta auxiliar no desenvolvimento de novos métodos e técnicas ligados à estimação de estado de sistemas de potência.

O estimador de estado linearizado baseia-se em hipóteses simplificadoras, que consideram as amplitudes das tensões nodais iguais (assumem um perfil plano para as tensões, geralmente igual a 1 p.u.), e desprezam os parâmetros elétricos das linhas, portanto, negligenciam as perdas técnicas.

Embora essas hipóteses limitem bastante a abrangência e validade dos resultados do estimador linearizado, inibindo a sua aplicação prática, no entanto, resultam em uma simplificação do problema, pois conduz a uma solução direta (não-iterativa) da equação normal de Gauss. Isso permite uma verificação prévia da viabilidade do novo algoritmo de estimação de estado. Partindo dessas premissas, desenvolveu-se, inicialmente, um modelo linearizado para o algoritmo do estimador soma de potências.

Considere o diagrama unifilar de um alimentador que se deseja supervisionar, como sendo o mostrado na abaixo.

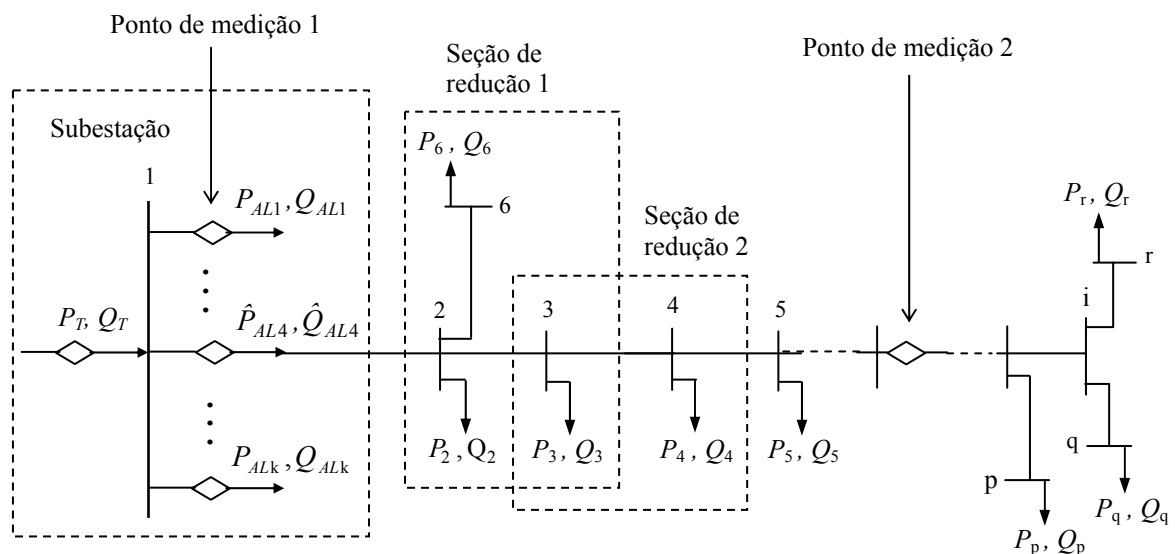


Figura 7.4 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição, onde se destaca o alimentador supervisionado

Empregando o modelo de medição descrito na Seção 2.3 e o princípio de redução de rede usado no fluxo de carga soma de potências, desenvolveu-se o algoritmo. Isso é feito a partir de medições e/ou pseudomedições de fluxos de potência nos trechos, e de pseudomedições das potências injetadas nos nós.

As pseudomedidas das potências injetadas nos nós são construídas empregando-se as expressões (4.1) a (4.4). Os fatores de potência dos transformadores de distribuição e dos consumidores do grupo *A* são definidos pelos mesmos critérios adotados no Cap. 4.

O algoritmo faz a estimação das potências nos nós, por seção. Cada seção é estimada individualmente, de forma seqüencial, “varrendo” o alimentador da subestação para os ramais. Os resultados da estimação da primeira seção de redução (seção de redução 1), mostrada na figura abaixo, por exemplo, são usados como pseudomedidas para estimar a seção subsequente. O processo segue, até que todo o alimentador tenha sido estimado. A quantidade de seções de redução construídas pelo algoritmo, durante o processo de estimação, é dada expressão: $n_s = n_t - (n_t + 1)$, onde n_s é quantidade de seções de redução, n_t é o total de nós (incluindo a barra da subestação) e n_t é o número total de nós terminais.

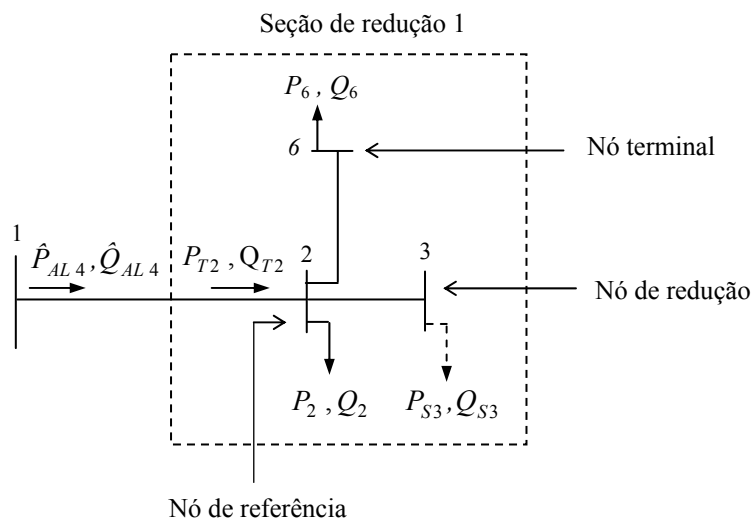


Figura 7.5 – Diagrama unifilar da seção de redução 1

Antes de avançar na construção do modelo, é fundamental que se façam os devidos esclarecimentos sobre os novos conceitos criados para o método, e a identificação da nomenclatura das variáveis utilizadas. Tomando como exemplo a seção de redução 1 (Fig. 7.5), definem-se:

- \hat{P}_{AL4} e \hat{Q}_{AL4} : fluxos de potência estimados na saída para o alimentador.
- P_{T2} e Q_{T2} : fluxos de potência que chegam ao nó de referência 2.
- P_2 e Q_2 : potências ativa e reativa próprias do nó 2.
- P_6 e Q_6 : potências ativa e reativa próprias do nó 6.

- P_{S3} e Q_{S3} : potências-soma ativa e reativa, reduzidas ao nó 3.
- Seção sob estimação. É a seção de redução que, no mínimo, dispõe de dois nós: um de referência, e outro de redução. Este último pode ser um nó terminal.
 - Nó terminal: Como o próprio nome diz, é o último nó de carga de um ramal. Nesse caso, potências próprias são iguais às potências-soma.
 - Nó de redução: É o nó onde são alocadas as potências-soma. Um nó de redução, em uma seção anterior, será nó de referência na seção de redução subsequente.
 - Nó de referência: É único em cada seção. Funciona como uma espécie de barra *slack*. Ele recebe os fluxos de potência estimados na seção anterior.

As observações abaixo são importantes para entendimento do método:

1. No caso do estimador soma de potências linearizado, os fluxos de potência que saem do nó de referência de uma seção de redução anterior são considerados iguais aos que chegam ao nó de referência da seção de redução subsequente. Em outras palavras, as perdas são desprezadas. Na seção de redução 1, por exemplo, $\hat{P}_{AL4} = P_{T2}$ e $\hat{Q}_{AL4} = Q_{T2}$.
2. De acordo com o capítulo anterior, as potências \hat{P}_{AL4} e \hat{Q}_{AL4} , que fluem da barra da subestação para o alimentador, são determinadas pelos métodos *A* ou *B* (Cap. 6).
3. As grandezas estimadas em uma seção de redução são sinalizadas com um acento circunflexo.

7.3.1 Construção do modelo

As equações dos modelos de circuito e de medição seguem as definições apresentadas na Seção 2.3. Isto é, inicialmente, definem-se equações do modelo de circuito e, em seguida, as funções do modelo de medição, para cada seção de redução.

As equações do modelo de circuito da seção de redução 1, por exemplo, descrevem o balanço de potências no nó de referência 2, ou seja, a soma dos fluxos de potência nesse nó é igual a zero (primeira lei de Kirchhoff). Não esquecendo que no modelo linearizado as perdas são desconsideradas, têm-se

$$P_{T2} = P_2 + P_{S3} + P_6$$

$$Q_{T2} = Q_2 + Q_{S3} + Q_6$$

A partir dessas equações definem-se as variáveis de estado e, conseqüentemente, o vetor de estado,

$$\mathbf{x} = [P_2 \ Q_2 \ P_{S3} \ Q_{S3} \ P_6 \ Q_6]^T$$

Uma vez definidas as variáveis de estado, as demais são dependentes: P_{T2} e Q_{T2}

Desde que as variáveis dependentes e de estado são pseudomedidas, então, todas elas irão compor o vetor de medição,

$$\mathbf{z} = [P_2^{pmed} \ Q_2^{pmed} \ P_{S3}^{pmed} \ Q_{S3}^{pmed} \ P_6^{pmed} \ Q_6^{pmed} \ P_{T2}^{pmed} \ Q_{T2}^{pmed}]^T$$

Constrói-se uma função $h(\mathbf{x})$ para cada variável pseudomedida, ou seja,

$$P_2^{pmed} \rightarrow h_1 = P_2$$

$$Q_2^{pmed} \rightarrow h_2 = Q_2$$

$$P_{S3}^{pmed} \rightarrow h_3 = P_{S3}$$

$$Q_{S3}^{pmed} \rightarrow h_4 = Q_{S3}$$

$$P_6^{pmed} \rightarrow h_5 = P_6$$

$$Q_6^{pmed} \rightarrow h_6 = Q_6$$

$$P_{T2}^{pmed} \rightarrow h_7 = P_2 + P_{S3} + P_6$$

$$Q_{T2}^{pmed} \rightarrow h_8 = Q_2 + Q_{S3} + Q_6$$

Como essas funções são lineares, pode-se resolver o problema de forma explícita através da equação normal de Gauss, na forma (2.15). Para isso, montam-se as matrizes Jacobiana, \mathbf{H} , e de covariância, \mathbf{R} .

A matriz Jacobina é dada pela derivadas de $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ em relação a \mathbf{x} , então,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_6} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_4}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_4}{\partial x_6} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_8}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_8}{\partial x_6} \end{bmatrix}$$

Os resultados das derivadas dão origem a uma matriz formada por zeros e “uns”, ou seja

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Lembrando que os erros das grandezas pseudomedidas são considerados independentes, a matriz de covariância torna-se uma matriz diagonal, onde os elementos da diagonal são as variâncias das grandezas do vetor \mathbf{z} ,

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{ \sigma_{P_2}^2 \quad \sigma_{Q_2}^2 \quad \sigma_{P_{S_3}}^2 \quad \sigma_{Q_{S_3}}^2 \quad \sigma_{P_6}^2 \quad \sigma_{Q_6}^2 \quad \sigma_{P_{r_2}}^2 \quad \sigma_{Q_{r_2}}^2 \}$$

Essas variâncias são calculadas com base na teoria de propagação de incertezas, tratada na Seção 2.6, conforme se mostra a seguir.

1. Variâncias das pseudomedidas de injeções de potências nos nós de distribuição e do grupo A

São calculadas aplicando-se a expressão de propagação de incerteza, na forma (2.20), às equações das pseudomedidas de potências injetadas nos nós do alimentador, resultando nas equações (4.5) a (4.8).

2. Variâncias das pseudomedidas de potências-soma

Desprezando os termos correspondentes às perdas, nas equações (7.1) e (7.2), e aplicando (2.20), determinam-se as variâncias das potências-soma. Então, as variâncias de P_{S_3} e Q_{S_3} no nó 3, da seção de redução 1 (Fig. 7.5), por exemplo, são

$$\sigma_{P_{S_3}}^2 = \sigma_{P_3}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^p \sigma_{P_i}^2 \quad (7.5)$$

$$\sigma_{Q_{S_3}}^2 = \sigma_{Q_3}^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq 3}}^p \sigma_{Q_i}^2 \quad (7.6)$$

3. Variâncias das pseudomedidas dos fluxos de potência que chegam a um nó de referência

São calculadas a partir das variâncias das medidas ou pseudomedidas de fluxos de potência que saem do nó de referência da seção de redução anterior, já estimada. A primeira seção a ser estimada (seção de redução 1) recebe os fluxos de potências advindos diretamente da barra da subestação (Fig. 7.5). Então, é preciso conhecer as variâncias dessas pseudomedidas. No caso-teste que vem sendo usado, esses fluxos são pseudomedidos. Aplicando (2.20) nas expressões (6.1) e (6.2), resultam em

$$\sigma_{\hat{P}_{AL}}^2 = (fp_{AL} \times I_m)^2 \times \sigma_{V_m}^2 + (fp_{AL} \times V_m)^2 \times \sigma_{I_m}^2 + (V_m \times I_m)^2 \times \sigma_{fp_{AL}}^2$$

$$\sigma_{\hat{Q}_{AL}}^2 = (1 - fp_{AL}^2) \times I_m^2 \times \sigma_{V_m}^2 + (1 - fp_{AL}^2) \times V_m^2 \times \sigma_{I_m}^2 + (V_m \times I_m)^2 \times \frac{\sigma_{fp_{AL}}^2}{1 - fp_{AL}^2},$$

para $0 \leq fp_{AL} < 1$

onde:

$\sigma_{\hat{P}_{AL}}^2$: variância de \hat{P}_{AL} ;

$\sigma_{\hat{Q}_{AL}}^2$: variância de \hat{Q}_{AL} ;

$\sigma_{V_m}^2$: variância da medida da tensão;

$\sigma_{I_m}^2$: variância da medida da corrente;

$\sigma_{fp_{AL}}^2$: variância do fator de potência.

As expressões das variâncias de P_{T2} e Q_{T2} são determinadas de acordo com a definição dada em (2.21), resultando em

$$\sigma_{P_{T2}}^2 = \frac{\sigma_{\hat{P}_{AL}}^2}{\hat{P}_{AL}^2} \times P_{T2}^2$$

$$\sigma_{Q_{T2}}^2 = \frac{\sigma_{\hat{Q}_{AL}}^2}{\hat{Q}_{AL}^2} \times Q_{T2}^2$$

Uma vez que \hat{P}_{AL} e \hat{Q}_{AL} , e suas respectivas variâncias, são conhecidas, então, $\sigma_{P_{T2}}^2$ e $\sigma_{Q_{T2}}^2$ podem ser calculadas.

A fim de generalizar a forma de calcular essas variâncias, considere-se a seção de redução 2 (Fig. 7.6) de onde se deseja calcular as variâncias de P_{T3} e Q_{T3} .

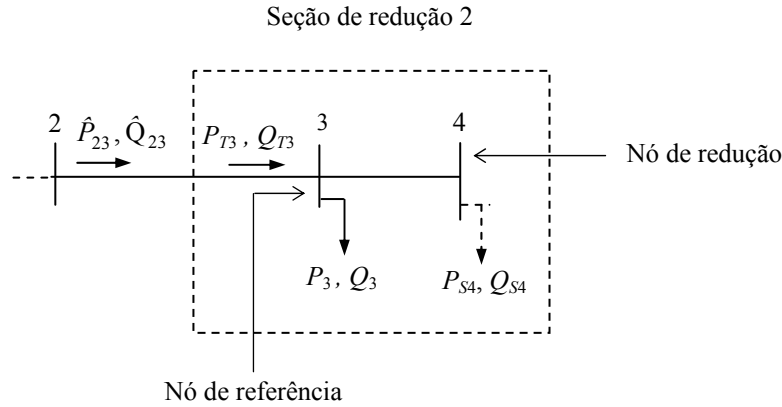


Figura 7.6 – Diagrama unifilar da seção de redução 2

Procedendo-se de modo semelhante ao que foi feito para determinação de $\sigma_{P_{T2}}^2$ e $\sigma_{Q_{T2}}^2$, ou seja,

$$\sigma_{P_{T3}}^2 \cong \frac{\sigma_{\hat{P}_{23}}^2}{(\hat{P}_{23})^2} \times (P_{T3})^2 \quad (7.7)$$

$$\sigma_{Q_{T3}}^2 \cong \frac{\sigma_{\hat{Q}_{23}}^2}{(\hat{Q}_{23})^2} \times (Q_{T3})^2 \quad (7.8)$$

onde:

\hat{P}_{23} e \hat{Q}_{23} : fluxos de potência no trecho 23;

$\sigma_{\hat{P}_{23}}^2$ e $\sigma_{\hat{Q}_{23}}^2$: variâncias de \hat{P}_{23} e \hat{Q}_{23} ;

P_{T3} e Q_{T3} : fluxos de potência que chegam ao nó de referência 3.

7.3.2 Algoritmo

O algoritmo de programação do modelo desenvolvido para o estimador pode ser resumido no fluxograma mostrado na Fig. 7.7.

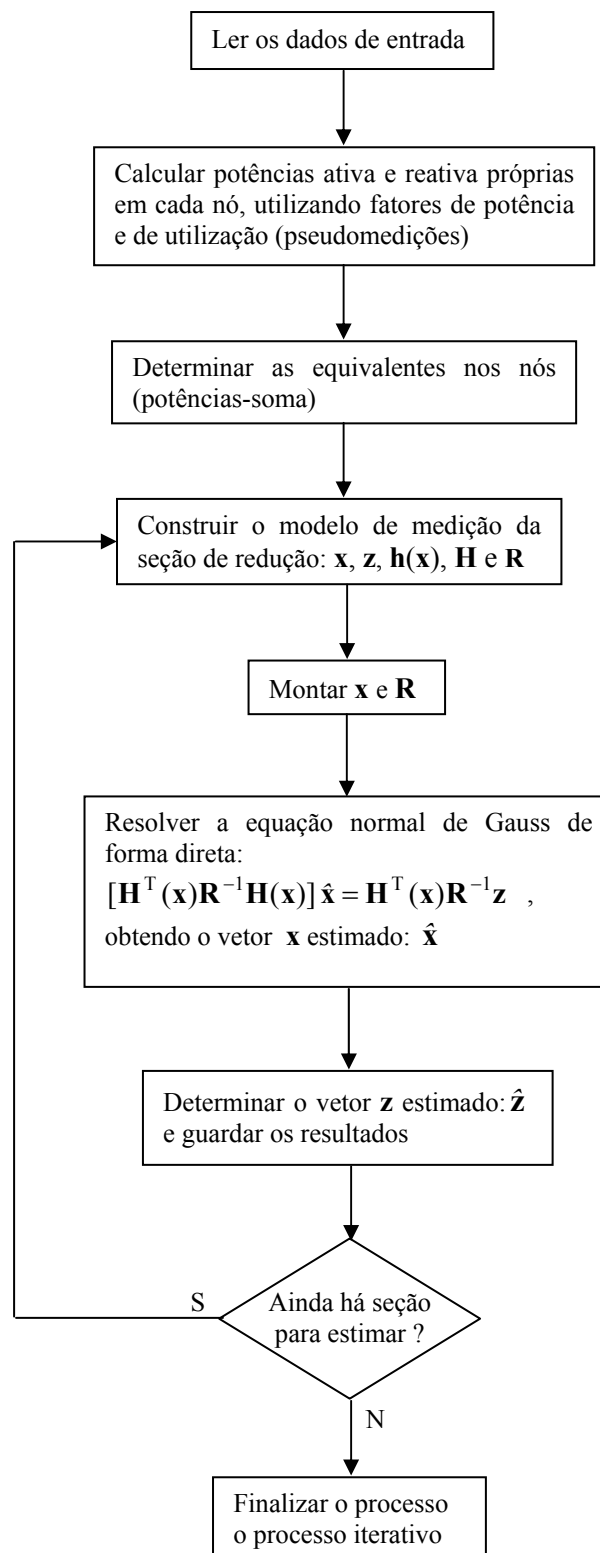


Figura 7.7 – Fluxograma do algoritmo do estimador soma de potências: modelo linearizado

É importante observar que se houver medição de grandezas (no caso, fluxos de potência e amplitudes de tensão) em uma seção de redução, esses valores serão usados na estimação da seção. O algoritmo encarrega-se de substituir os valores pseudomedidos do conjunto de medição (vetor z) pelos correspondentes valores medidos.

Assim como nos anteriores, o conjunto de dados de entrada é constituído por:

- Dados fixos: Topologia do alimentador; potência nominal dos transformadores e suas estimativas em fator de potência e desvios; demandas máximas e fatores de potência dos consumidores do *grupo A*, obtidos das contas de energia elétrica; fatores de utilização e seus respectivos desvios; classes de exatidão dos instrumentos de medição.
- Dados medidos em tempo real: Amplitudes de tensão, de corrente e fluxos de potência.

7.3.3 Aplicação do algoritmo e análise de resultados

O algoritmo foi testado em diversos casos reais. A seguir apresentam-se os principais resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (COSERN), que já vem sendo usado como caso-teste, operando nas mesmas condições de carga: máxima, mínima e intermediária. Os fatores de utilização e de potência e seus respectivos desvios, bem como as classes de exatidão dos instrumentos de medição, mantêm os mesmos valores adotados nos casos anteriores (v. Apêndice A).

Tabela 7.1- Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	172,6*	6,50
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	3570,2 ^{MB}	3880,5	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	1684,5 ^{MB}	1396,8	-----
Corrente na chave (A)	106,0	106,2*	0,16
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2389,1	0,81
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0	855,6	-0,30
Tensão na chave (kV)	13,7	13,8	0,73
Erro relativo médio global			2,95
Número de seções de redução	51		

Tabela 7.2 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	101,1*	7,50
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	2088,6 ^{MB}	2257,0	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	978,4 ^{MB}	863,0	-----
Corrente na chave (A)	67,0	65,4*	-2,41
Potência ativa na chave (kW)	1418,0	1431,4	0,94
Potência reativa na chave (kvar)	638,0	627,3	-1,70
Tensão na chave (kV)	13,4	13,8	3,00
Erro relativo médio global			3,88
Número de seções de redução	51		

Tabela 7.3 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Corrente na saída para o alimentador (A)	115,0	122,1*	6,20
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	2511,2 ^{MB}	2740,2	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	1204,4 ^{MB}	1002,8	-----
Corrente na chave (A)	76,0	76,5*	0,62
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1690,0	1704,6	0,90
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	665,0	660,0	-0,70
Tensão na chave (kV)	13,8	13,8	0,00
Erro relativo médio global			2,81
Número de seções de redução	51		

(^{MB}): Potências estimadas através do *Método B* (Cap. 6).

(*): Correntes estimadas considerando as tensões nodais iguais a 1 p.u. (modelo linearizado).

Observando os resultados, onde o maior erro relativo médio global é 3,88 (Tabela 7.2), chega-se à conclusão de que o algoritmo proposto é viável. Portanto, partiu-se para um modelo mais completo, o não-linear, que será abordado nas seções seguintes.

7.4 Estimador de estado soma de potências: modelo não-linear

A construção desse modelo fundamenta-se nos mesmos princípios utilizados para o estimador linearizado. A diferença básica entre os dois reside no fato de que, no modelo não-linear, as perdas técnicas nos trechos do alimentador não são desprezadas. Esse fato leva à modificação do conjunto de equações do modelo de circuito, que agora passa a ter equações não-lineares. Por conseguinte, a equação normal de Gauss precisa ser resolvida iterativamente.

7.4.1 Construção do modelo

Conforme visto na seção anterior, a estimação de estado de um alimentador, pelo método proposto, é realizada por seção. Então, é importante deixar bastante claro como é modelada cada seção de redução. Isso será feito lançando-se mão das seções de redução 1 e 2, mostradas nas figuras 7.5 e 7.6.

a) Modelo para seção de redução 1 (Fig. 7.5)

Tomando como exemplo a seção de redução 1, o seu modelo é formulado a partir das equações de injeção de potências nos nós de redução, respectivamente, 3 e 6

$$P_{S3} = -\left\{V_3^2 G_{33} + V_3 V_2 [G_{32} \cos(\theta_3 - \theta_2) + B_{32} \text{sen}(\theta_3 - \theta_2)]\right\}$$

$$Q_{S3} = -\left\{-V_3^2 B_{33} + V_3 V_2 [G_{32} \text{sen}(\theta_3 - \theta_2) - B_{32} \cos(\theta_3 - \theta_2)]\right\}$$

$$P_6 = -\left\{V_6^2 G_{66} + V_6 V_3 [G_{63} \cos(\theta_6 - \theta_3) + B_{63} \text{sen}(\theta_6 - \theta_3)]\right\}$$

$$Q_6 = -\left\{-V_6^2 B_{66} + V_6 V_3 [G_{63} \text{sen}(\theta_6 - \theta_3) - B_{63} \cos(\theta_6 - \theta_3)]\right\}$$

e das equações de balanço de potências no nó de referência 2

$$P_{T2} = P_2 + P_{S3} + P_6 + P_{per23} + P_{per26}$$

$$Q_{T2} = Q_2 + Q_{S3} + Q_6 + Q_{per23} + Q_{per26}$$

onde:

G e B : elementos da matriz admitância de barra;

V_2 , V_3 e V_4 : tensões nos nós 2, 3 e 4;

θ_2 , θ_3 e θ_4 : ângulos das tensões V_2 , V_3 e V_4 ;

P_{per23} e P_{per24} : perdas ativa nos trechos 23 e 24;

Q_{per23} e Q_{per24} : perdas reativa nos trechos 23 e 24.

Com base nessas equações, constrói-se o modelo de medição. Primeiramente, definem-se as variáveis de estado, que constituem o vetor de estado,

$$\mathbf{x} = [P_{T2} \ Q_{T2} \ V_2 \ \theta_2 \ V_3 \ \theta_3 \ V_6 \ \theta_6]^T$$

e depois as variáveis dependentes: P_2 , Q_2 , P_{S3} , Q_{S3} , P_6 e Q_6 .

Com exceção de V_3 , θ_3 , V_6 e θ_6 , todas as outras variáveis são pseudomedidas, resultando no vetor de medição

$$\mathbf{z} = \left[P_{T_2}^{pmed} \quad Q_{T_2}^{pmed} \quad V_2^{pmed} \quad \theta_2^{pmed} \quad P_{S3}^{pmed} \quad Q_{S3}^{pmed} \quad P_6^{pmed} \quad Q_6^{pmed} \quad P_2^{pmed} \quad Q_2^{pmed} \right]^T$$

As variáveis de estado P_{T_2} , Q_{T_2} , V_2 e θ_2 são determinadas conforme será mostrado a seguir, as demais já foram discutidas na formulação do modelo linearizado.

Na Fig. 7.5, os fluxos de potência que chegam ao nó 2, P_{T_2} e Q_{T_2} , considerando as perdas, são

$$P_{T_2} = \hat{P}_{AL4} - P_{per12}$$

$$Q_{T_2} = \hat{Q}_{AL4} - Q_{per12}$$

onde \hat{P}_{AL4} e \hat{Q}_{AL4} são os fluxos das potências estimados na saída para o alimentador, e P_{per12} e Q_{per12} são as perdas no trecho 12, dadas por

$$P_{per12} = R_{12} \times \frac{(\hat{P}_{AL4})^2 + (\hat{Q}_{AL4})^2}{V_1^2}$$

$$Q_{per12} = X_{12} \times \frac{(\hat{P}_{AL4})^2 + (\hat{Q}_{AL4})^2}{V_1^2}$$

A tensão V_2 e o ângulo θ_2 são determinados a partir das equações (7.3) e (7.4), aplicadas ao trecho 12 da Fig. 7.5, resultando em

$$V_2 = \frac{1}{V_1} \left[Z_{12}^2 (P_{12}^2 + Q_{12}^2) - 2V_2^2 (R_{12}P_{12} + X_{12}Q_{12}) + V_1^4 \right]^{1/2}$$

$$\theta_{21} = \text{sen}^{-1} \left[\frac{(-R_{12}Q_{12} + X_{12}P_{12})}{V_1V_2} \right]$$

Sabendo que $\theta_{21} = \theta_2 - \theta_1$, obtém-se

$$\theta_2 = \theta_1 + \text{sen}^{-1} \left[\frac{(-R_{12}Q_{12} + X_{12}P_{12})}{V_1V_2} \right]$$

A tensão V_1 é medida e seu ângulo θ_1 , é considerado igual a zero. Os fluxos de potência P_{12} e Q_{12} são iguais a \hat{P}_{AL4} e \hat{Q}_{AL4} , respectivamente. Como os parâmetros elétricos do trecho são conhecidos, então, pode-se calcular P_{T_2} , Q_{T_2} , V_2 e θ_2 .

Conhecendo-se as equações de circuito da seção e as grandezas pseudomedidas, constroem-se as funções do modelo de medição

$$P_{T2}^{pmed} \rightarrow h_1 = P_{T2}$$

$$Q_{T2}^{pmed} \rightarrow h_2 = Q_{T2}$$

$$V_2^{pmed} \rightarrow h_3 = V_2$$

$$\theta_2^{pmed} \rightarrow h_4 = \theta_2$$

$$P_{S3}^{pmed} \rightarrow h_5 = -\{V_3^2 G_{33} + V_3 V_2 [G_{32} \cos(\theta_3 - \theta_2) + B_{32} \text{sen}(\theta_3 - \theta_2)]\}$$

$$Q_{S3}^{pmed} \rightarrow h_6 = -\{-V_3^2 B_{33} + V_3 V_2 [G_{32} \text{sen}(\theta_3 - \theta_2) - B_{32} \cos(\theta_3 - \theta_2)]\}$$

$$P_6^{pmed} \rightarrow h_7 = -\{V_6^2 G_{66} + V_6 V_2 [G_{62} \cos(\theta_6 - \theta_2) + B_{62} \text{sen}(\theta_6 - \theta_2)]\}$$

$$Q_6^{pmed} \rightarrow h_8 = -\{-V_6^2 B_{66} + V_6 V_2 [G_{62} \text{sen}(\theta_6 - \theta_2) - B_{62} \cos(\theta_6 - \theta_2)]\}$$

$$P_2^{pmed} \rightarrow h_9 = P_{T2} - P_{S3} - P_6 - P_{per23} - P_{per26}$$

$$Q_2^{pmed} \rightarrow h_{10} = Q_{T2} - Q_{S3} - Q_6 - Q_{per23} - Q_{per26}$$

A derivadas dessas funções, em relação às variáveis de estado, resultam na matriz Jacobiana que, de forma compacta, é

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_8} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_5}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_5}{\partial x_8} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_{10}}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_{10}}{\partial x_8} \end{bmatrix}$$

A solução das derivadas resulta em uma matriz esparsa, cujo formato está mostrado abaixo. A letra x indica os elementos que variam no decorrer da solução iterativa (solução da equação normal de Gauss pelo método de Newton).

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & x & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & x & x \\ 0 & 0 & x & x & 0 & 0 & x & x \\ 1 & 0 & x & x & x & x & x & x \\ 0 & 1 & x & x & x & x & x & x \end{bmatrix}.$$

Considerando que os erros das pseudomedidas são independentes, então, a matriz de covariância é diagonal, assim definida,

$$\mathbf{R} = \text{diag}\{\sigma_{P_{T2}}^2, \sigma_{Q_{T2}}^2, \sigma_{V_2}^2, \sigma_{\theta_2}^2, \sigma_{P_{S3}}^2, \sigma_{Q_{S3}}^2, \sigma_{P_6}^2, \sigma_{Q_6}^2, \sigma_{P_2}^2, \sigma_{Q_2}^2\}$$

Com exceção das variâncias de V_2 e θ_2 , as demais são determinadas de acordo com os procedimentos apresentados na Subseção 7.3.1.

As variâncias $\sigma_{V_2}^2$ e $\sigma_{\theta_2}^2$ são calculadas aplicando-se (2.20) nas expressões que determinam V_2 e θ_2 , resultando em

$$\sigma_{V_2}^2 = \left(\frac{\partial V_2}{\partial V_1}\right)^2 \sigma_{V_1}^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial \hat{P}_{AL4}}\right)^2 \sigma_{\hat{P}_{AL4}}^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial \hat{Q}_{AL4}}\right)^2 \sigma_{\hat{Q}_{AL4}}^2$$

$$\sigma_{\theta_2}^2 = \sigma_{\theta_{21}}^2 + \sigma_{\theta_1}^2$$

onde $\sigma_{\theta_{21}}^2$ é

$$\sigma_{\theta_{21}}^2 = \left(\frac{\partial \theta_{21}}{\partial V_1}\right)^2 \sigma_{V_1}^2 + \left(\frac{\partial \theta_{21}}{\partial V_2}\right)^2 \sigma_{V_2}^2 + \left(\frac{\partial \theta_{21}}{\partial \hat{P}_{AL4}}\right)^2 \sigma_{\hat{P}_{AL4}}^2 + \left(\frac{\partial \theta_{21}}{\partial \hat{Q}_{AL4}}\right)^2 \sigma_{\hat{Q}_{AL4}}^2$$

Comumente o ângulo da tensão na barra da subestação, θ_1 , é tomado com valor zero. No estudo de estimação, esse valor pode ser considerado como uma pseudomedida com incerteza muito baixa. Aqui, adota-se uma variância de 10^{-8} , ou seja, $\sigma_{\theta_1}^2 = 10^{-8}$.

b) Modelo para seção de redução 2 (Fig. 7.6)

De maneira similar ao que se fez para seção de redução 1, escrevem-se, em primeiro lugar, as equações do modelo de circuito para seção de redução 2

$$P_{S4} = -\left\{V_4^2 G_{44} + V_4 V_3 [G_{43} \cos(\theta_4 - \theta_3) + B_{43} \text{sen}(\theta_4 - \theta_3)]\right\}$$

$$Q_{S4} = -\left\{-V_4^2 B_{44} + V_4 V_3 [G_{43} \text{sen}(\theta_4 - \theta_3) - B_{43} \cos(\theta_4 - \theta_3)]\right\}$$

$$\hat{P}_{T3} = P_3 + P_{S4} + P_{per34}$$

$$\hat{Q}_{T3} = Q_3 + Q_{S4} + Q_{per34}$$

A partir dessas equações, definem-se as variáveis de estado, que dão origem ao vetor de estado

$$\mathbf{x} = [\hat{P}_{T3} \quad \hat{Q}_{T3} \quad \hat{V}_3 \quad \hat{\theta}_3 \quad V_4 \quad \theta_4]^T$$

e as variáveis dependentes: P_{S4} , Q_{S4} , P_3 e Q_3 .

Com exceção de V_4 e θ_4 , as demais variáveis são pseudomedidas, resultando no vetor de medição

$$\mathbf{z} = [\hat{P}_{T3}^{pmed} \quad \hat{Q}_{T3}^{pmed} \quad \hat{V}_3^{pmed} \quad \hat{\theta}_3^{pmed} \quad P_{S4}^{pmed} \quad Q_{S4}^{pmed} \quad P_3^{pmed} \quad Q_3^{pmed}]^T$$

Por conseguinte, as funções $h_i(\mathbf{x})$ do modelo de medição, são

$$\hat{P}_{T3}^{pmed} \rightarrow h_1 = \hat{P}_{T3}$$

$$\hat{Q}_{T3}^{pmed} \rightarrow h_2 = \hat{Q}_{T3}$$

$$\hat{V}_3^{pmed} \rightarrow h_3 = \hat{V}_3$$

$$\hat{\theta}_3^{pmed} \rightarrow h_4 = \hat{\theta}_3$$

$$P_{S4}^{pmed} \rightarrow h_5 = -\left\{V_4^2 G_{44} + V_4 V_3 [G_{43} \cos(\theta_4 - \theta_3) + B_{43} \text{sen}(\theta_4 - \theta_3)]\right\}$$

$$Q_{S4}^{pmed} \rightarrow h_6 = -\left\{-V_4^2 B_{44} + V_4 V_3 [G_{43} \text{sen}(\theta_4 - \theta_3) - B_{43} \cos(\theta_4 - \theta_3)]\right\}$$

$$P_3^{pmed} \rightarrow h_7 = \hat{P}_{T3} - P_{S4} - P_{per34}$$

$$Q_3^{pmed} \rightarrow h_8 = \hat{Q}_{T3} - Q_{S4} - Q_{per34}$$

As perdas no trecho 34 (Fig. 7.6), que aparecem nas funções h_7 e h_8 , são calculadas pelas equações

$$P_{per34} = R_{34} \times \frac{(\hat{P}_{34})^2 + (\hat{Q}_{34})^2}{\hat{V}_3^2}$$

$$Q_{per34} = X_{34} \times \frac{(\hat{P}_{34})^2 + (\hat{Q}_{34})^2}{\hat{V}_3^2}$$

onde:

$$\hat{P}_{34} = \hat{P}_{T3} - P_3;$$

$$\hat{Q}_{34} = \hat{Q}_{T3} - Q_3.$$

Derivando essas funções em relação às variáveis de estado, resulta na matriz Jacobiana,

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_1}{\partial x_6} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_5}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_5}{\partial x_6} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial h_8}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial h_8}{\partial x_6} \end{bmatrix}$$

cujo formato é

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & x & x & x \\ 0 & 0 & x & x & x & x \\ 1 & 0 & x & x & x & x \\ 0 & 1 & x & x & x & x \end{bmatrix}.$$

Por sua vez, considerando os erros das grandezas de \mathbf{z} como sendo independentes, então, a matriz de covariância é

$$\mathbf{R} = \text{diag} \left\{ \sigma_{P_{r3}}^2, \sigma_{Q_{r3}}^2, \sigma_{V_3}^2, \sigma_{\theta_3}^2, \sigma_{P_{s4}}^2, \sigma_{Q_{s4}}^2, \sigma_{P_3}^2, \sigma_{Q_3}^2 \right\}$$

em que os elementos da diagonal são as variâncias das grandezas pseudomedidas, que são calculadas de modo semelhante aos casos anteriores.

De acordo com o algoritmo proposto, a menor seção de redução é formada por dois nós (o nó de referência e o outro de redução ou terminal). Isso implica em uma matriz Jacobiana de dimensão (8x6), como no caso da seção de redução 2. A maior seção de redução, verificada em casos reais estudados, era dotada de quatro nós, o que resultara em uma matriz Jacobiana de dimensão (12x10).

A dimensão da matriz Jacobiana de uma seção de redução tem dimensão $n_L \times n_C$, onde $n_L = 2 \times (n_{ns} + 1) + 2$ e $n_C = 2 \times (n_{ns} + 1)$, sendo n_{ns} igual ao número de nós da seção de redução.

Conforme se observa, as matrizes Jacobianas das seções de redução são de pequena dimensão e esparsas. Porém, as matrizes de ganho \mathbf{G} ($\mathbf{G} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}$), são cheias, portanto, dispensam técnicas de esparsidade na solução da equação normal de Gauss.

Para se ter um idéia do formato dessas matrizes, apresentam-se abaixo as matrizes de ganho, referentes às seções de redução 1 e 2, respectivamente, \mathbf{G}_1 e \mathbf{G}_2 .

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} x & 0 & x & x & x & x & x & x \\ 0 & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x & x & x \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} x & 0 & x & x & x & x \\ 0 & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x \\ x & x & x & x & x & x \end{bmatrix}.$$

7.4.2 Algoritmo

O fluxograma mostrado na Fig. 4.8 resume os principais passos do algoritmo proposto.

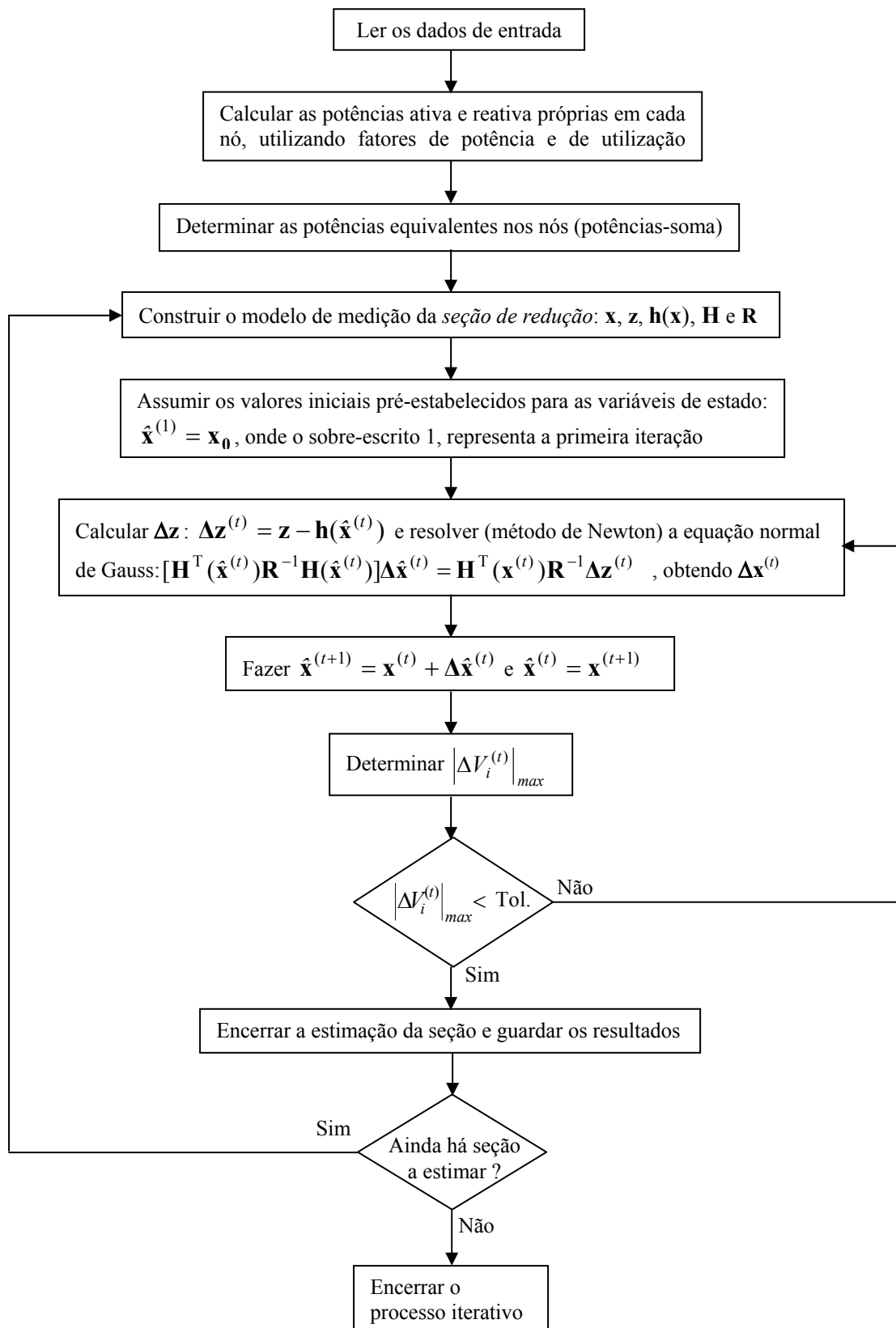


Figura 7.8 – Fluxograma do algoritmo do estimador soma de potências: modelo não-linear

Assim como no caso do modelo linearizado, o algoritmo ao identificar grandezas medidas em uma seção de redução, substitui os valores pseudomedidos do conjunto de medição (vetor \mathbf{z}) pelos correspondentes valores medidos, passando a usá-los no processo de estimação.

O conjunto de dados de entrada do programa que implementa o algoritmo é o mesmo usado pelo programa do modelo linearizado, acrescido dos parâmetros elétricos do alimentador (parâmetros-série).

7.3.3 Aplicação do algoritmo e análise de resultados

O programa computacional que implementa o algoritmo foi testado em vários alimentadores reais. As tabelas a seguir apresentam os principais resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando nas condições de carga máxima, mínima e intermediária. Maiores detalhes dos dados de entrada encontram-se nos apêndices *A* e *B*.

Tabela 7.4 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	82,4	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	119,6	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	170,7	5,40
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	3570,2 ^{MB}	3881,2	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	1684,5 ^{MB}	1436,2	-----
Corrente na chave (A)	106,0	107,0	0,90
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2389,3	0,80
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0	855,8	-0,30
Tensão na chave (kV)	13,7	13,7	0,00
Erro relativo médio global			2,46
Tempo de execução do programa em p.u.	1,0011*		
Número total de iterações	127		
Número de seções de redução	51		
Número médio de iterações por seção de redução	2,49**		

Tabela 7.5 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	29,8	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	43,0	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	100,2	6,60
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	2088,6 ^{MB}	2293,1	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	978,4 ^{MB}	857,1	-----
Corrente na chave (A)	67,0	67,3	0,50
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1418,0	1431,5	1,00
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	638,0	627,4	-1,70
Tensão na chave (kV)	13,4	13,4	0,00
Erro relativo médio global			3,10
Tempo de execução do programa em p.u.	0,9348*		
Número total de iterações	122		
Número de seções de redução	51		
Número médio de iterações por seção de redução	2,39**		

Tabela 7.6 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga intermediária

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	42,4	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	61,5	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	115,0	121,6	5,8
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	2511,2 ^{MB}	2744,5	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	1204,4 ^{MB}	1020,1	-----
Corrente na chave (A)	76,0	76,5	0,60
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1690,0	1704,7	0,90
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	665,0	660,2	-0,70
Tensão na chave (kV)	13,8	13,8	0,00
Erro relativo médio global			2,64
Tempo de execução do programa em p.u.	0,9565*		
Número total de iterações	122		
Número de seções de redução	51		
Número médio de iterações por seção de redução	2,39**		

- (*): Os tempos de execução dos programas apresentados neste trabalho são dados em p.u. Para isso, toma-se como base 46 ms, necessário para realizar o laço $x = (0,02)^k$, onde k varia de 1 até 10^5 . Os programas, assim como o laço, foram escritos em linguagem C++ e executados em uma máquina Athlon XP 2200+, 1,8 GHz (*clock* real) e 512 MB de memória DDR RAM.
- (**): O número médio de iterações é obtido dividindo-se o número total de iterações pelo número de seções de redução. É importante observar que foi adotada uma tolerância de 10^{-5} , em resíduo de tensão (valor absoluto máximo), para encerramento do processo iterativo.

De acordo com os resultados apresentados nas tabelas 7.5 a 7.7, observa-se que os erros relativos em corrente, como também as discrepâncias entre os fluxos de potência

pseudomedidos e os estimados nas saídas para os alimentadores, têm valores elevados. Isso é decorrente das grandes incertezas inerentes aos fluxos de potência pseudomedidos na saída para o alimentador (métodos *A* ou *B*, Cap. 6). Caso essas grandezas fossem medidas, essas discrepâncias, com certeza, seriam bem menores, conforme se verifica nos pontos de instalação das chaves.

Comparando somente os erros relativos médios globais, apresentados nas tabelas 7.1 a 7.3, referentes ao modelo linear, com os correspondentes fornecidos nas tabelas 7.4 a 7.6, pode-se questionar a necessidade do modelo não-linear, no qual o esforço computacional é bem maior. A principal vantagem desse modelo em relação ao linearizado está na determinação das tensões nodais complexas. O que não é possível no modelo linearizado, que adota um perfil plano para as tensões (1 p.u.). Isso, por si só, já justifica o emprego do modelo não-linear. O conhecimento das tensões nodais é fundamental para a operação e estudos de planejamento de sistemas de potência.

O número médio de iterações por seção, praticamente, não se altera com a condição de carregamento do alimentador. Para a condição de carregamento máximo, esse número é de 2,49. Nas outras duas condições, apresentou uma ligeira queda, para 2,39, portanto, 4% inferior. Em todas as seções de redução, o processo iterativo convergiu em duas ou três iterações. O método de ajuste prévio de carga e o cálculo das incertezas (variâncias), nas formas adotadas (ver capítulos 2 e 3), contribuíram, decisivamente, para esse fato.

Enfim, o algoritmo foi testado exaustivamente em diversos sistemas reais (alimentadores longos, curtos, rurais, urbanos, sub e sobrecarregados), tendo sempre apresentado bom desempenho na estimação das grandezas medidas, como também em convergência. Não se observou nenhum problema de convergência.

Capítulo 8

Análise de Desempenho do Estimador de Estado Soma de Potências

8.1 Introdução

Este capítulo estuda o desempenho do estimador soma de potências considerando-se quatro aspectos: influência dos métodos usados para estimar os fluxos de potência na saída da subestação (métodos *A* e *B*); influência do número de pontos de medição e de nós; influência dos fatores de utilização e de potência. Por último, apresenta resultados do programa computacional desenvolvido para o algoritmo do estimador (modelo não-linear), os quais são analisados e comparados com resultados dos outros estimadores abordados neste trabalho.

8.2 Influência dos métodos (*A* e *B*), usados na estimativa dos fluxos de potência na saída para alimentador, sobre o desempenho do estimador soma de potências

Considere-se a estimação de estado do alimentador-teste NEO01N4 em que os fluxos de potência na sua entrada foram estimados pelos métodos *A* e *B*. Os principais resultados estão fornecidos nas tabelas a seguir.

Tabela 8.1- Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando as potências estimadas na saída para alimentador (métodos *A* e *B*)

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		Método A	Método B	Método A	Método B
Perda ativa (kW)	-----	82,2	82,4	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	119,3	119,5	-----	-----
Corrente na saída para o alimentador (A)	162,0	171,5	170,7	5,90	5,40
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	3613,9 ^{MA} 3570,2 ^{MB}	3907,0	3881,2	-----	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	1539,5 ^{MA} 1684,5 ^{MB}	1427,8	1436,2	-----	-----
Corrente na chave (A)	106,0	106,9	107,0	0,90	0,90
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2389,3	2389,3	0,80	0,80
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	858,0	855,8	855,9	-0,26	-0,30
Tensão na chave (kV)	13,7	13,7	13,7	0,00	0,00
Erro relativo médio global				2,69	2,46
Número médio de iterações por seção de redução		2,49	2,49		

Tabela 8.2 - Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga mínima), considerando as potências estimadas na saída para alimentador (métodos *A* e *B*)

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		Método A	Método B	Método A	Método B
Perda ativa (kW)	-----	29,8	29,8	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	43,0	43,0		
Corrente na saída para o alimentador (A)	94,0	100,7	100,2	7,15	6,60
Fluxo de potência ativa na saída para o alimentador (kW)	2111,9 ^{MA} 2088,6 ^{MB}	2307,5	2293,1	-----	-----
Fluxo de potência reativa na saída para o alimentador (kvar)	899,7 ^{MA} 978,4 ^{MB}	852,2	857,1	-----	-----
Corrente na chave (A)	67,0	67,3	67,3	0,50	0,50
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	1418,0	1431,5	1431,4	0,95	1,00
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	638,0	627,4	627,5	-1,66	-1,70
Tensão na chave (kV)	13,4	13,4	13,4	0,00	0,00
Erro relativo médio global				3,32	3,10
Número médio de iterações por seção de redução		2,39	2,39		

(^{MA}): Fluxos de potência pseudomedidos pelo *Método A*

(^{MB}): Fluxos de potência pseudomedidos pelo *Método B*

Observa-se nas tabelas que as correntes estimadas na saída para o alimentador apresentam erros um pouco superiores, quando se emprega o *Método A*. Isso resulta de maior incerteza na estimativa do fator de potência do alimentador. Apesar disso, essas diferenças são irrelevantes. Os demais erros são rigorosamente iguais, qualquer que seja o método usado. Portanto, pode-se empregar qualquer um dos dois métodos, uma vez que não há comprometimento do desempenho global do estimador. Porém, o *Método A* apresenta a vantagem de ser mais fácil de implementar. Além disso, demanda menor esforço computacional, pois não requer a execução do programa de estimação de estado de subestação (Cap. 6).

8.3 Influência do número de pontos de medição e do número de nós do alimentador

Geralmente os alimentadores têm medição *on-line* de corrente e tensão nas suas entradas (saída da subestação). Atualmente, com a automação desses alimentadores através da instalação de chaves e religadores telecomandados, que possuem módulos de telemedição, é possível fazer medição *on-line* dessas grandezas, além de outras, tais como fluxos de potência e tensões nos pontos de instalação desses equipamentos.

O algoritmo do estimador proposto foi testado com alimentadores reais, dotados de números variados de nós de e pontos de medição. A seguir, relacionam-se três alimentadores do sistema COSERN, com essas características, que foram usados como casos-teste.

- Alimentador NTU01J1 (104 nós): Possui três pontos de emedição, sendo um na saída da subestação, e os outros dois em chaves telecomandas (Fig. B.2).
- Alimentador NTU01J3 (66 nós): Possui dois pontos de medição, um na saída da subestação e o outro em uma chave telecomanda (Fig. B.4).
- Alimentador NEO01N6 (58 nós): Possui um único ponto de medição, na saída da subestação (Fig. B.3).

Os principais resultados da estimação desses alimentadores, operando na condição de carga máxima, estão dados nas tabelas a seguir.

Tabela 8.3 - Estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando em carga máxima (alimentador com três pontos de medição em tempo real)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	21,7	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	38,3	-----
Corrente na saída para NTU01J1 (A)	172,0	184,8	7,40
Fluxo de potência ativa na saída para NTU01J1 (kW)	3864,4 ^{MA}	4141,0	-----
Fluxo de potência reativa na saída para NTU01J1 (kvar)	1646,2 ^{MA}	1794,8	-----
Corrente na chave 1 (A)	140,0	139,5	-0,38
Fluxo de potência ativa na chave 1 (kW)	3011,6	3002,5	-0,30
Fluxo de potência reativa na chave1 (kvar)	1283,0	1272,8	-0,79
Tensão na chave 1 (kV)	13,5	13,5	0,00
Corrente na chave 2 (A)	40,0	40,1	0,15
Fluxo de potência ativa na chave 2 (kW)	847,7	850,0	0,27
Fluxo de potência reativa na chave 2 (kvar)	361,0	359,4	-0,44
Tensão na chave 2 (kV)	13,3	13,3	0,00
Erro relativo médio global			2,51
Tempo de execução do programa em p.u.	1,0869*		
Número total de iterações	151		
Número de seções de redução	66		
Número médio de iterações por seção de redução	2,29		

Tabela 8.4 - Estimação de estado do alimentador NTU01J3, operando em carga máxima (alimentador com dois pontos de medição em tempo real)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	112,6	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	227,9	-----
Corrente na saída para NTU01J3 (A)	255,0	255,4	0,17
Fluxo de potência ativa na saída para NTU01J3 (kW)	5769,8 ^{MA}	5830,1	-----
Fluxo de potência reativa na saída para NTU01J3 (kvar)	2457,9 ^{MA}	2340,3	-----
Corrente na chave (A)	163,0	163,4	0,23
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	3480,4	3490,4	0,29
Fluxo de potência reativa na chave (kvar)	1482,6	1481,4	-0,08
Tensão na chave (kV)	13,4	13,4	0,00
Erro relativo médio global			0,18
Tempo de execução do programa em p.u.	1,0217*		
Número total de iterações	125		
Número de seções de redução	49		
Número médio de iterações por seção de redução	2,55		

Tabela 8.5 - Estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando em carga máxima (alimentador com um ponto de medição em tempo real)

Grandezas	Medidas	Estimadas	Erros relat. (%)
Perda ativa (kW)	-----	85,4	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	110,5	-----
Corrente na saída para NEO01N6 (A)	170,0	172,2	1,64
Fluxo de potência ativa na saída para NEO01N6 (kW)	3846,6 ^{MA}	3898,2	-----
Fluxo de potência reativa na saída para NEO01N6 (kvar)	1638,6 ^{MA}	1692,5	-----
Erro relativo médio global			1,64
Tempo de execução do programa em p.u.	0,9565*		
Número total de iterações	115		
Número de seções de redução	42		
Número médio de iterações por seção de redução	2,74		

(*): Conforme se observou no capítulo anterior, os tempos de execução do programa são dados em p.u. tomando como base 46 ms.

Observando nas tabelas o número médio de iterações por seção, é possível detectar que, no caso da estimação de estado dos alimentadores com menos pontos de medição, esse número é um pouco maior, se comparado com aqueles que dispõem de mais pontos. Esse fato foi verificado em outros casos-teste reais. Entretanto, vale salientar que jamais ultrapassou três iterações. Observar-se, também, que os tempos de execução do programa são baixíssimos e muito próximos. O que demonstra o excelente desempenho do algoritmo em termos de velocidade de execução, qualquer que seja o número de nós e de pontos de medição do alimentador.

8.4 Influência dos desvios dos fatores de utilização e de potência sobre as variâncias das pseudomedidas de potências injetadas nos nós

De acordo com as equações de definição das variâncias das pseudomedidas de potências injetadas, equações (4.5) a (4.8), percebe-se que essas variâncias são funções dos desvios dos fatores de utilização (dfu), de potência (dfp). Então, é muito importante explorar o comportamento dessas variâncias com respeito a esses desvios. Com esse objetivo, construíram-se os gráficos mostrados abaixo.

Esses gráficos foram traçados a partir de (4.5) e (4.6) e considerando-se: $S=1$; $f_p=0,92 \pm 0,05$ ($\sigma_{f_p} = 0,05$); $f_u=0,80 \pm 0,40$ ($\sigma_{f_u}=0,40$).

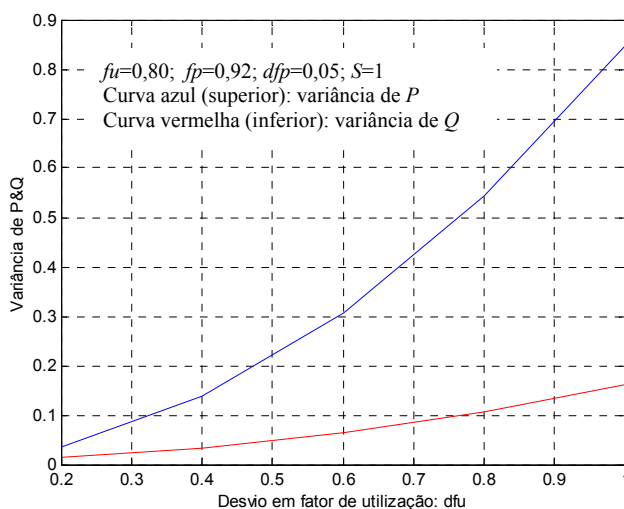


Figura 8.1 – Gráfico de variação de σ_P^2 e σ_Q^2 em função de dfu

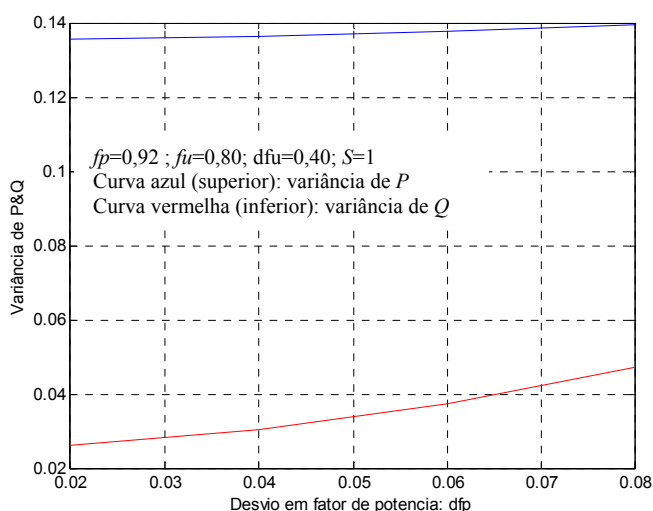


Figura 8.2 – Gráfico de variação de σ_P^2 e σ_Q^2 em função de dfp

No gráfico mostrado na Fig. 8.1, observa-se um forte crescimento de σ_P^2 , quando dfu aumenta, o que não acontece em relação a σ_Q^2 . No caso do gráfico da Fig. 8.2, verifica-

se que σ_p^2 cresce moderadamente, quando dfp aumenta. Porém, σ_Q^2 apresenta um crescimento mais acentuado.

8.5 Influência do desvio em fator de utilização sobre as grandezas estimadas

As tabelas dadas a seguir fornecem resultados da estimação de estado dos alimentadores NE01N4 e NTU01J1, considerando-se dois casos: $kfu=0,4$ e $kfu=1,0$.

Tabela 8.6 - Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (com carga máxima), considerando dois valores para kfu : 1,0 e 0,4

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		$kfu=1,0$	$kfu=0,4$	$kfu=1,0$	$kfu=0,4$
Perda ativa (kW)	-----	75,2	82,4	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	109,4	119,5	-----	-----
Corrente na saída para NEO01N4 (A)	162,0	165,6	170,7	0,80	5,40
Potência ativa na saída para NEO01N4 (kW)	3570,2 ^{MB}	3.7618	3881,2	-----	-----
Potência reativa na saída para NEO01N4 (kvar)	1684,5 ^{MB}	1404,0	1436,2	-----	-----
Corrente na chave (A)	106,0	106,3	107,0	0,30	0,90
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2373,2	2389,3	0,10	0,80
Fluxo de Potência reativa na chave (kvar)	858,0	857,6	855,8	-0,05	-0,30
Tensão na chave (kV)	13,7	13,7	13,7	0,00	0,00
Erro relativo médio global				0,40	2,46
Número médio de iterações por seção de redução		2,31	2,49		

Tabela 8.7 - Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (carga máxima), considerando dois valores para kfu : 1,0 e 0,4

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		$kfu=1,0$	$kfu=0,4$	$kfu=1,0$	$kfu=0,4$
Perda ativa (kW)	-----	21,3	21,7	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	37,4	38,3	-----	-----
Corrente na saída para NTU01J1 (A)	172,0	177,4	184,8	3,14	7,40
Potência ativa na saída para NTU01J1 (kW)	3864,4 ^{MA}	395,3	4141,0	-----	-----
Potência reativa na saída para NTU01J1 (kvar)	1646,2 ^{MA}	1777,3	1794,8	-----	-----
Corrente na chave 1 (A)	140,0	139,9	139,5	-0,08	-0,38
Fluxo de potência ativa na chave 1 (kW)	3011,6	3009,9	3002,5	-0,05	-0,30
Fluxo de potência reativa na chave1 (kvar)	1283,0	1280,5	1272,8	-0,19	-0,79
Tensão na chave 1 (kV)	13,5	13,5	13,5	0,00	0,00
Corrente na chave 2 (A)	40,0	40,0	40,1	0,00	0,15
Fluxo de potência ativa na chave 2 (kW)	847,7	848,1	850,0	0,04	0,27
Fluxo de potência reativa na chave 2 (kvar)	361,0	360,6	359,4	-0,10	-0,44
Tensão na chave 2 (kV)	13,3	13,3	13,3	0,00	0,00
Erro relativo médio global				1,05	2,51
Número médio de iterações por seção de redução		2,11	2,29		

De acordo com o gráfico da Fig. 8.1, a elevação de kfu provoca um forte aumento de σ_p^2 e σ_Q^2 (variâncias das pseudomedidas das potências injetadas nos nós de distribuição), particularmente, da primeira. Isso tem influência direta na estimação das grandezas, pois, no método dos mínimos quadrados ponderados o estado \hat{x} é calculado de forma a minimizar a função objetivo dada em (2.3), onde a utilização da matriz de ponderação, \mathbf{R} , implica em que as medidas de menor variância recebem maior peso do que aquelas que apresentam maiores valores. Em virtude disso, quando σ_p^2 e σ_Q^2 aumentam, os pesos das pseudomedidas correspondentes, passam a exercer menor influência sobre os valores estimados, quando comparados com os pesos das grandezas medidas, que independem de kfu . Em consequência, as grandezas medidas “arrastam” os valores estimados para mais próximos de seus valores reais. Com isso, os erros irão diminuir, conforme se observa nas tabelas 8.6 e 8.7.

Fazendo-se uma análise mais detalhada dos números mostrados nessas tabelas, dois fatos merecem registro:

1. Os aumentos das incertezas em fator de utilização fazem cair todos os erros relativos, ou seja, a diminuição dos erros relativos médios globais é resultante da melhoria geral dos erros das grandezas estimadas, e não somente de uma ou outra.
2. Há uma pequena redução do número médio de iterações por seção, quando há aumento de kfu . Isto se justifica a partir do entendimento de que um incremento em kfu reduz ainda mais a influência dos pesos das pseudomedidas em relação aos pesos das medidas. Portanto, possibilita que o método atinja o ponto de operação de cada seção de redução com menor número de iterações.

Pelas mesmas razões explicadas no primeiro parágrafo desta página, quando kfu diminui os erros das grandezas estimadas em relação aos correspondentes valores pseudomedidos, também diminuem, como se verifica nas tabelas 8.8 a 8.11.

Nessas tabelas são mostrados alguns nós dos alimentadores supervisionados, onde se observam potências e tensões, com seus valores pseudomedidos e estimados, os quais estão identificados com os subscritos *pseu* e *est*, respectivamente. São dados também os erros relativos percentuais, calculados a partir da consideração de que os valores pseudomedidos são verdadeiros. Como os alimentadores estimados têm muitos nós, decidiu-se mostrar os resultados para, apenas, alguns deles. Para os demais são dados no Apêndice A. As amostras são bem representativas, pois foram colhidas no início, no meio e no fim de cada alimentador. Para os nós de passagem as potências ativa e reativa assumem valores zero.

Tabela 8.8 – Potências e tensões nodais estimadas para o NEO01N4 (com carga máxima); $k_{fu}=1,0$

Nó	P_{pseu} (kW)	P_{est} (kW)	$erro_P$ (%)	Q_{pseu} (kvar)	Q_{est} (kvar)	$erro_Q$ (%)	V_{est} (kV)
2	43,7496	41,0325	6,2106	18,6373	18,9391	-1,6193	13,8991
3	87,4993	77,764	11,1261	37,2745	37,5549	-0,7523	13,8776
4	131,2489	111,5422	15,0148	55,9118	56,0006	-0,1588	13,8717
5	65,6244	61,1934	6,7521	27,9559	27,9487	0,0258	13,8545
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	121,0215	107,8073	10,9189	30,3308	30,7003	-1,2182	13,5561
35	82,9221	76,7283	7,4694	0	0	0	13,5557
36	28,2875	27,5657	2,5517	12,0504	12,1125	-0,5153	13,5555
37	118,7803	106,0916	10,6825	39,0412	39,6421	-1,5391	13,5552
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
63	142,6676	124,3655	12,8285	41,6114	42,879	-3,0463	13,6503
64	266,0532	202,4477	23,9071	54,0244	55,9219	-3,5123	13,6369
65	17,2322	16,9639	1,5570	3,4991	3,5083	-0,2629	13,6592
66	28,2875	27,5657	2,5517	12,0504	12,1665	-0,9635	13,6561

Tabela 8.9 – Potências e tensões nodais estimativas NEO01N4 (com carga máxima); $k_{fu}=0,4$

Nó	P_{pseu} (kW)	P_{est} (kW)	$erro_P$ (%)	Q_{pseu} (kvar)	Q_{est} (kvar)	$erro_Q$ (%)	V_{est} (kV)
2	43,7496	41,9731	4,0606	18,6373	18,7151	-0,4174	13,8990
3	87,4993	83,6115	4,4432	37,2745	37,2887	-0,0381	13,8769
4	131,2489	126,5223	3,6012	55,9118	55,8872	0,0440	13,8706
5	65,6244	64,989	0,9682	27,9559	27,9509	0,0179	13,8522
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
34	121,0215	111,6249	7,7644	30,3308	30,4768	-0,4814	13,5533
35	82,9221	78,5585	5,2623	0	0	0	13,5529
36	28,2875	27,7759	1,8086	12,0504	12,0833	-0,2730	13,5527
37	118,7803	109,9399	7,4426	39,0412	39,2694	-0,5845	13,5524
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
63	142,6676	127,969	10,3027	41,6114	42,5357	-2,2213	13,6498
64	266,0532	217,1306	18,3883	54,0244	55,2656	-2,2975	13,6360
65	17,2322	17,012	1,2778	3,4991	3,5062	-0,2029	13,6589
66	28,2875	27,7024	2,0684	12,0504	12,1695	-0,9883	13,6558

Tabela 8.10 – Potências e tensões nodais estimativas NTU01J1 (com carga máxima); $kfu = 1,0$

Nó	P_{pseu} (kW)	P_{est} (kW)	$erro_P$ (%)	Q_{pseu} (kvar)	Q_{est} (kvar)	$erro_Q$ (%)	V_{est} (kV)
7	67,6432	68,8257	-1,7481	28,8159	30,6782	-6,4628	13,4778
8	49,3109	49,8998	-1,1943	34,4192	36,7055	-6,6425	13,4654
9	0	0	0	0	0	0	13,4504
10	67,6432	68,7013	-1,5642	28,8159	30,4357	-5,6212	13,4460
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
75	147,854	129,2812	12,5617	21,068	23,0192	-9,2614	13,2936
76	55,9827	53,3205	4,7554	14,0306	14,8959	-6,1672	13,2925
77	27,4539	26,8182	2,3155	0	0	0	13,2936
78	34,2346	33,2493	2,8781	14,5839	15,5662	-6,7355	13,2915
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
101	87,0476	80,3826	7.6567	37,0821	37,0012	0,2182	14,0496
102	52,9855	52,9843	0.0023	10,7592	10,759	0,0019	14,0634
103	40,5859	40,9363	-0.8634	17,2895	17,8477	-3,2285	13,4187
104	57,0577	54,2651	4.8943	24,3065	27,1278	-11,6072	13,2985

Tabela 8.11 – Potências e tensões nodais estimativas NTU01J1 (com carga máxima); $kfu = 0,4$

Nó	P_{pseu} (kW)	P_{est} (kW)	$erro_P$ (%)	Q_{pseu} (kvar)	Q_{est} (kvar)	$erro_Q$ (%)	V_{est} (kV)
7	67,6432	68,4666	-1,2173	28,8159	30,2664	-5,0337	13,4783
8	49,3109	49,6676	-0,7234	34,4192	35,6	-3,4306	13,466
9	0	0	0	0	0	0	13,4512
10	67,6432	68,1704	-0,7794	28,8159	29,8126	-3,4589	13,4469
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
75	147,854	131,1051	11,3280	21,068	22,3941	-6,2944	13,2936
76	55,9827	53,5818	4,2886	14,0306	14,6187	-4,1916	13,2925
77	27,4539	26,9033	2,0055	0	0	0	13,2936
78	34,2346	33,4083	2,4136	14,5839	15,4391	-5,8640	13,2916
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
101	87,0476	86,4601	0,6749	37,0821	37,0363	0,1235	14,0485
102	52,9855	52,9838	0,0032	10,7592	10,7591	0,0009	14,0628
103	40,5859	40,7281	-0,3504	17,2895	17,6005	-1,7988	13,4200
104	57,0577	54,4343	4,5978	24,3065	27,015	-11,1431	13,2985

8.6 Influência dos desvios em fator de potência sobre as grandezas estimadas

Nesta seção será feita uma análise semelhante à da seção anterior, porém, considerar-se-á variações nos desvios do fator de potência: $kfp=0,08$ e $kfp=0,05$.

Os principais resultados do estudo estão mostrados nas tabelas a seguir, onde se observa que as variações em kfp exercem pouca, ou nenhuma, influência sobre os valores estimados das grandezas medidas.

A explicação para esse comportamento está no gráfico da Fig. 8.2, o qual mostra que o aumento de kfp , passando 0,05 para 0,08, por exemplo, dar origem a pequenos acréscimos em σ_p^2 e σ_Q^2 . Portanto, terão pequena influência sobre os valores estimados, pois, os pesos, inerentes ao método dos mínimos quadrados ponderados, praticamente, não sofrerão alterações.

Tabela 8.12 - Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (carga máxima), considerando dos valores para kfp : 0,08 e 0,05

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		$kfp=0,08$	$kfp=0,05$	$kfp=0,08$	$kfp=0,05$
Perda ativa (kW)	-----	82,4	82,4	-----	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	119,5	119,5	-----	-----
Corrente na saída para NEO01N4 (A)	162,0	170,6	170,6	5,40	5,40
Potência ativa na saída para NEO01N4 (kW)	3570,2 ^{MB}	3888,2	3881,2	-----	-----
Potência reativa na saída para NEO01N4 (kvar)	1648,5 ^{MB}	1439,3	1436,2	-----	-----
Corrente na chave (A)	106,0	107,0	107,0	0,90	0,90
Fluxo de potência ativa na chave (kW)	2370,0	2.389,3	2389,3	0,80	0,80
Fluxo de Potência reativa na chave (kvar)	858,0	856,0	855,8	-0,20	-0,30
Tensão na chave (kV)	13,7	13,7	13,7	0,00	0,00
Erro relativo médio global				2,45	2,46
Número médio de iterações por seção de redução			2,49	2,49	

Tabela 8.13 - Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (carga máxima), considerando dos valores para kfp : 0,08 e 0,05

Grandezas	Medidas	Estimadas		Erros relat. (%)	
		$kfp=0,08$	$kfp=0,05$	$kfp=0,08$	$kfp=0,05$
Perda ativa (kW)	-----	21,7	21,7	-----	-----
Balanço de reativos (kvar)	-----	38,4	38,3	-----	-----
Corrente na saída para NTU01J1 (A)	172,0	184,7	184,7	7,40	7,40
Potência ativa na saída para NTU01J1 (kW)	3864,4 ^{MA}	4138,6	4141,0	-----	-----
Potência reativa na saída para NTU01J1 (kvar)	1646,2 ^{MA}	1791,6	1794,8	-----	-----
Corrente na chave 1 (A)	140,0	139,5	139,6	-0,30	-0,38
Fluxo de potência ativa na chave 1 (kW)	3011,6	3002,5	3002,5	-0,30	-0,30
Fluxo de potência reativa na chave1 (kvar)	1283,0	1275,5	1272,8	-0,60	-0,79
Tensão na chave 1 (kV)	13,5	13,5	13,5	0,00	0,00
Corrente na chave 2 (A)	40,0	40,1	40,1	0,15	0,15
Fluxo de potência ativa na chave 2 (kW)	847,7	850,0	850,0	0,27	0,27
Fluxo de potência reativa na chave 2 (kvar)	361,0	359,9	359,4	-0,30	-0,44
Tensão na chave 2 (kV)	13,3	13,3	13,3	0,00	0,00
Erro relativo médio global				2,47	2,51
Número médio de iterações por seção de redução			2,23	2,29	

8.7 Estudo comparativo entre os estimadores de estado de corrente proporcional, radicional (Schweppe) e soma de potências

As tabelas a seguir apresentam resultados dos estudos de estimação de estado dos alimentadores indicados, realizados pelos algoritmos dos estimadores tradicional (*TD*), de corrente proporcional (*CP*) e soma de potências (*SP*). Os dados fixos de entrada dos programas encontram-se registrados nos apêndices *A* e *B*.

Tabela 8.14 - Estimação de estado do alimentador NEO01N6 (carga máxima), considerando os estimadores *CP*, *TD* e *SP*

Grandezas	Medidas	Estimadas			Erros Relat. %		
		<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>	<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>
Perda ativa (kW)	-----	80,9	80,4	85,4	-----	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	105,7	105,0	110,5	-----	-----	-----
Corrente na saída para NEO01N4 (A)	170,0	170,0	170,1	172,6	0,00	0,06	1,56
Potência ativa na saída para NEO01N4 (kW)	3836,7 ^{MA}	3820,0	3671,2	3894,0	-----	-----	-----
Potência reativa na saída para NEO01N4 (kvar)	1661,6 ^{MA}	1669,3	1747,7	1693,6	-----	-----	-----
Erro relativo médio global					0,00	0,06	1,56

Tabela 8.15 - Estimação de estado do alimentador NEO01N4 (carga máxima), considerando os estimadores *CP*, *TD* e *SP*

Grandezas	Medidas	Estimadas			Erros relat. %		
		<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>	<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>
Perda ativa (kW)	-----	66,7	71,7	75,2	-----	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	97,8	104,5	109,4	-----	-----	-----
Corrente na saída para NEO01N4 (A)	162,0	162,0	162,3	165,6	0,00	0,19	0,80
Potência ativa na saída para NEO01N4 (kW)	3695,8 ^{MA}	3715,7	3595,9	3761,8	-----	-----	-----
Potência reativa na saída para NEO01N4 (kvar)	1331,0 ^{MA}	1274,7	1450,4	1404,0	-----	-----	-----
Corrente na chave (A)	106,0	100,3	106,5	106,3	5,37	0,50	0,30
Potência ativa na chave (kW)	2370,0	2268,6	2320,8	2373,2	4,28	-2,07	0,10
Potência reativa na chave (kvar)	858,0	686,1	855,9	857,6	20,03	-0,24	-0,05
Tensão na chave (kV)	13,7	13,6	13,4	13,7	0,42	-2,15	0,00
Erro relativo médio global					9,47	-1,36	-0,40

Tabela 8.16 – Estimação de estado do alimentador NTU01J1 (carga máxima), considerando os estimadores *CP*, *TD* e *SP*

Grandezas	Medidas	Estimadas			Erros relat. %		
		<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>	<i>CP</i>	<i>TD</i>	<i>SP</i>
Perda ativa (kW)	-----	16,7	20,3	21,3	-----	-----	-----
Balanco de reativos (kvar)	-----	30,4	35,4	37,4	-----	-----	-----
Corrente na saída para NTU01J1 (A)	172,0	172,0	172,5	177,4	0,00	0,30	3,14
Potência ativa na saída para NTU01J1 (kW)	3864,4 ^{MA}	3874,8	3735,8	395,3	-----	-----	-----
Potência reativa na saída para NTU01J1 (kvar)	1646,2 ^{MA}	1622,0	1745,5	1777,3	-----	-----	-----
Corrente na chave 1 (A)	140,0	113,0	139,0	139,9	-19,30	-0,70	-0,08
Potência ativa na chave 1 (kW)	3011,6	2550,1	3051,6	3009,9	-15,30	1,30	-0,05
Potência reativa na chave1 (kvar)	1283,0	1028,6	1284,8	1280,5	-19,80	0,10	-0,19
Tensão na chave 1 (kV)	13,5	14,1	13,7	13,5	4,10	1,80	0,00
Corrente na chave 2 (A)	40,0	38,4	39,7	40,0	-3,90	-0,70	0,00
Potência ativa na chave 2 (kW)	847,7	878,7	869,0	848,1	3,70	2,50	0,04
Potência reativa na chave 2 (kvar)	361,0	310,6	362,2	360,6	-14,0	0,30	-0,10
Tensão na chave 2 (kV)	13,3	14,0	13,7	13,3	5,30	2,90	0,00
Erro relativo médio global					11,87	1,53	1,05

A grande dificuldade de aplicação de um método de estimação de estado, em uma rede de distribuição, é a pouca quantidade de medidas em tempo real. Então, o algoritmo do estimador de estado de corrente proporcional, que usa como dado de entrada em tempo real, apenas a corrente medida na saída da subestação, desprezando as demais, é um contra-senso. Este fato leva a grandes incertezas nas grandezas estimadas, representando, portanto, uma desvantagem significativa, quando comparado com outros métodos que empregam o maior número de medidas possível. Isso pode ser comprovado quando se comparam os resultados fornecidos nas tabelas.

Essa desvantagem tende a se acentuar à medida que, cada vez mais, são instalados novos equipamentos de proteção e manobra, que dispõem de módulos de telemedição.

Com respeito às perdas técnicas estimadas, os algoritmos apresentaram valores bem próximos. Os resultados do estimador soma de potências são um pouco maiores do que os dos demais métodos, tanto em perdas ativas como em reativas. Isso se deve, em parte, às amplitudes das correntes estimadas nas saídas para os alimentadores, que são maiores quando estimadas por esse algoritmo.

Enfim, de acordo com os resultados mostrados, pode-se afirmar que o algoritmo soma de potências estimou valores com erros globais significativamente menores, quando comparados com os erros, também globais, dos demais algoritmos. Isso aconteceu em todos os alimentadores estudados, com exceção daquele com medição somente na saída da subestação. Vale salientar que essas constatações foram observadas também em outros casos reais estudados, cujos resultados não estão apresentados neste trabalho.

Capítulo 9

Aplicação do Estimador de Estado Soma de Potências

9.1 Introdução

O programa computacional que implementa o algoritmo do estimador de estado soma de potências está sendo executado em tempo real no sistema de distribuição da COSERN para calcular perdas técnicas (MEDEIROS JR.; ALMEIDA, 2003). O algoritmo baseia-se no modelo de medição que envolve medições em tempo real no barramento de média tensão da subestação, nas saídas dos alimentadores, nos pontos que têm chave ou religador telecomandado, dotados de módulos de telemedição, e pseudomedições de injeções de potências, admitidas em cada nó dos alimentadores supervisionados.

As medições são adquiridas junto ao sistema supervisório da COSERN (PONTES; XAVIER, 2001), através do *software* de gerenciamento SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia), o qual possibilita obter e tratar uma base de dados em tempo real com alto desempenho. Essas informações são disponibilizadas em arquivos de dados (ASCII), em intervalos de tempo de 5 minutos, e podem ser acessadas através de FTP (*File Transfer Protocol*). Isto é feito por meio de um *software* de interligação, denominado interligador, que além de realizar o FTP, tem a função de organizar e disponibilizar os dados medidos em tempo real para o algoritmo do estimador de estado proposto no trabalho (MEDEIROS JR.; ALMEIDA; et al., 2002). Os dados de saída do programa são apresentados em uma interface gráfica bastante amigável e funcional. Este capítulo tem por objetivo descrever as características e a operação interligada desses programas. No final apresenta telas de saída, produzidas pelo programa de interface gráfica.

9.2 Implementação prática do estimador para cálculo de perdas técnicas em alimentador

O aplicativo desenvolvido para estimação de perdas técnicas em tempo real em alimentadores do sistema COSERN está dividido em três programas: estimador de estado; interligador; interface gráfica. Esta seção trata dos dois primeiros.

1. O algoritmo do estimador de estado soma de potências, discutido no Cap. 7, foi implementado em linguagem C++ (SCHILDT, 1996) para plataforma LINUX;
2. O interligador, desenvolvido em linguagem PERL (DEITEL et al., 2002) para LINUX, é um programa que realiza as seguintes funções:
 - Interligação do estimador com o sistema SAGE;

- Gerenciamento de sincronismo de tempo da máquina servidora (SAGE) com a máquina que executa o estimador;
- Obtenção dos valores das grandezas medidas em tempo real (tensões, correntes e potências), através de um arquivo de códigos dos pontos de medição *on-line*;
- Identificação dos alimentadores supervisionados.

Nos quadros 1 e 2 dados a seguir, estão resumidas as principais etapas realizadas pelos programas de interligação e de estimação de estado.

Quadro 1 – Principais etapas realizadas pelo programa de interligação

1. Sincronizar o relógio da máquina que roda o INTERLIGADOR com o relógio da máquina que contém o arquivo das telemedições do sistema COSERN/SAGE (Fig. 9.1).
2. Realizar FTP e buscar esse arquivo a cada 5 minutos (Fig. 9.2).
3. Acessar o banco de dados dos códigos dos pontos de medição em tempo real do(s) alimentador(es) a serem supervisionado(s) (Fig. 9.2).
4. Comparar os códigos da etapa anterior com os códigos do arquivo do SAGE e buscar os seus respectivos valores telemedidos (Fig. 9.2).
5. Gerar arquivos com os valores telemedidos nos pontos de medição de cada alimentador supervisionado (Fig. 9.2).
6. Requisitar o *software* de estimação para cada alimentador supervisionado e passar, através de linha de comando, os arquivos que este irá precisar para ser executado (Fig. 9.3).

Quadro 2 – Principais etapas realizadas pelo *software* de estimação

1. Obter os nomes dos arquivos (fixo e atualizável), através de linha de comando, que necessita para realizar a estimação de estado. Realizar a estimação do alimentador supervisionado (Fig. 9.3).
2. Escrever os resultados da estimação de cada alimentador supervisionado em um arquivo diário (banco de dados), e em outros dois arquivos. Um para gerar os valores de tabelas e outro referente aos valores a serem impressos no gráfico (Fig. 9.4).

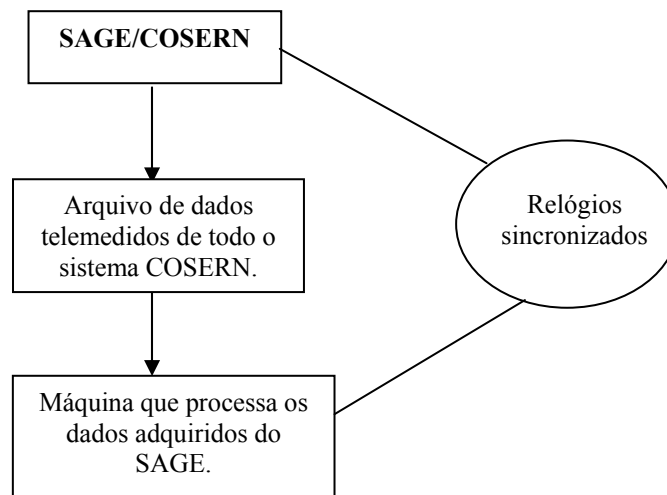


Figura 9.1 - Diagrama de blocos do processo de interligação do estimador ao SAGE

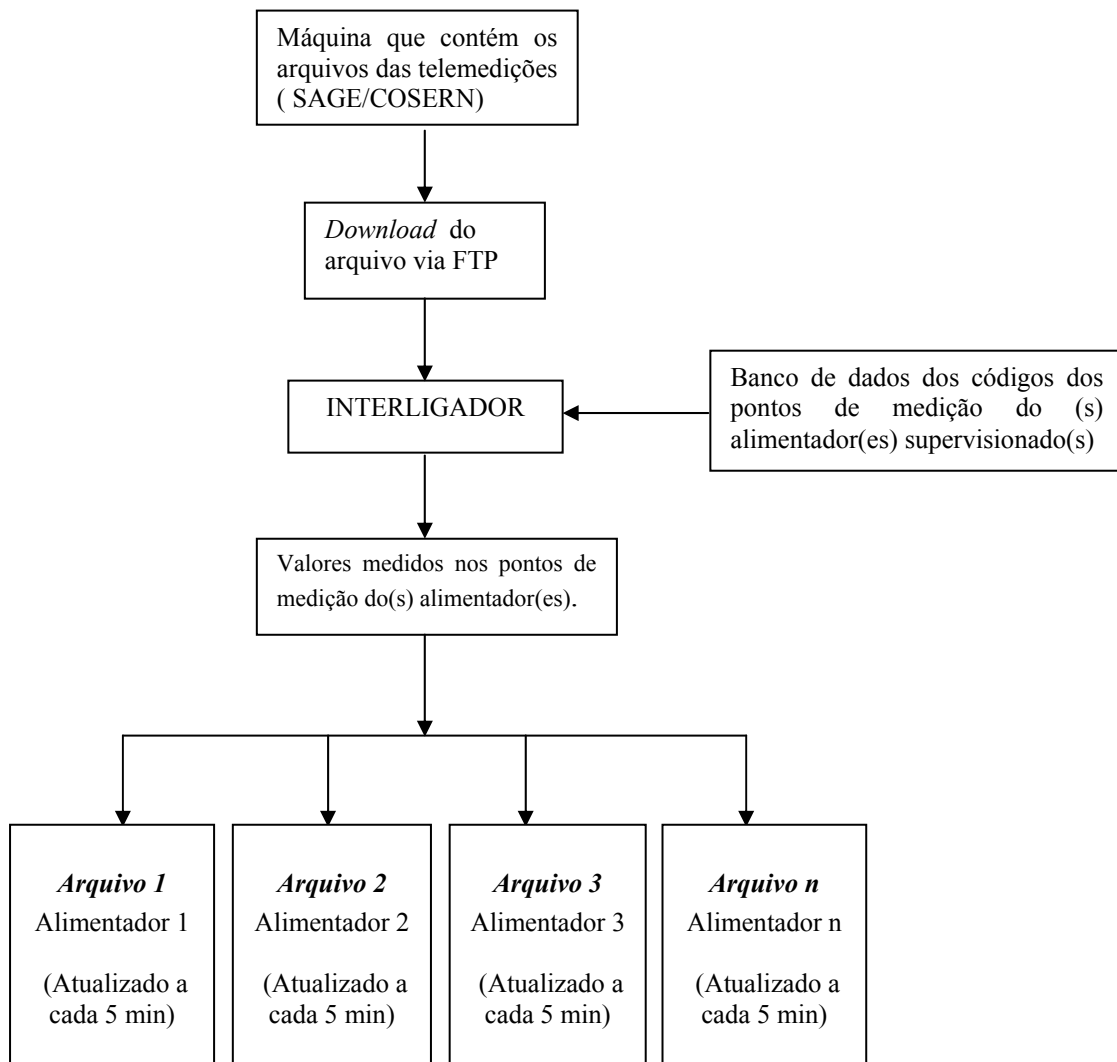


Figura 9.2 - Diagrama de blocos das etapas de processamento do interligador

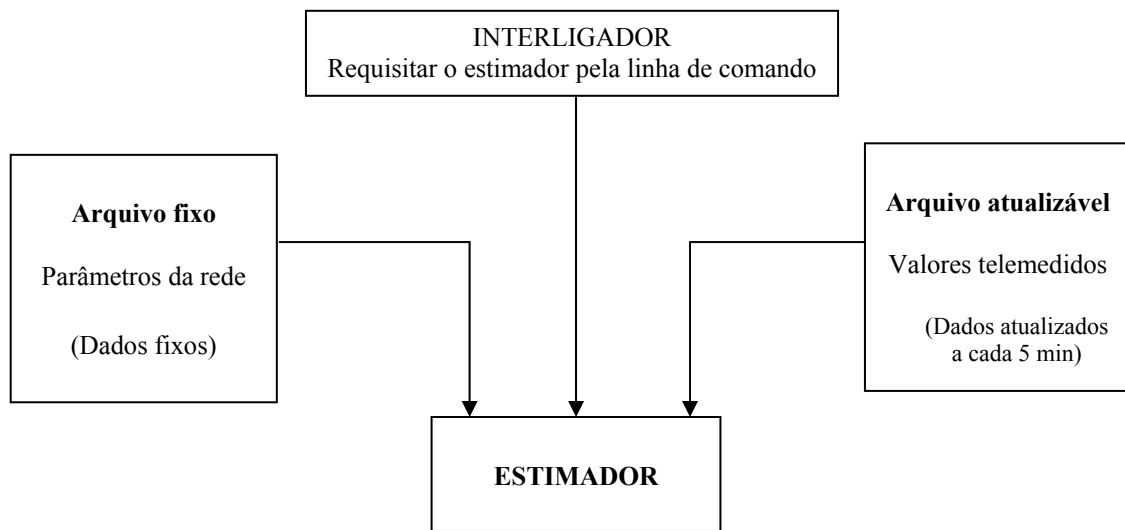


Figura 9.3 - Diagrama de blocos da interação do estimador com o interligador

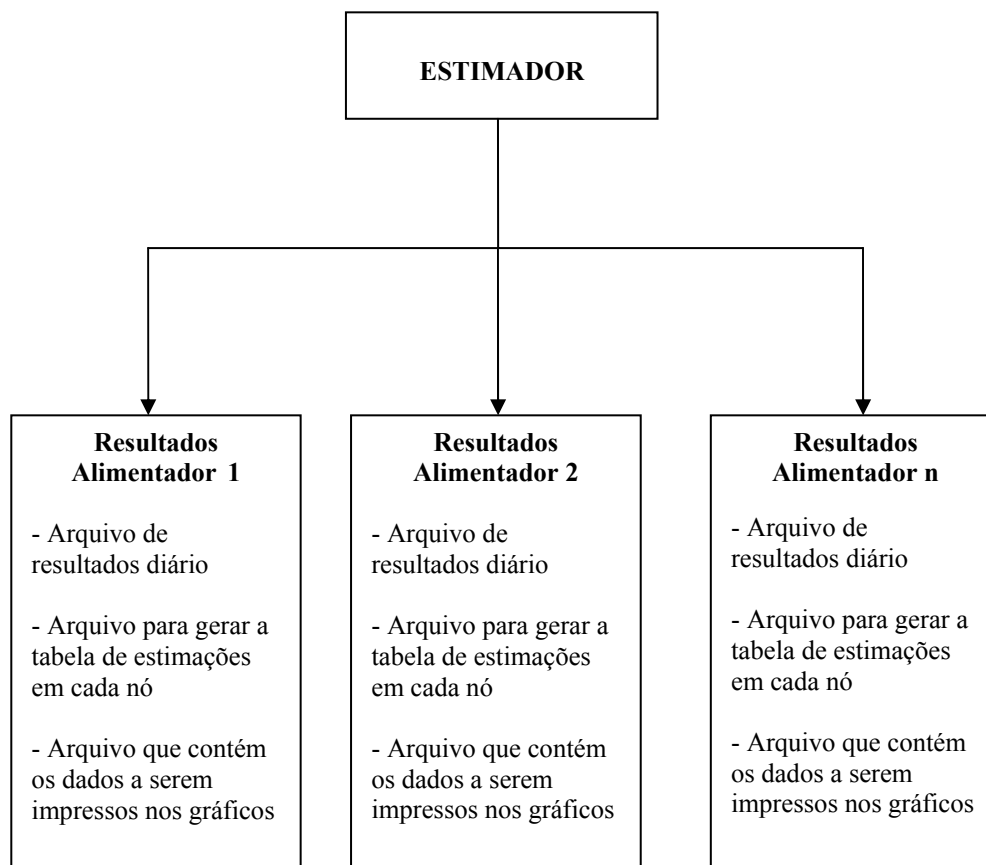


Figura 9.4 - Diagrama de blocos das saídas do estimador

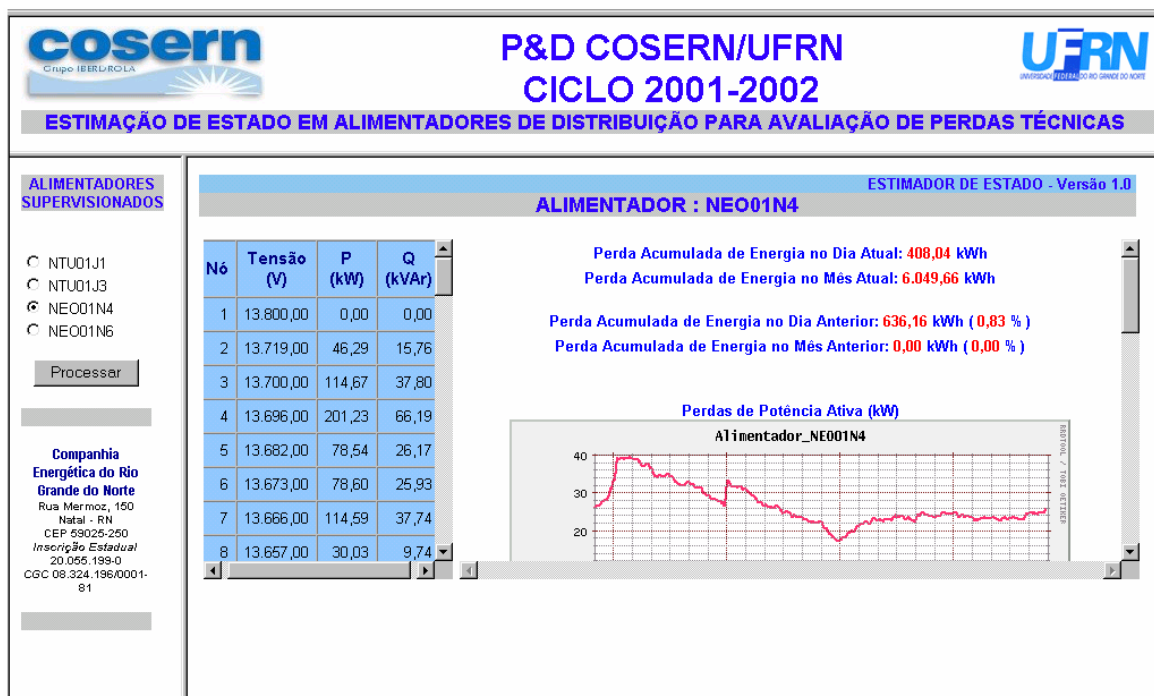


Figura 9.5 – Módulo gráfico de apresentação de resultados do programa de estimação (tela principal)

9.3 Interface gráfica

Os resultados da estimação de estado dos alimentadores são apresentados em um sistema com uma interface gráfica bastante amigável, cujo *software* foi desenvolvido em linguagem PHP/HTML. É um sistema gráfico versátil e de alta portabilidade, pois permite ser visualizado em qualquer terminal integrado à rede da máquina que roda o programa do estimador e que disponha de um navegador WEB. Um exemplo de tela de resultados da estimação pode ser visto na Fig. 9.5 (tela principal).

No lado esquerdo da tela está a relação de alimentadores que está sendo supervisionado. Dentro dessa relação escolhe-se aquele que se deseja observar. Tendo em vista que a estimação é realizada a cada 5 minutos, alguns resultados mostrados são atualizados também a cada 5 minutos. Por exemplo, as curvas de perdas ativa, de fator de potência e a tabela de estimação de tensões nodais e potências injetadas nos nós.

Essa tela pode ser dividida em três partes principais: tabela, curvas e campos de informação de perdas de energia. Considerando a necessidade de melhor detalhamento de cada parte, a seguir comenta-se cada uma.

- I. **Tabela** – Fornece os valores estimados para tensões nodais e potências ativas e reativas injetadas nos nós (Tabela 9.1):

Tabela 9.1 – Tensões e potências ativa e reativa estimadas por nó

Nó	Tensão (V)	P (kW)	Q (kVAr)
1	13.800,00	0,00	0,00
2	13.719,00	46,29	15,76
3	13.700,00	114,67	37,80
4	13.696,00	201,23	66,19
5	13.682,00	78,54	26,17
6	13.673,00	78,60	25,93
7	13.666,00	114,59	37,74
8	13.657,00	30,03	9,74

II. **Curvas** – São quatro tipos de curvas, construídas em janelas de 24 horas, em linguagem RRDTool:

- Perda em potência ativa estimada (Fig. 9.6);
- Perda percentual de potência ativa (Fig 9.7);
- Corrente medida na saída para o alimentador (Fig. 9.8);
- Fator de potência estimado (Fig. 9.9).

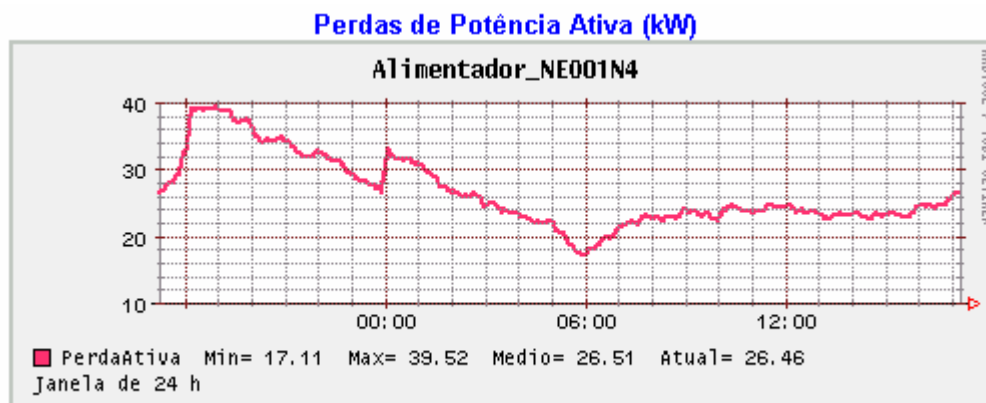


Figura 9.6 – Perdas estimadas em potência ativa

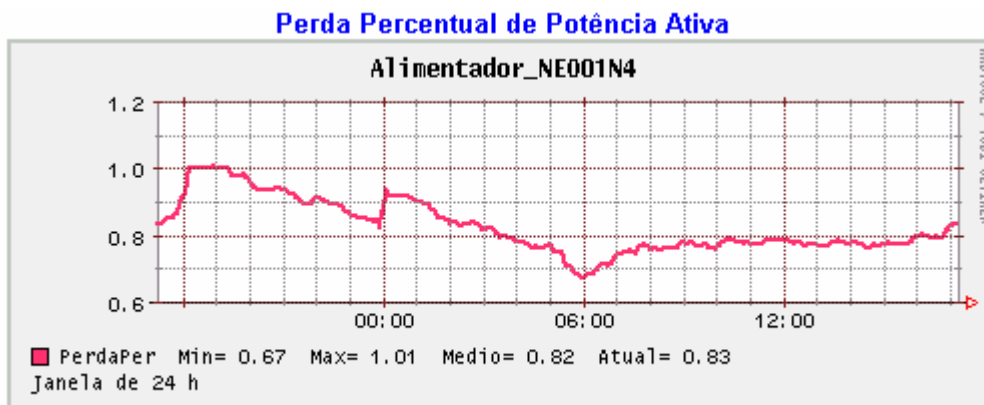


Figura 9.7 – Perdas estimadas percentuais em potência ativa

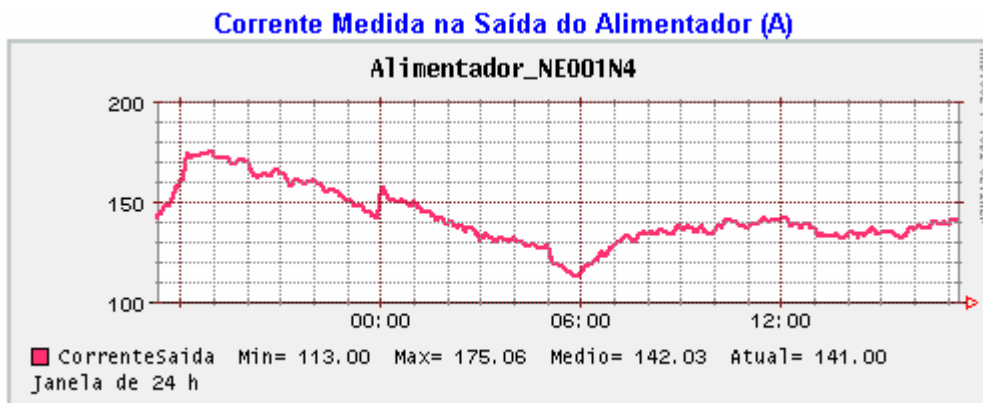


Figura 9.8 – Corrente medida na saída para o alimentador

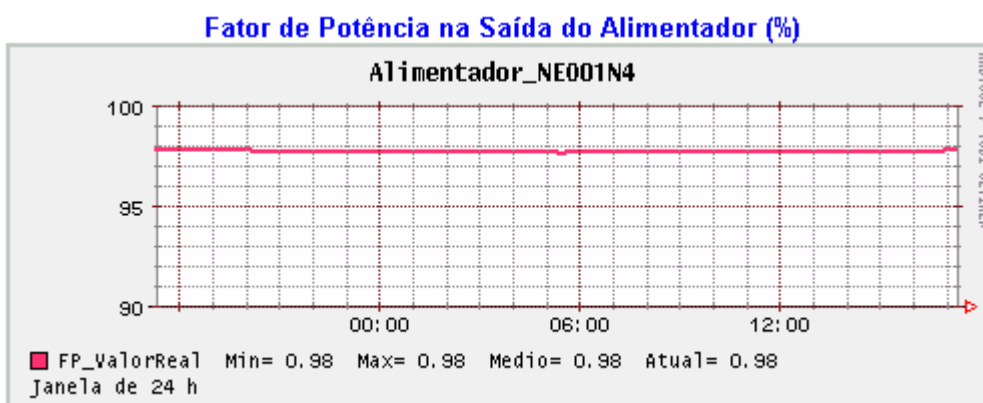


Figura 9.9 – Fator de potência estimado na saída para o alimentador

III. **Perda de energia** – A Fig. 9.10 mostra os campos de informações referentes às perdas de energia diária e mensal no alimentador supervisionado:

Perda Acumulada de Energia no Dia Atual: 416,90 kWh
Perda Acumulada de Energia no Mês Atual: 6.058,52 kWh

Perda Acumulada de Energia no Dia Anterior: 636,16 kWh (0,83 %)
Perda Acumulada de Energia no Mês Anterior: 0,00 kWh (0,00 %)

Figura 9.10 - Perdas de energia estimadas diária e mensal

9.4 Tempos de execução dos aplicativos

Considerando uma única janela de medição, o *software* do estimador de estado levou um tempo de 5,2174 p.u. (na base de 46 ms, definida na Seção 7.3.3) para supervisionar quatro alimentadores (NEO01N4, NEO01N6, NTU01J1 e NTU01J3). Além disso, o *software* de interligação necessitou de um tempo 217,3913 p.u. (na mesma base) para realizar FTP e preparar os dados telemedidos, requeridos pelo *software* do estimador. Somando-se esses dois tempos, resulta em um tempo total de 222,6087 p.u., gasto pelos aplicativos para supervisionar os referidos alimentadores.

Capítulo 10

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

10.1 Conclusões gerais

O levantamento do estado da arte na área de estimação de estado de redes distribuição de energia elétrica, mais especificamente, de alimentadores primários, mostrou a existência de poucos trabalhos. Esses trabalhos chamam atenção para a dificuldade de se aplicar essa eficiente ferramenta, auxiliar dos modernos sistemas supervisórios, em sistemas de distribuição, tendo em vista a quantidade reduzida de medidas. Sem dúvida nenhuma, esse fato constitui um grande entrave, principalmente, quando se deseja que o estimador, além de determinar os estados do sistema, que é seu objetivo principal, seja capaz de processar medidas com erros grosseiros, detectando suas presenças, identificando-as e eliminando seus efeitos no processo de estimação.

De acordo Monticelli (1999), a identificação de medidas com erros grosseiros é feita através de técnicas que usam os resíduos ponderados e/ou normalizados das grandezas medidas ($z_i - \hat{z}_i$). O emprego dessas técnicas torna-se impossível quando não há medidas redundantes no conjunto de medição, como acontece comumente na estimação de estado de sistemas de distribuição. Portanto, no caso dos estimadores apresentados neste trabalho, que se baseiam em pseudomedidas, não é possível aplicar essas técnicas. Além disso, é preciso que haja medidas redundantes em quantidade suficiente e em pontos estratégicos da rede elétrica, o que atualmente não é a realidade dos sistemas de distribuição.

A maioria dos trabalhos que trata desse tema adota simplificações e considerações, discutidas no capítulo introdutório, que fogem da realidade ou das especificidades de um sistema de distribuição. Em consequência, propôs-se um modelo de estimador de estado específico para alimentadores primários, o qual envolve medidas em tempo real e, principalmente, pseudomedidas de injeções de potências, que são construídas a partir de definições de fatores de utilização e de potência, típicos para sistemas de distribuição. O algoritmo do estimador proposto baseia-se no modelo de redução de usado pelo fluxo de carga soma de potências. Estima o alimentador por seção de redução, “varrendo-o” da subestação para os ramais. Constrói o modelo de medição para cada seção e estima-a através do método dos mínimos quadrados ponderados, via equação normal de Gauss.

Devido à reduzida quantidade de medidas disponíveis nos sistemas de distribuição, há necessidade de se construir um grande número de pseudomedidas de injeções de potências. Se não houver um critério razoável na determinação dessas pseudomedidas, pode haver comprometimento do desempenho dos algoritmos de estimação de estado, aplicados a esses sistemas. Principalmente, no que tange a problemas de convergência dos processos iterativos dos algoritmos e de erros elevados nas grandezas estimadas. Esses problemas agravam-se quando a estimação está sendo realizada em tempo real.

O algoritmo de ajuste prévio de carga contribui decisivamente para superar esses problemas, pois, na construção das referidas pseudomedidas, emprega fatores de utilização, calculados em tempo real, a partir de valores de tensão e corrente medidos em cada intervalo de medição (janela de medição).

O método de cálculo de variâncias, baseado na teoria de propagação de incertezas, aplicado às grandezas pseudomedidas, também contribui para resolver esses problemas.

A fim de testar a eficiência desses procedimentos, executaram-se os programas dos estimadores tradicional (Schweppe) e soma de potências com vários tipos de alimentadores (rurais, urbanos, mistos, curtos e longos), submetidos a diversas condições de carga. Desde a condição em vazio até três vezes o valor de carga máxima. Em nenhuma dessas situações houve problema de convergência e os erros se apresentaram dentro dos valores esperados.

O algoritmo do estimador de estado soma de potências requer medição de fluxos de potência na saída para o alimentador. Como geralmente não há medição desses fluxos, então, lançou-se mão de pseudomedição. Para isso empregou-se de dois métodos: (1) *Método A*, que utiliza tensões e correntes medidas na saída para o alimentador em conjunto com uma estimativa inicial de fator de potência; (2) *Método B*, emprega o estimador de estado de subestação, desenvolvido com esse objetivo. Em ambos os casos o desempenho do estimador foi praticamente o mesmo.

Além do programa computacional que implementa o algoritmo do estimador soma de potências (modelos linear e não-linear), desenvolveram-se também programas para os algoritmos dos estimadores tradicional (Schweppe) e de corrente proporcional. Esses programas foram implementados e testados com casos reais (alimentadores do sistema COSERN). A análise e comparação dos resultados demonstraram um melhor desempenho do estimador soma de potências em relação aos demais, principalmente, no que tange à rapidez de convergência e aos erros globais das grandezas estimadas.

No estudo de impacto das incertezas dos fatores de utilização e de potência (desvios) sobre os erros das grandezas estimadas, é importante destacar os seguintes pontos:

- 1) Os erros apresentaram-se extremamente sensíveis aos desvios em fator de utilização. Isso acontece porque eles exercem grande influência na construção das pseudomedidas das potências injetadas. Então, ao se incrementar as incertezas sobre os fatores de utilização há uma propagação para as pseudomedidas, resultando em variâncias maiores, que levam as pseudomedidas ter pesos menores sobre os valores das grandezas estimadas. De maneira oposta, as variâncias dos erros das grandezas medidas, que são relativamente pequenas, exercem pesos muito maiores sobre os valores estimados, “arrastando-os” para próximo dos seus valores reais. Esta análise fundamenta-se na essência do método dos mínimos quadrados ponderados, isto é, as grandezas do conjunto de medição que apresentam maiores variâncias exercem menores pesos nos resultados finais da estimação de estado.

- 2) Ao contrário do caso anterior, os erros praticamente não sofrem influência dos incrementos dos desvios em fator de potência. A explicação para isso se dá pelo fato dos desvios em fator de potência serem inerentemente pequenos, portanto, exercem pouca influência sobre as variâncias das pseudomedidas e, conseqüentemente, sobre seus pesos.

O programa computacional que implementa o algoritmo do estimador soma de potências (modelo não-linear) foi desenvolvido em linguagem C++, para plataforma LINUX. Atualmente, está sendo executado em tempo real no sistema COSERN. Supervisiona as perdas técnicas de quatro alimentadores: NEO01N4, NEO01N6, NTU01J1 e NTU01J3.

Considerando uma única janela de medição, o tempo de execução requerido pelos aplicativos (*softwares* do interligador e do estimador de estado) para supervisionar esses quatro alimentadores, foi de 222,6087 p.u (base 46 ms). Desse tempo, 5,2174 p.u correspondem à execução do *software* do estimador propriamente dito. O restante foi gasto pelo *software* do interligador.

O conjunto de dados de entrada do referido programa é constituído por dados fixos e dados medidos em tempo real. Basicamente, os dados fixos são: topologia e parâmetros elétricos do alimentador, classes de exatidão dos instrumentos de medição e fatores de utilização e de potência, utilizados na construção das pseudomedidas, com os seus respectivos desvios. Já os dados medidos em tempo real são: tensão, corrente e fluxos de potência.

As medições reais são adquiridas junto ao SAGE (Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia), que é o aplicativo de supervisão da COSERN, o qual possibilita obter e tratar uma base de dados em tempo real com alto desempenho. Essas informações são disponibilizadas em arquivos de dados (ASCII), em intervalos de tempo de 5 minutos (janela de medição), que são acessadas através de FTP (*File Transfer Protocol*). Isso é feito através de um programa de interligação (interligador), desenvolvido com esta finalidade. Esse programa organiza e disponibiliza os dados medidos em tempo real. Os resultados da estimação de estado são apresentados em um sistema de interface gráfica bastante amigável, cujo programa foi desenvolvido em linguagem PHP/HTML.

O algoritmo proposto foi exaustivamente testado em bancada (de forma estática) e no campo (em tempo real). A análise dos resultados, em ambas as situações, não deixou a menor dúvida da validade e aplicabilidade prática do método, o qual apresentou como principais vantagens: simplicidade, eficiência e rapidez.

10.2 Trabalhos futuros

Conforme se demonstrou, o modelo proposto apresentou bons resultados na estimação de estado de alimentadores radiais. Porém, o assunto não se esgota aqui, por conseguinte, esta seção apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros.

Devido ao reduzido número de medidas em tempo real, há necessidade de construção de uma grande quantidade de pseudomedidas para tornar observável o sistema supervisionado. Esse fato pode afetar o desempenho do estimador, principalmente, no que

tange a acurácia de grandezas estimadas, particularmente, as potências injetadas e as tensões nos nós. Isto pode ocorrer tanto no modelo trifásico como no monofásico. Neste trabalho, pela rapidez e simplicidade de cálculo, optou-se pelo modelo monofásico. No futuro, com o incremento da quantidade de medidas em tempo real, é importante o desenvolvimento de um modelo trifásico.

Em um modelo trifásico pode-se assumir o compromisso de uma representação mais real do circuito de distribuição, em que se possa levar em conta especificidades tais como: desequilíbrio de carga; impedância mútua entre condutores; representação de carga em secundário de transformador; inclusão de um modelo para regulador de tensão, dentre outros.

Outra perspectiva que se vislumbra se refere à utilização de pseudomedidas de cargas de transformadores de distribuição e de consumidores do *grupo A*, construídas a partir de curvas de carga diárias, típicas, resultantes de medições.

Pode-se ainda imaginar um modelo do estimador soma de potências com base em correntes de ramo e nodais (injeções de corrente), onde as medições de potências ativa e reativa seriam convertidas em equivalentes de corrente.

A utilização do método soma de correntes para substituir o soma de potências é outra sugestão que pode ser avaliada.

O emprego de métodos baseados em mínimos quadrados recursivos, tipo filtro de Kalman, por exemplo, também pode ser pesquisado.

Referências

- ALMEIDA, M. A. D.; MEDEIROS JR., M. F.; SILVEIRA, D. B. F. **Estimating Loads in Distribution Feeders Using a State Estimator Algorithm with Additional Adjustment of Transformers Loading Factors**. IEEE International Symposium on Circuits and Systems- ISCAS 2003, 25 a 28, May. 2003, Bangkok - Tailândia.
- BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. A. **Branch-Current-Based State Estimation Method for Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 10, n. 1, p. 483-491, Feb. 1995.
- BARAN, M. E.; KELLEY, A. W. **State Estimation for Real-Time Monitoring of Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 9, n. 3, p. 1601-1609, Aug. 1994.
- CESPEDES, R. **New Method for the Analysis of Distribution Networks**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 5, n. 1, p. 391-396, Jan. 1990.
- COUTTO FILHO, M. B.; M. F.; SOUZA, J. C. S.; SCHILLING, M. TH. **Processando Erros Grosseiros em Condições de Baixa Redundância na Estimação de Estado em Sistemas de Potência**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12. Proceedings of Brazilian Control Conference, Uberlândia: 1998, v. 6, p. 2143-2148.
- DEITEL, H. M., DEITEL, P. J., NIETO, T. R., MCPHIE, D. C. **PERL: Como Programar**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 952 p.
- GHOSH, A. K.; LUBKEMAN, D. L.; DOWNEY, M. J.; JONES, R. H. **Distribution Circuit State Estimation Using a Probabilistic Approach**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 12, n. 1, p. 45-51, Feb. 1997.
- LI, K. **State Estimation for power Distribution and Measurement Impacts**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 2, p. 911-916, May. 1996.
- LONDON JR., J. B. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. **Identificação do Nível de Redundância das Medidas para Efeito de Estimação de Estado em Sistemas de Potência**. Controle & Automação, v. 12, n. 2, p. 141-147, jun., ago. 2001.
- LONDON JR., J. B. A.; BRETAS, N. G. **Identificação de Medidas Críticas Através da Estrutura da Matriz Jacobiana**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 12. Proceedings of Brazilian Control Conference, Uberlândia: 1998, v. 6, p. 2149-2154.
- LU, C. N.; TENG, J. H.; LIU, W. H. E. **Distribution System State Estimation**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 10, n. 1, p. 229-240, Feb. 1995.

- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D.; SILVEIRA, D. B. F. (2002). **Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências - Parte I: Modelo Linearizado**. V INDUSCON, 3 a 5, jul. 2002, Salvador/BA - Brasil.
- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D. (2002). **Estimação de Estado em Redes de Distribuição de Média Tensão com Base no Algoritmo da Soma de Potências - Parte II: Modelo Não Linear**. XIV CBA, 2 a 5, set. 2002, Natal/RN – Brasil.
- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D.; MOTTA PIRES, P. S.; MOTA, F. C. SILVEIRA, D. B. F. **Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, para Avaliação das Perdas Técnicas, com Base no Método da Soma de Potências**. CITENEL, nov. 2003, Salvador/BA- Brasil.
- MEDEIROS JR., M. F.; ALMEIDA, M. A. D.; SILVEIRA, D. B. F.; GOMES, A. M. M. B.; MOTA, F. C.; OLIVEIRA, R. C. **Estimação de Estado em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, para Avaliação das Perdas Técnicas**. XV Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI, nov. 2002, Salvador/BA- Brasil.
- MELIPOULOS, A. P. S.; ZHANG, F. **Multiphase Power and State Estimation for Power Distribution Systems**. IEEE Transactions on Power Systems, v. 11, n. 2, 939-946, May. 1996.
- MONTICELLI, A. J. **Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 164 p.
- MONTICELLI, A. J. **State Estimation in Electric Power Systems**. Norwell, Massachusetts-USA: Kluwer Academic Publishers, 1999. 394 p.
- PONTES, J. R. M.; XAVIER, A. P. **O Sistema de Automação da COSERN – Experiência com UTR's e Controles Integrados, Custos e Benefícios**. II Seminário Nacional de Controle e Automação, jun. 2001, Salvador/BA- Brasil.
- ROYTELMAN, I.; SHAHIDEHPPOUR, S. M. **State Estimation for Electric Power Distribution Systems in Quasi Real-Time Conditions**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 4, p. 2009-2015, out. 1993.
- SCHILDT, H. C **Completo e Total**. São Paulo: Makron Books, 1996. 827 p.
- SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. **Power System Static State Estimation – Part I**. Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-89, n. 1, p.120-125, Jan. 1970.
- SIMÕES COSTA, A. J. A.; SALGADO, R. **Estimação Estática de Estados em Sistemas Elétricos de Potência**. In: MINICURSO MINISTRDO NO XIV CBA, 2 a 5, set. 2002, Natal/RN – Brasil.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria dos Erros**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1996. 249 p.

WU, F. F.; NEYER A. F. **Asynchronous Distributed State Estimation for Power Distribution Systems**. Proceedings of Power System Computation Conference, 10., p. 439-446, Aug. 1990.

Apêndice A

Dados de Entrada e Saída

A.1 Introdução

Aqui são apresentados os dados para cálculo de variâncias de medidas e pseudomedidas, a organização da entrada de dados do programa computacional desenvolvido para o estimador soma de potências (nós e trechos de alimentador supervisionado), e as tabelas de potências e tensões estimadas nos nós dos alimentadores-teste.

A.2 Dados para cálculo de variâncias de medidas e pseudomedidas

As variâncias requeridas pelo modelo de medição são calculadas a partir das incertezas das grandezas que formam o conjunto de medição. No trabalho, essas incertezas são originadas pelos desvios adotados para os fatores de potência e de utilização, e pelas acurácias dos instrumentos de medição, cujos valores, salvo observação no texto, são os seguintes:

- Desvio em fator de utilização: $dfu = \pm kfu \times fu_{cal}$
 - $kfu = 0,4$ ou $1,0$.
 - fu_{cal} : fator de utilização calculado de acordo com a metodologia proposta no Cap. 3, para isso adotaram-se os seguintes fatores de diversidade:
 - $f_{div,TD} = 1,0$ (para transformadores de distribuição);
 - $f_{div,GA} = 1,2$ (para consumidores do grupo A).
- Desvio em fator de potência de transformador de distribuição: $dfp = \pm kfp \times fp$
 - $kfp = 0,05$;
 - $fp = 0,92$ (para transformadores de distribuição);
 - fator de potência para consumidores do grupo A (são colhidos nas contas mensais de energia).
- Classe de exatidão dos medidores de energia (ativa e reativa) e demanda: 2%;
- Classe de exatidão dos medidores de corrente: 2,5%;
- Classe de exatidão dos medidores de tensão: 2,5%;
- Classe de exatidão dos medidores de potência (ativa e reativa): 5%.

A.3 Organização de dados de entrada

As tabelas A.1 e A.2 mostram, de forma geral, o formato da entrada de dados referentes a nós e trechos de um alimentador supervisionado.

Na Tabela A.1 são fornecidos os dados de nós, assim discriminados:

- 1) Coluna 1: Nesta coluna estão dados os números dos nós. O nó de número 1 se refere à barra da subestação, os demais são: ponto de instalação de transformador de distribuição; ponto de entrega de energia a consumidor do *grupo A*; ponto de instalação de banco de capacitor; local de instalação de chave ou religador com módulo telemedicação; ponto de mudança de bitola de condutor; ponto de derivação.
- 2) Coluna 2: Identifica o tipo de nó, isto é:
 - 0: transformador de distribuição;
 - 1: consumidor do *grupo A*;
 - 2: banco de capacitor.
- 3) Coluna 3: Potência nominal de transformador de distribuição (kVA) ou demanda máxima de consumidor do *grupo A* (kW) ou potência de banco de capacitor (kvar). A barra da subestação ou nó de passagem apresenta valor zero na coluna. No caso de banco de capacitor, a potência nominal é assumida com o sinal negativo.
- 4) Coluna 4: Fator de potência (para transformador de distribuição, trabalha-se com uma estimativa de 0,92; para consumidor do *grupo A*, adota-se o valor registrado na conta mensal de energia.
- 5) Coluna 5: Identifica os nós vinculados a um determinado ponto de medição:
 - Os nós vinculados a ponto de medição, localizado na saída do alimentador (ponto de medição 1), são identificados por 0;
 - Os nós vinculados a um segundo ponto de medição, são identificados por 1; os vinculados a um terceiro ponto, por 2, e assim por diante.

Tabela A.1- Organização de dados de nós

Nó	Tipo	S/D/Q	fp	Vínculo
1	0	0	1	0
2	0	112,5	0,92	0
3	0	75	0,92	0
4	0	40	1	0
5	0	0	1	0
6	0	75	0,92	0
7	0	75	0,92	1
8	1	50,3	0,82	1
9	0	30	0,92	1
10	0	75	0,92	1

Na Tabela A.2 encontram-se os dados dos trechos, quais sejam:

- 1) Coluna 1: número do trecho ou ramal.
- 2) Colunas 2 e 3: início e final do trecho, respectivamente.
- 3) Colunas 4 e 5: resistência e reatância de seqüência positiva do condutor (Ω/km).
- 6) Coluna 6: distância em km.

Tabela A.2 – Organização de dados de trechos

Trecho	Ini.	Fim	R	X	km
1	1	2	0,1894	0,3873	0,163
2	2	3	0,1894	0,3873	0,192
3	3	4	0,1894	0,3873	0,114
4	4	5	0,1894	0,3873	0,059
5	5	6	0,1894	0,3873	0,040
6	6	7	0,1894	0,3873	0,248
7	7	8	0,1894	0,3873	0,167
8	8	9	0,1894	0,3873	0,205
9	9	10	0,1894	0,3873	0,084
10	10	11	0,1894	0,3873	0,041

A.4 Potências e tensões estimadas nos nós dos alimentadores-teste

As tabelas A.3 a A.8 apresentam resultados da estimação de estado de três alimentadores para as condições de carregamento máximo e mínimo. As grandezas sobrepostas com acento circunflexo são estimadas, as outras são pseudomedidas (construídas a partir das potências nos nós, dos fatores de utilização calculados ($f_{u_{cal}}$) e dos fatores de potência medidos ou pré-estabelecidos (f_p)).

Esses resultados foram obtidos a partir dos dados fornecidos na Seção A.2 e mais os seguintes:

- Fatores de utilização: calculados de acordo com a metodologia apresentada na dada no Cap. 3:
 - NTU01J1 (carregamento máximo): $f_{u_1} = 0,84$; $f_{u_2} = 0,98$; $f_{u_3} = 0,83$
 - NTU01J1 (carregamento mínimo): $f_{u_1} = 0,47$; $f_{u_2} = 0,49$; $f_{u_3} = 0,46$
 - NEO01N4 (carregamento máximo): $f_{u_1} = 0,63$; $f_{u_2} = 0,68$
 - NEO01N4 (carregamento mínimo): $f_{u_1} = 0,37$; $f_{u_2} = 0,42$
 - NEO01N6 (carregamento máximo): $f_{u_1} = 0,85$
 - NEO01N6 (carregamento mínimo): $f_{u_1} = 0,48$
- Os desvios em fator de utilização são calculados a partir de um erro de 40% em $f_{u_{cal}}$, ou seja, $dfu = \pm 0,40 \times f_{u_{cal}}$, onde $f_{u_{cal}}$ representa os valores de f_u dados acima.

a) Estimação de estado do alimentador NTU01J1 para a condição de carregamento máximo.

Tabela A.3 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,1000
2	0	0	0	0	0	14,0841
3	0	0	0	0	0	14,0641
4	0	0	0	0	0	14,0522
5*	0	0	0	0	0	13,5000
6	0	67,6432	68,6173	28,8159	30,5165	13,4971
7	0	67,6432	68,4669	28,8159	30,2692	13,4783
8	1	49,3109	49,6677	34,4192	35,6019	13,4660
9	0	0	0	0	0	13,4512
10	0	67,6432	68,1705	28,8159	29,8137	13,4469
11	0	0	0	0	0	13,4449
12	1	40,978	41,1346	0	0	13,4445
13	0	0	0	0	0	13,4421
14	0	0	0	0	0	13,4409
15	0	67,6432	67,9857	28,8159	29,5185	13,4385
16	0	0	0	0	0	13,4371
17*	0	0	0	0	0	13,3000
18	0	22,8231	22,4032	9,7226	10,1573	13,2985
19	0	0	0	0	0	13,2951
20	0	114,1155	104,1997	48,613	58,8835	13,2944
21	0	0	0	0	0	13,2938
22	0	34,2346	33,3858	14,5839	15,4667	13,2933
23	0	0	0	0	0	13,2928
24	0	57,0577	54,775	24,3065	26,6791	13,2921
25	0	57,0577	54,7966	24,3065	26,6585	13,2915
26	0	57,0577	54,8105	24,3065	26,6462	13,2912
27	0	0	0	0	0	13,2912
28	0	0	0	0	0	14,0497
29	0	0	0	0	0	14,0486
30	0	58,0317	57,7927	24,7214	24,6895	14,0474
31	0	0	0	0	0	14,0461
32	1	17,0731	17,0731	0	0	14,0419
33	0	0	0	0	0	14,0347
34	0	0	0	0	0	14,0336
35	0	0	0	0	0	14,0324
36	0	0	0	0	0	14,0308
37	0	11,6063	11,5987	4,9443	4,9382	14,0297
38	0	34,819	34,7514	14,8328	14,7785	14,0294
39	0	0	0	0	0	14,0292
40	0	58,0317	57,8463	24,7214	24,5711	14,0288

Tabela A.3 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
41	0	58,0317	57,8461	24,7214	24,571	14,0288
42	0	0	0	0	0	13,4388
43	0	67,6432	68,0822	28,8159	29,7935	13,4279
44	0	67,6432	68,0593	28,8159	29,7656	13,4167
45	0	0	0	0	0	13,4144
46	0	0	0	0	0	13,4075
47	0	0	0	0	0	13,4027
48	0	101,4647	102,1523	43,2238	45,1431	13,4016
49	0	0	0	0	0	13,3970
50	0	67,6432	67,9205	28,8159	29,6444	13,3959
51	0	67,6432	67,9169	28,8159	29,639	13,3913
52	0	67,6432	67,9171	28,8159	29,639	13,3905
53	0	40,5859	40,6992	17,2895	17,5999	13,4024
54	0	67,6432	67,9583	28,8159	29,678	13,3999
55	0	67,6432	67,9823	28,8159	29,7039	13,4051
56	1	25,8809	25,9343	6,4864	6,5178	13,414
57	0	40,5859	40,7674	17,2895	17,657	13,4386
58	0	40,5859	40,7671	17,2895	17,6568	13,4385
59	0	67,6432	68,0913	28,8159	29,7248	13,4381
60	0	0	0	0	0	13,4320
61	0	0	0	0	0	13,4264
62	0	0	0	0	0	13,4207
63	0	135,2863	136,8881	57,6317	61,1106	13,4200
64	0	0	0	0	0	13,4203
65	0	67,6432	68,0383	28,8159	29,6803	13,4198
66	0	67,6432	68,0443	28,8159	29,6225	13,4406
67	0	0	0	0	0	13,4370
68	0	67,6432	67,9586	28,8159	29,4739	13,4370
69	0	0	0	0	0	13,4360
70	0	40,5859	40,6966	17,2895	17,5215	13,4359
71	0	40,5859	40,6966	17,2895	17,5215	13,4355
72	0	67,6432	67,9543	28,8159	29,4661	13,4354
73	1	42,4212	41,0017	15,3968	16,1317	13,2970
74	0	57,0577	54,4512	24,3065	27,005	13,2969
75	1	147,854	131,0984	21,068	22,3978	13,2936
76	1	55,9827	53,5808	14,0306	14,6203	13,2925
77	1	27,4539	26,9031	0	0	13,2936
78	0	34,2346	33,408	14,5839	15,4412	13,2916
79	0	85,5866	80,421	36,4597	41,8183	13,2897
80	0	34,2346	33,408	14,5839	15,4412	13,2914
81	0	22,8231	22,4646	9,7226	10,0958	13,2910
82	0	135,2863	136,9923	57,6317	61,1977	13,4291
83	0	101,4647	102,3769	43,2238	45,1959	13,4247
84	1	80,7797	81,2971	39,1234	40,0593	13,4405

Tabela A.3 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
85	0	23,2127	22,8164	9,8886	9,8722	14,0840
86	0	0	0	0	0	14,0629
87	0	58,0317	57,0944	24,7214	24,7143	14,0627
88	0	34,819	34,7371	14,8328	14,8047	14,0460
89	0	34,819	34,7346	14,8328	14,7775	14,0414
90	0	23,2127	23,1792	9,8886	9,8647	14,0342
91	1	302,7741	302,7741	146,6402	146,6402	14,0298
92	1	44,4069	44,4069	42,8017	42,8017	14,0321
93	0	34,819	34,7498	14,8328	14,7782	14,0306
94	0	34,819	34,7222	14,8328	14,7689	14,0284
95	1	201,0084	201,0084	91,5821	91,5821	14,0253
96	0	87,0476	86,6271	37,0821	36,742	14,0288
97	0	40,5859	40,6927	17,2895	17,5926	13,3966
98	0	34,819	34,7072	14,8328	14,8287	14,0492
99	0	34,819	34,7072	14,8328	14,8287	14,0485
100	1	55,845	55,8451	11,3398	11,3399	14,0484
101	0	87,0476	86,4426	37,0821	37,0359	14,0484
102	1	52,9855	52,9854	10,7592	10,7592	14,0627
103	0	40,5859	40,7281	17,2895	17,6007	13,4200
104	0	57,0577	54,4332	24,3065	27,0228	13,2985

(*): Pontos de medição em tempo real.

b) Estimação de estado do alimentador NTU01J1 para a condição de carregamento mínimo.

Tabela A.4 – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,2000
2	0	0	0	0	0	14,1912
3	0	0	0	0	0	14,1806
4	0	0	0	0	0	14,1743
5*	0	0	0	0	0	13,6000
6	0	34,0721	33,8845	14,5147	15,0825	13,5985
7	0	34,0721	33,9021	14,5147	15,008	13,5890
8	1	24,8381	24,7554	17,3371	17,7477	13,5828
9	0	0	0	0	0	13,5753
10	0	34,0721	33,9409	14,5147	14,8655	13,5730
11	0	0	0	0	0	13,5720
12	1	20,6408	20,5991	0	0	13,5718

Tabela A.4 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
13	0	0	0	0	0	13,5705
14	0	0	0	0	0	13,5699
15	0	34,0721	33,974	14,5147	14,7686	13,5686
16	0	0	0	0	0	13,5679
17*	0	0	0	0	0	13,4000
18	0	12,6471	12,3883	5,3876	5,629	13,3992
19	0	0	0	0	0	13,3973
20	0	63,2354	57,1163	26,9382	32,6476	13,3969
21	0	0	0	0	0	13,3966
22	0	18,9706	18,4468	8,0815	8,5727	13,3963
23	0	0	0	0	0	13,3961
24	0	31,6177	30,2098	13,4691	14,7906	13,3957
25	0	31,6177	30,223	13,4691	14,7793	13,3954
26	0	31,6177	30,2315	13,4691	14,7725	13,3952
27	0	0	0	0	0	13,3952
28	0	0	0	0	0	14,1729
29	0	0	0	0	0	14,1723
30	0	32,2797	32,2048	13,7511	13,7414	14,1717
31	0	0	0	0	0	14,1709
32	1	9,4968	9,4968	0	0	14,1686
33	0	0	0	0	0	14,1647
34	0	0	0	0	0	14,1640
35	0	0	0	0	0	14,1634
36	0	0	0	0	0	14,1625
37	0	6,4559	6,4536	2,7502	2,7484	14,1619
38	0	19,3678	19,3469	8,2507	8,2341	14,1618
39	0	0	0	0	0	14,1616
40	0	32,2797	32,2224	13,7511	13,7054	14,1614
41	0	32,2797	32,2224	13,7511	13,7054	14,1614
42	0	0	0	0	0	13,5691
43	0	34,0721	33,917	14,5147	14,8617	13,5638
44	0	34,0721	33,9199	14,5147	14,8524	13,5582
45	0	0	0	0	0	13,5571
46	0	0	0	0	0	13,5537
47	0	0	0	0	0	13,5513
48	0	51,1082	50,7597	21,772	22,4628	13,5508
49	0	0	0	0	0	13,5485
50	0	34,0721	33,9162	14,5147	14,8139	13,5480

Tabela A.4 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
51	0	34,0721	33,9169	14,5147	14,8121	13,5457
52	0	34,0721	33,917	14,5147	14,8121	13,5453
53	0	20,4433	20,3874	8,7088	8,8204	13,5512
54	0	34,0721	33,9171	14,5147	14,8246	13,5499
55	0	34,0721	33,9156	14,5147	14,8332	13,5525
56	1	13,0363	13,0138	3,2672	3,2785	13,5569
57	0	20,4433	20,3902	8,7088	8,8383	13,5690
58	0	20,4433	20,3902	8,7088	8,8383	13,5690
59	0	34,0721	33,9484	14,5147	14,8359	13,5687
60	0	0	0	0	0	13,5657
61	0	0	0	0	0	13,5629
62	0	0	0	0	0	13,5601
63	0	68,1442	67,638	29,0293	30,2654	13,5598
64	0	0	0	0	0	13,5599
65	0	34,0721	33,9459	14,5147	14,8219	13,5597
66	0	34,0721	33,9636	14,5147	14,8023	13,5698
67	0	0	0	0	0	13,5678
68	0	34,0721	33,9801	14,5147	14,7534	13,5678
69	0	0	0	0	0	13,5673
70	0	20,4433	20,4105	8,7088	8,7932	13,5673
71	0	20,4433	20,4105	8,7088	8,7932	13,5671
72	0	34,0721	33,9808	14,5147	14,7509	13,5670
73	1	23,5071	22,6321	8,5319	8,9401	13,3984
74	0	31,6177	30,0111	13,4691	14,9679	13,3983
75	1	81,9311	71,5927	11,6746	12,4138	13,3965
76	1	31,022	29,5399	7,7748	8,1027	13,3959
77	1	15,2132	14,8733	0	0	13,3965
78	0	18,9706	18,4612	8,0815	8,5589	13,3954
79	0	47,4266	44,2429	20,2036	23,1878	13,3944
80	0	18,9706	18,4612	8,0815	8,5589	13,3953
81	0	12,6471	12,426	5,3876	5,5955	13,3951
82	0	68,1442	67,6434	29,0293	30,2926	13,5643
83	0	51,1082	50,8217	21,772	22,4724	13,5621
84	1	40,689	40,5437	19,7066	20,043	13,5697
85	0	12,9119	12,7792	5,5004	5,4965	14,1912
86	0	0	0	0	0	14,1799
87	0	32,2797	31,9785	13,7511	13,7493	14,1798
88	0	19,3678	19,3422	8,2507	8,2421	14,1709
89	0	19,3678	19,3415	8,2507	8,2338	14,1684
90	0	12,9119	12,9015	5,5004	5,4932	14,1644
91	1	168,4159	168,4159	81,5675	81,5675	14,1620
92	1	24,701	24,701	23,8081	23,8081	14,1633

Tabela A.4 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NTU01J1, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
93	0	19,3678	19,3464	8,2507	8,2341	14,1624
94	0	19,3678	19,3381	8,2507	8,2312	14,1612
95	1	111,8094	111,8094	50,9419	50,9419	14,1595
96	0	48,4196	48,2896	20,6267	20,5233	14,1614
97	0	20,4433	20,3879	8,7088	8,818	13,5483
98	0	19,3678	19,3327	8,2507	8,2494	14,1726
99	0	19,3678	19,3327	8,2507	8,2494	14,1723
100	1	31,0634	31,0634	6,3077	6,3077	14,1722
101	0	48,4196	48,2298	20,6267	20,6126	14,1722
102	1	29,4728	29,4725	5,9847	5,9847	14,1798
103	0	20,4433	20,3978	8,7088	8,8194	13,5598
104	0	31,6177	30,0001	13,4691	14,9778	13,3992

c) Estimação de estado do alimentador NEO01N4 para a condição de carregamento máximo.

Tabela A.5 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,0000
2	0	43,7496	41,9395	18,6373	18,748	13,8990
3	0	87,4993	83,4511	37,2745	37,3051	13,8769
4	0	131,2489	126,2167	55,9118	55,8804	13,8706
5	0	65,6244	64,9333	27,9559	27,9487	13,8522
6	0	65,6244	65,2059	27,9559	27,9488	13,8372
7	0	87,4993	87,0235	37,2745	37,257	13,8248
8	1	30,9988	30,9988	11,2511	11,2511	13,8088
9	1	35,8747	35,8747	18,3792	18,3792	13,8008
10	0	65,6244	65,5226	27,9559	27,9401	13,7821
11	0	65,6244	65,5319	27,9559	27,9371	13,7590
12	0	43,7496	43,7108	18,6373	18,6285	13,7326
13	1	20,537	20,537	0	0	13,7065
14	0	43,7496	43,7172	18,6373	18,63	13,6870
15	1	57,8256	57,8256	0	0	13,6660
16	0	26,2498	26,2421	11,1824	11,1814	13,6516
17	1	21,0569	21,0569	11,3653	11,3653	13,6453
18	0	0	0	0	0	13,6093
19*	0	0	0	0	0	13,7000
20	0	47,1459	45,2619	20,0841	20,5092	13,6767
21	0	0	0	0	0	13,6737
22	1	52,1065	50,005	0	0	13,6623

Tabela A.5 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
23	1	27,7341	27,1541	10,0661	10,1259	13,6599
24	0	28,2875	27,6885	12,0504	12,1705	13,6577
25	1	117,0995	107,1993	23,7781	24,0802	13,6528
26	0	0	0	0	0	13,6473
27	0	0	0	0	0	13,6436
28	0	28,2875	27,7262	12,0504	12,1415	13,6361
29	0	28,2875	27,7281	12,0504	12,1241	13,6093
30	1	376,0534	279,8938	160,1981	168,8781	13,5730
31	0	28,2875	27,7415	12,0504	12,0941	13,5723
32	1	71,7847	68,3795	10,2288	10,2472	13,5578
33	1	120,9326	111,4208	35,272	35,4752	13,5549
34	1	121,0215	111,6243	30,3308	30,4769	13,5533
35	1	82,9221	78,5582	0	0	13,5529
36	0	28,2875	27,7759	12,0504	12,0833	13,5527
37	1	118,7803	109,9394	39,0412	39,2695	13,5524
38	0	47,1459	45,732	20,0841	20,1731	13,5507
39	0	65,6244	63,3473	27,9559	27,9731	13,8768
40	0	43,7496	43,4659	18,6373	18,6282	13,8519
41	0	65,6244	65,0411	27,9559	27,9214	13,8511
42	1	291,195	291,195	59,1297	59,1297	13,8505
43	0	87,4993	86,7552	37,2745	37,2619	13,8368
44	0	43,7496	43,7185	18,6373	18,626	13,6450
45	0	43,7496	43,7184	18,6373	18,626	13,6450
46	1	34,708	34,708	11,408	11,408	13,6092
47	0	0	0	0	0	13,6644
48	0	47,1459	45,4372	20,0841	20,4345	13,6618
49	1	199,4613	169,7832	49,9897	51,4304	13,6594
50	0	47,1459	45,4728	20,0841	20,4254	13,6591
51	0	70,7188	67,0017	30,1261	30,8862	13,6575
52	1	34,4575	33,5942	0	0	13,6572
53	1	39,7119	38,5653	11,5826	11,6585	13,6571
54	1	36,9788	35,987	15,7529	15,892	13,6567
55	1	44,2625	42,8509	6,3071	6,3292	13,6561
56	0	47,1459	45,4393	20,0841	20,4398	13,6616
57	1	49,0249	47,2068	14,2989	14,4213	13,6615
58	1	28,5745	27,9639	7,1614	7,1918	13,6613
59	1	45,383	43,8572	13,2367	13,3397	13,6611
60	0	94,2918	87,6492	40,1681	41,5569	13,6610
61	0	70,7188	66,9824	30,1261	30,9073	13,6605
62	1	108,0324	99,2323	15,3938	15,5335	13,6599
63	1	142,6676	127,9681	41,6114	42,5365	13,6498
64	1	266,0532	217,1275	54,0244	55,2667	13,636
65	1	17,2322	17,0119	3,4991	3,5062	13,6589
66	0	28,2875	27,7024	12,0504	12,1696	13,6558

d) Estimação de estado do alimentador NEO01N4 para a condição de carregamento mínimo.

Tabela A.6 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,1000
2	0	25,5669	24,3765	10,8915	10,9456	14,0415
3	0	51,1338	48,3927	21,7829	21,7988	14,0284
4	0	76,7007	73,2371	32,6744	32,6653	14,0247
5	0	38,3504	37,8709	16,3372	16,3348	14,0137
6	0	38,3504	38,0616	16,3372	16,3348	14,0047
7	0	51,1338	50,8141	21,7829	21,7771	13,9972
8	1	18,1155	18,1154	6,575	6,575	13,9875
9	1	20,9649	20,9649	10,7406	10,7406	13,9827
10	0	38,3504	38,2954	16,3372	16,332	13,9714
11	0	38,3504	38,3064	16,3372	16,331	13,9574
12	0	25,5669	25,5503	10,8915	10,8886	13,9414
13	1	12,0016	12,0016	0	0	13,9256
14	0	25,5669	25,5547	10,8915	10,8891	13,9139
15	1	33,7928	33,7928	0	0	13,9011
16	0	15,3401	15,3374	6,5349	6,5346	13,8924
17	1	12,3055	12,3055	6,6418	6,6418	13,8886
18	0	0	0	0	0	13,8668
19*	0	0	0	0	0	13,4002
20	0	29,1472	27,7395	12,4167	13,8156	13,3849
21	0	0	0	0	0	13,3830
22	1	32,214	30,6404	0	0	13,3756
23	1	17,1462	16,7113	6,2232	6,425	13,3740
24	0	17,4883	17,0385	7,45	7,8596	13,3726
25	1	72,3949	64,9544	14,7004	15,7425	13,3694
26	0	0	0	0	0	13,3658
27	0	0	0	0	0	13,3634
28	0	17,4883	17,0656	7,45	7,8059	13,3586
29	0	17,4883	17,0681	7,45	7,7918	13,3409
30	1	232,4892	160,7853	99,04	139,2514	13,3169
31	0	17,4883	17,0817	7,45	7,7669	13,3165
32	1	44,3798	41,8528	6,3238	6,4745	13,3073
33	1	74,7647	67,7094	21,8064	23,5608	13,3055
34	1	74,8196	67,8501	18,7516	20,0298	13,3044
35	1	51,2653	48,0284	0	0	13,3042
36	0	17,4883	17,1088	7,45	7,7414	13,3041
37	1	73,4341	66,8761	24,1366	26,195	13,3039
38	0	29,1472	28,0989	12,4167	13,2194	13,3028
39	0	38,3504	36,8085	16,3372	16,3461	14,0284
40	0	25,5669	25,3716	10,8915	10,8884	14,0135
41	0	38,3504	37,9522	16,3372	16,3257	14,0131

Tabela A.6 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
42	1	170,1719	170,1719	34,5549	34,5549	14,0127
43	0	51,1338	50,6205	21,7829	21,7787	14,0045
44	0	25,5669	25,5562	10,8915	10,8878	13,8884
45	0	25,5669	25,5562	10,8915	10,8878	13,8884
46	1	20,2831	20,2831	6,6667	6,6667	13,8667
47	0	0	0	0	0	13,3770
48	0	29,1472	27,8697	12,4167	13,6206	13,3754
49	1	123,3138	101,1264	30,9054	35,8596	13,3739
50	0	29,1472	27,8965	12,4167	13,5901	13,3737
51	0	43,7208	40,9427	18,625	21,2406	13,3727
52	1	21,3028	20,6576	0	0	13,3725
53	1	24,5512	23,6943	7,1608	7,422	13,3724
54	1	22,8616	22,1206	9,739	10,2193	13,3722
55	1	27,3646	26,3102	3,8992	3,9758	13,3718
56	0	29,1472	27,8713	12,4167	13,6314	13,3752
57	1	30,3089	28,9496	8,8401	9,258	13,3752
58	1	17,6657	17,2092	4,4275	4,5311	13,3751
59	1	28,0574	26,9161	8,1834	8,5344	13,3749
60	0	58,2944	53,3258	24,8333	29,5614	13,3748
61	0	43,7208	40,9262	18,625	21,2846	13,3746
62	1	66,7894	60,1905	9,517	9,9889	13,374
63	1	88,202	77,1585	25,7256	28,9169	13,3675
64	1	164,4832	127,643	33,3997	38,2544	13,3585
65	1	10,6535	10,4888	2,1633	2,1874	13,3736
66	0	17,4883	17,0512	7,45	7,8618	13,3716

e) Estimação de estado do alimentador NEO01N6 para a condição de carregamento máximo.

Tabela A.7 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,2000
2	0	116,748	114,8575	49,7344	49,5835	14,1616
3	0	35,0244	34,9477	14,9203	14,9181	14,1331
4	0	58,374	58,2612	24,8672	24,8607	14,1142
5	0	87,561	87,3845	37,3008	37,2826	14,0855
6	0	58,374	58,3241	24,8672	24,8627	14,0536
7	0	58,374	58,338	24,8672	24,8633	14,0383
8	0	58,374	58,3276	24,8672	24,859	14,0249
9	0	58,374	58,3404	24,8672	24,8635	13,9939

Tabela A.7 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
10	0	0	0	0	0	13,9834
11	0	23,3496	23,3455	9,9469	9,9462	13,9764
12	0	58,374	58,3539	24,8672	24,8648	13,964
13	0	87,561	87,4566	37,3008	37,277	13,9572
14	0	23,3496	23,3271	9,9469	9,9447	13,9251
15	0	58,374	58,2729	24,8672	24,8629	13,8552
16	0	23,3496	23,3302	9,9469	9,9455	13,8363
17	0	87,561	87,4004	37,3008	37,297	13,7959
18	1	22,199	22,199	8,7736	8,7736	13,7907
19	1	259,7305	259,7305	94,2696	94,2696	13,7778
20	1	53,0696	53,0696	17,4431	17,4431	13,7732
21	0	58,374	58,3054	24,8672	24,8645	13,7496
22	0	116,748	116,37	49,7344	49,7182	13,7338
23	0	23,3496	23,3385	9,9469	9,9467	13,7058
24	0	87,561	87,2652	37,3008	37,2859	13,7003
25	0	87,561	87,2978	37,3008	37,2885	13,6508
26	0	58,374	58,2652	24,8672	24,864	13,6348
27	0	58,374	58,2388	24,8672	24,8614	13,6198
28	0	58,374	58,2505	24,8672	24,8639	13,5857
29	0	87,561	87,3013	37,3008	37,2943	13,5776
30	0	58,374	58,2701	24,8672	24,8651	13,5711
31	0	58,374	58,2742	24,8672	24,8647	13,5674
32	0	58,374	58,287	24,8672	24,8661	13,5621
33	0	87,561	87,356	37,3008	37,2941	13,5614
34	0	0	0	0	0	13,5560
35	0	58,374	58,2783	24,8672	24,8631	13,5535
36	1	104,3879	104,3879	37,8878	37,8878	13,5503
37	0	58,374	58,2612	24,8672	24,8607	14,1138
38	0	87,561	87,319	37,3008	37,2918	14,1141
39	0	116,748	116,3177	49,7344	49,7183	14,114
40	0	116,748	116,4342	49,7344	49,7021	14,0849
41	0	58,374	58,3311	24,8672	24,8629	14,0243
42	0	58,374	58,3311	24,8672	24,8629	14,0242
43	0	58,374	58,3328	24,8672	24,8641	14,0238
44	0	58,374	58,3328	24,8672	24,8641	14,0235
45	0	35,0244	35,0158	14,9203	14,9195	13,9833
46	1	52,029	52,029	51,6041	51,6041	13,8537
47	0	58,374	58,2443	24,8672	24,8623	13,6961
48	0	58,374	58,2491	24,8672	24,8639	13,6931
49	0	87,561	87,2799	37,3008	37,2933	13,6925
50	0	58,374	58,2657	24,8672	24,8641	13,6322
51	0	87,561	87,3173	37,3008	37,2937	13,6299
52	0	116,748	116,2071	49,7344	49,7113	13,6162
53	0	58,374	58,2397	24,8672	24,8624	13,6145

Tabela A.7 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga máxima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
54	0	87,561	87,2697	37,3008	37,2935	13,6107
55	0	87,561	87,2697	37,3008	37,2934	13,6096
56	0	87,561	87,283	37,3008	37,2933	13,5838
57	0	58,374	58,2742	24,8672	24,8647	13,5667
58	0	87,561	87,358	37,3008	37,2942	13,5546

f) Estimação de estado do alimentador NEO01N6 para a condição de carregamento mínimo.

Tabela A.8 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
1*	0	0	0	0	0	14,2000
2	0	66,615	65,5952	28,3779	28,3069	14,1781
3	0	19,9845	19,9446	8,5134	8,5125	14,1619
4	0	33,3075	33,2537	14,1889	14,1868	14,1511
5	0	49,9613	49,8875	21,2834	21,2775	14,1348
6	0	33,3075	33,2882	14,1889	14,1875	14,1167
7	0	33,3075	33,2945	14,1889	14,1877	14,1080
8	0	33,3075	33,292	14,1889	14,1863	14,1003
9	0	33,3075	33,2964	14,1889	14,1877	14,0828
10	0	0	0	0	0	14,0768
11	0	13,323	13,3217	5,6756	5,6754	14,0729
12	0	33,3075	33,301	14,1889	14,1882	14,0658
13	0	49,9613	49,9278	21,2834	21,2758	14,062
14	0	13,323	13,3158	5,6756	5,6749	14,0438
15	0	33,3075	33,2752	14,1889	14,1876	14,0044
16	0	13,323	13,3168	5,6756	5,6751	13,9937
17	0	49,9613	49,9102	21,2834	21,2822	13,9709
18	1	12,6665	12,6665	5,0061	5,0061	13,9680
19	1	148,1991	148,1991	53,7891	53,7891	13,9607
20	1	30,2809	30,2809	9,9528	9,9528	13,9581
21	0	33,3075	33,2858	14,1889	14,1881	13,9449
22	0	66,615	66,4954	28,3779	28,3727	13,9359
23	0	13,323	13,3195	5,6756	5,6755	13,9202
24	0	49,9613	49,8679	21,2834	21,2787	13,9171
25	0	49,9613	49,8783	21,2834	21,2795	13,8893
26	0	33,3075	33,2733	14,1889	14,1879	13,8803

Tabela A.8 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N6, operando com carga mínima: potências injetadas e tensões nodais

Nó	Tipo	P (kW)	\hat{P} (kW)	Q (kvar)	\hat{Q} (kvar)	\hat{V} (kV)
27	0	33,3075	33,265	14,1889	14,1871	13,8719
28	0	33,3075	33,2688	14,1889	14,1879	13,8529
29	0	49,9613	49,8798	21,2834	21,2814	13,8483
30	0	33,3075	33,2749	14,1889	14,1883	13,8447
31	0	33,3075	33,2763	14,1889	14,1881	13,8426
32	0	33,3075	33,2803	14,1889	14,1886	13,8396
33	0	49,9613	49,8971	21,2834	21,2813	13,8392
34	0	0	0	0	0	13,8362
35	0	33,3075	33,2776	14,1889	14,1877	13,8348
36	1	59,5625	59,5625	21,6183	21,6183	13,833
37	0	33,3075	33,2537	14,1889	14,1868	14,1509
38	0	49,9613	49,8457	21,2834	21,2805	14,1510
39	0	66,615	66,4096	28,3779	28,3726	14,1510
40	0	66,615	66,4839	28,3779	28,3674	14,1344
41	0	33,3075	33,2931	14,1889	14,1876	14,1000
42	0	33,3075	33,2931	14,1889	14,1876	14,0999
43	0	33,3075	33,2937	14,1889	14,1879	14,0997
44	0	33,3075	33,2937	14,1889	14,1879	14,0996
45	0	19,9845	19,9817	8,5134	8,5131	14,0768
46	1	29,6871	29,6871	29,4447	29,4447	14,0035
47	0	33,3075	33,2666	14,1889	14,1874	13,9148
48	0	33,3075	33,2681	14,1889	14,1879	13,9131
49	0	49,9613	49,8725	21,2834	21,281	13,9127
50	0	33,3075	33,2734	14,1889	14,188	13,8789
51	0	49,9613	49,8846	21,2834	21,2812	13,8776
52	0	66,615	66,445	28,3779	28,3706	13,8699
53	0	33,3075	33,2653	14,1889	14,1874	13,8690
54	0	49,9613	49,8698	21,2834	21,2811	13,8668
55	0	49,9613	49,8697	21,2834	21,2811	13,8662
56	0	49,9613	49,8741	21,2834	21,281	13,8518
57	0	33,3075	33,2763	14,1889	14,1881	13,8422
58	0	49,9613	49,8977	21,2834	21,2813	13,8355

A Tabela A.9 mostra as potências pseudomedidas (P_{pmed} e Q_{pmed}), com os respectivos valores estimados, e as tensões estimadas para o alimentador-teste NEO01N4, por nó. As grandezas estimadas são identificadas com X_{est} (por exemplo, tensão estimada: V_{est}).

- a) Estimação do alimentador NEO01N4 para as seguintes condições: carregamento máximo; $kfu = 1,0$; $kfu = 0,4$; $kfp = 0,05$; $fu_1 = 0,63$; $fu_2 = 0,68$. A estimativa dos fluxos de potência na saída para o alimentador foi realizada pelo *Método B*.

Tabela A.9 – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (operando c/ carga máxima): potências e tensões estimadas, por nó, considerando $kfu = 0,4$ e $kfu=1,0$

Nó	Tipo	P_{pmed}	P_{est} $kfu=0,4$	P_{est} $kfu=1,0$	Q_{pmed}	Q_{est} $kfu=0,4$	Q_{est} $Kfu=1,0$	V_{est} $kfu=0,4$	V_{est} $kfu=1,0$
1*	0	0	0	0	0	0	0	14	14
2	0	43,75	41,9395	41,019	18,637	18,748	19,041	13,899	13,899
3	0	87,499	83,4511	77,672	37,275	37,3051	37,762	13,8769	13,878
4	0	131,25	126,2167	111,26	55,912	55,8804	56,184	13,8706	13,872
5	0	65,624	64,9333	61,108	27,956	27,9487	27,963	13,8522	13,854
6	0	65,624	65,2059	61,46	27,956	27,9488	27,943	13,8372	13,841
7	0	87,499	87,0235	80,64	37,275	37,257	37,225	13,8248	13,829
8	1	30,999	30,9988	30,999	11,251	11,2511	11,251	13,8088	13,814
9	1	35,875	35,8747	35,875	18,379	18,3792	18,379	13,8008	13,807
10	0	65,624	65,5226	62,528	27,956	27,9401	27,904	13,7821	13,79
11	0	65,624	65,5319	62,725	27,956	27,9371	27,892	13,759	13,768
12	0	43,75	43,7108	42,54	18,637	18,6285	18,605	13,7326	13,743
13	1	20,537	20,537	20,537	0	0	0	13,7065	13,719
14	0	43,75	43,7172	42,685	18,637	18,63	18,608	13,687	13,7
15	1	57,826	57,8256	57,826	0	0	0	13,666	13,681
16	0	26,25	26,2421	25,914	11,182	11,1814	11,176	13,6516	13,667
17	1	21,057	21,0569	21,057	11,365	11,3653	11,365	13,6453	13,661

Tabela A.9 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (operando c/ carga máxima): potências e tensões estimadas, por nó, considerando $kfu = 0,4$ e $kfu=1,0$

Nó	Tipo	P_pmed	P_est <i>kfu</i> =0,4	P_est <i>kfu</i> =1,0	Q_pmed	Q_est <i>kfu</i> =0,4	Q_est <i>Kfu</i> =1,0	V_est <i>kfu</i> =0,4	V_est <i>kfu</i> =1,0
18	0	0	0	0	0	0	0	13,6093	13,627
19*	0	0	0	0	0	0	0	13,7	13,7
20	0	47,146	45,2619	45,11	20,084	20,5092	20,446	13,6767	13,677
21	0	0	0	0	0	0	0	13,6737	13,674
22	1	52,106	50,005	49,646	0	0	0	13,6623	13,663
23	1	27,734	27,1541	27,039	10,066	10,1259	10,144	13,6599	13,66
24	0	28,288	27,6885	27,565	12,05	12,1705	12,167	13,6577	13,658
25	1	117,1	107,1993	104,77	23,778	24,0802	24,192	13,6528	13,653
26	0	0	0	0	0	0	0	13,6473	13,648
27	0	0	0	0	0	0	0	13,6436	13,644
28	0	28,288	27,7262	27,568	12,05	12,1415	12,154	13,6361	13,637
29	0	28,288	27,7281	27,563	12,05	12,1241	12,142	13,6093	13,611
30	1	376,05	279,8938	248,39	160,2	168,8781	174,97	13,573	13,575
31	0	28,288	27,7415	27,56	12,05	12,0941	12,12	13,5723	13,575
32	1	71,785	68,3795	67,118	10,229	10,2472	10,272	13,5578	13,561
33	1	120,93	111,4208	107,71	35,272	35,4752	35,776	13,5549	13,558
34	1	121,02	111,6243	107,81	30,331	30,4769	30,7	13,5533	13,556
35	1	82,922	78,5582	76,728	0	0	0	13,5529	13,556
36	0	28,288	27,7759	27,566	12,05	12,0833	12,113	13,5527	13,556
37	1	118,78	109,9394	106,09	39,041	39,2695	39,642	13,5524	13,555
38	0	47,146	45,732	45,142	20,084	20,1731	20,255	13,5507	13,554
39	0	65,624	63,3473	60,097	27,956	27,9731	28,23	13,8768	13,877
40	0	43,75	43,4659	41,769	18,637	18,6282	18,634	13,8519	13,854
41	0	65,624	65,0411	61,235	27,956	27,9214	27,934	13,8511	13,853
42	1	291,19	291,195	291,19	59,13	59,1297	59,13	13,8505	13,853
43	0	87,499	86,7552	80,095	37,275	37,2619	37,251	13,8368	13,84
44	0	43,75	43,7185	42,863	18,637	18,626	18,603	13,645	13,661
45	0	43,75	43,7184	42,863	18,637	18,626	18,603	13,645	13,661
46	1	34,708	34,708	34,708	11,408	11,408	11,408	13,6092	13,626
47	0	0	0	0	0	0	0	13,6644	13,665
48	0	47,146	45,4372	45,129	20,084	20,4345	20,413	13,6618	13,662
49	1	199,46	169,7832	163,51	49,99	51,4304	51,87	13,6594	13,66
50	0	47,146	45,4728	45,135	20,084	20,4254	20,41	13,6591	13,659
51	0	70,719	67,0017	66,2	30,126	30,8862	30,857	13,6575	13,658
52	1	34,457	33,5942	33,389	0	0	0	13,6572	13,657
53	1	39,712	38,5653	38,292	11,583	11,6585	11,683	13,6571	13,657
54	1	36,979	35,987	35,747	15,753	15,892	15,938	13,6567	13,657
55	1	44,262	42,8509	42,499	6,3071	6,3292	6,3366	13,6561	13,656
56	0	47,146	45,4393	45,132	20,084	20,4398	20,416	13,6616	13,662
57	1	49,025	47,2068	46,853	14,299	14,4213	14,455	13,6615	13,662
58	1	28,575	27,9639	27,838	7,1614	7,1918	7,2005	13,6613	13,662
59	1	45,383	43,8572	43,527	13,237	13,3397	13,37	13,6611	13,661
60	0	94,292	87,6492	86,27	40,168	41,5569	41,484	13,661	13,661

Tabela A.9 (cont.) – Resultados da estimação de estado do alimentador NEO01N4 (operando c/ carga máxima): potências e tensões estimadas, por nó, considerando $kfu = 0,4$ e $kfu=1,0$

Nó	Tipo	P_pmed	P_est		Q_pmed	Q_est		V_est	
			$kfu=0,4$	$kfu=1,0$		$kfu=0,4$	$kfu=1,0$	$kfu=0,4$	$kfu=1,0$
61	0	70,719	66,9824	66,206	30,126	30,9073	30,866	13,6605	13,661
62	1	108,03	99,2323	97,493	15,394	15,5335	15,575	13,6599	13,66
63	1	142,67	127,9681	124,37	41,611	42,5365	42,879	13,6498	13,65
64	1	266,05	217,1275	202,45	54,024	55,2667	55,922	13,636	13,637
65	1	17,232	17,0119	16,964	3,4991	3,5062	3,5083	13,6589	13,659
66	0	28,288	27,7024	27,566	12,05	12,1696	12,166	13,6558	13,656

Apêndice B

Diagramas Unifilares de Alimentadores Usados como Casos-Teste

B.1 Introdução

Apresentam-se aqui os diagramas unifilares e os dados de trechos e nós dos alimentadores-teste, usados pelo programa computacional do estimador soma de potências, implementado no trabalho.

B.2 Alimentador NEO01N4

a) Diagrama unifilar (Fig. B.1)

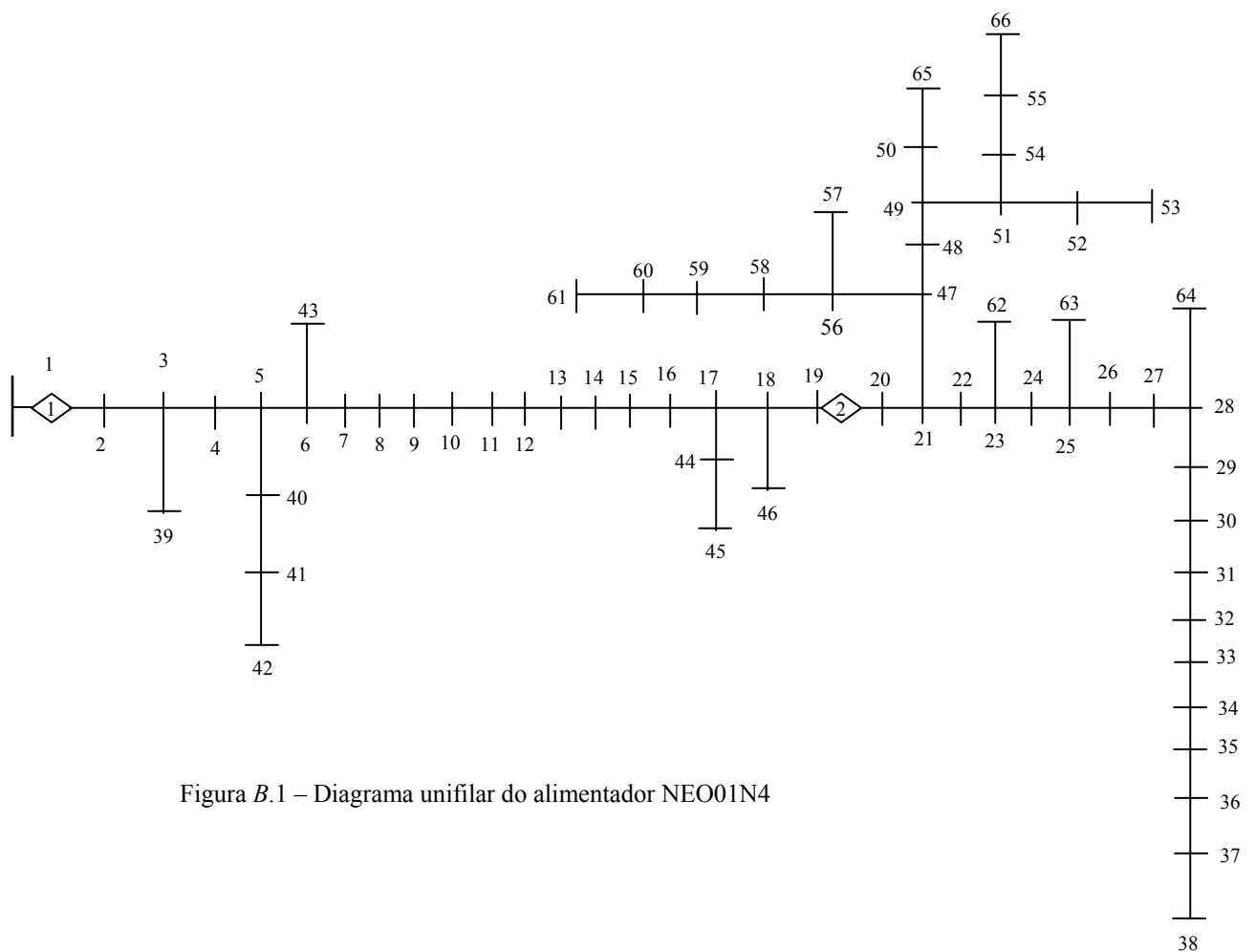


Figura B.1 – Diagrama unifilar do alimentador NEO01N4

b) Dados dos nós e dos trechos do alimentador

Tabela B.1 – Dados de nós do NEO01N4

Nó	Tipo	S/D/Q	fp
1	0	0	0
2	0	75	0,92
3	0	150	0,92
4	0	225	0,92
5	0	112,5	0,92
6	0	112,5	0,92
7	0	150	0,92
8	1	48,89	0,94
9	1	56,58	0,89
10	0	112,5	0,92
11	0	112,5	0,92
12	0	75	0,92
13	1	32,39	1
14	0	75	0,92
15	1	91,2	1
16	0	45	0,92
17	1	33,21	0,88
18	0	0	1
19	0	0	1
20	0	75	0,92
21	0	0	1
22	1	76,26	1
23	1	40,59	0,94
24	0	45	0,92
25	1	171,38	0,98
26	0	0	1
27	0	0	1
28	0	45	0,92
29	0	45	0,92
30	1	550,37	0,92
31	0	45	0,92
32	1	105,06	0,99
33	1	176,99	0,96

Tabela B.1- (cont.)

Nó	Tipo	S/D/Q	fp
34	1	177,12	0,97
35	1	121,36	1
36	0	45	0,92
37	1	173,84	0,95
38	0	75	0,92
39	0	112,5	0,92
40	0	75	0,92
41	0	112,5	0,92
42	1	459,26	0,98
43	0	150	0,92
44	0	75	0,92
45	0	75	0,92
46	1	54,74	0,95
47	0	0	1
48	0	75	0,92
49	1	291,92	0,97
50	0	75	0,92
51	0	112,5	0,92
52	1	50,43	1
53	1	58,12	0,96
54	1	54,12	0,92
55	1	64,78	0,99
56	0	75	0,92
57	1	71,75	0,96
58	1	41,82	0,97
59	1	66,42	0,96
60	0	150	0,92
61	0	112,5	0,92
62	1	158,11	0,99
63	1	208,8	0,96
64	1	389,38	0,98
65	1	25,22	0,98
66	0	45	0,92

Tabela B.2 - Dados de trechos do NEO01N4

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
1	1	2	0,239	0,3969	0,93
2	2	3	0,239	0,3969	0,21
3	3	4	0,239	0,3969	0,06
4	4	5	0,239	0,3969	0,18
5	5	6	0,3	0,4059	0,14
6	6	7	0,3	0,4059	0,12
7	7	8	0,3	0,4059	0,16
8	8	9	0,3	0,4059	0,08
9	9	10	0,3	0,4059	0,19
10	10	11	0,3	0,4059	0,24
11	11	12	0,3	0,4059	0,28
12	12	13	0,3	0,4059	0,28
13	13	14	0,3	0,4059	0,21
14	14	15	0,3	0,4059	0,23
15	15	16	0,3	0,4059	0,16
16	16	17	0,3	0,4059	0,07
17	17	18	0,3	0,4059	0,42
18	18	19	0,3	0,4059	0,22
19	19	20	0,3	0,4059	0,3
20	20	21	0,3	0,4059	0,04
21	21	22	0,3	0,4059	0,23
22	22	23	0,3	0,4059	0,05
23	23	24	0,3	0,4059	0,05
24	24	25	0,3	0,4059	0,11
25	25	26	0,3	0,4059	0,15
26	26	27	0,3	0,4059	0,1
27	27	28	0,3	0,4059	0,2
28	28	29	0,3	0,4059	0,9
29	29	30	0,3	0,4059	1,26
30	30	31	0,3	0,4059	0,04
31	31	32	0,3	0,4059	0,87
32	32	33	0,3	0,4059	0,2
33	33	34	0,3	0,4059	0,14

Tabela B.2 - (cont.)

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
34	34	35	0,3	0,4059	0,05
35	35	36	0,3	0,4059	0,03
36	36	37	0,3	0,4059	0,06
37	37	38	0,3	0,4059	1,03
38	3	39	0,239	0,3969	0,02
39	5	40	0,3	0,4059	0,03
40	40	41	0,3	0,4059	0,07
41	41	42	0,3	0,4059	0,08
42	6	43	0,3	0,4059	0,12
43	17	44	0,3	0,4059	0,09
44	44	45	0,3	0,4059	0,01
45	18	46	0,3	0,4059	0,14
46	21	47	0,3	0,4059	0,34
47	47	48	12,011	0,485	0,05
48	48	49	12,011	0,485	0,05
49	49	50	12,011	0,485	0,05
50	50	65	12,011	0,485	0,08
51	49	51	12,011	0,485	0,08
52	51	52	12,011	0,485	0,04
53	52	53	12,011	0,485	0,03
54	51	54	12,011	0,485	0,07
55	54	55	12,011	0,485	0,09
56	55	66	12,011	0,485	0,1
57	47	56	0,3	0,4059	0,26
58	56	57	0,3	0,4059	0,06
59	56	58	0,3	0,4059	0,03
60	58	59	0,3	0,4059	0,03
61	59	60	0,3	0,4059	0,03
62	60	61	0,3	0,4059	0,17
63	23	62	0,3	0,4059	0,01
64	25	63	12,011	0,485	0,24
65	28	64	0,3	0,4059	0,02

B.3 Alimentador NTU01J1

a) Diagrama unifilar (Fig. B.2)

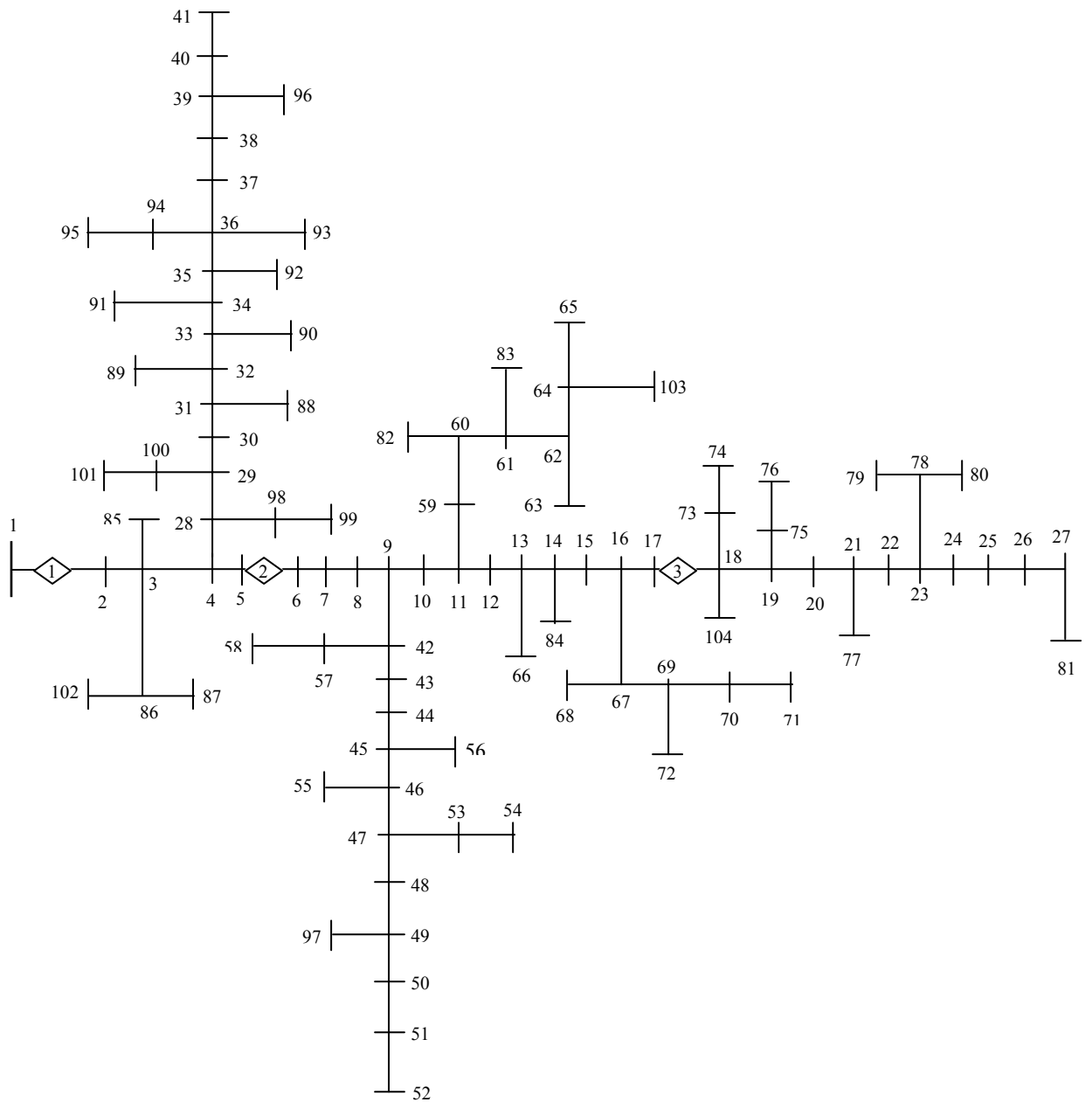


Figura B.2 – Diagrama unifilar do alimentador NTU01J1

b) Dados dos nós e dos trechos

Tabela B.3 - Dados de nós do NTU01J1

Nó	Tipo	S/D/Q	fp
1	0	0	1
2	0	0	1
3	0	0	1
4	0	0	1
5	0	0	1
6	0	75	0,92
7	0	75	0,92
8	1	50,3	0,82
9	0	0	1
10	0	75	0,92
11	0	0	1
12	1	41,8	1
13	0	0	1
14	0	0	1
15	0	75	0,92
16	0	0	1
17	0	0	1
18	0	30	0,92
19	0	0	1
20	0	150	0,92
21	0	0	1
22	0	45	0,92
23	0	0	1
24	0	75	0,92
25	0	75	0,92
26	0	75	0,92

Tabela B.3 – (cont.)

Nó	Tipo	S/D/Q	fp
27	0	0	1
28	0	0	1
29	0	0	1
30	0	75	0,92
31	0	0	1
32	1	20,3	1
33	0	0	1
34	0	0	1
35	0	0	1
36	0	0	1
37	0	15	0,92
38	0	45	0,92
39	0	0	1
40	0	75	0,92
41	0	75	0,92
42	0	0	1
43	0	75	0,92
44	0	75	0,92
45	0	0	1
46	0	0	1
47	0	0	1
48	0	112,5	0,92
49	0	0	1
50	0	75	0,92
51	0	75	0,92
52	0	75	0,92

Tabela B.4 – Dados de trechos do NTU01J1

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
1	1	2	0,1894	0,3873	0,163
2	2	3	0,1894	0,3873	0,192
3	3	4	0,1894	0,3873	0,114
4	4	5	0,1894	0,3873	0,059
5	5	6	0,1894	0,3873	0,04
6	6	7	0,1894	0,3873	0,248
7	7	8	0,1894	0,3873	0,167
8	8	9	0,1894	0,3873	0,205
9	9	10	0,1894	0,3873	0,084
10	10	11	0,1894	0,3873	0,041
11	11	12	0,1894	0,3873	0,01
12	12	13	0,1894	0,3873	0,072
13	13	14	0,1894	0,3873	0,037
14	14	15	0,1894	0,3873	0,079
15	15	16	0,1894	0,3873	0,05
16	16	17	0,1894	0,3873	0,011
17	17	18	0,1894	0,3873	0,066
18	18	19	0,1894	0,3873	0,195
19	19	20	0,1894	0,3873	0,05
20	20	21	0,1894	0,3873	0,05
21	21	22	0,1894	0,3873	0,05
22	22	23	0,1894	0,3873	0,05
23	23	24	0,1894	0,3873	0,14
24	24	25	0,1894	0,3873	0,15
25	25	26	0,1894	0,3873	0,14
26	26	27	0,1894	0,3873	0,08

Tabela B.4 – (cont.)

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
27	4	28	0,1894	0,3873	0,08
28	28	29	0,1894	0,3873	0,035
29	29	30	0,1894	0,3873	0,045
30	30	31	0,1894	0,3873	0,05
31	31	32	0,1894	0,3873	0,17
32	32	33	0,1894	0,3873	0,3
33	33	34	0,1894	0,3873	0,05
34	34	35	0,1894	0,3873	0,08
35	35	36	0,1894	0,3873	0,12
36	36	37	0,1894	0,3873	0,165
37	37	38	0,1894	0,3873	0,05
38	38	39	0,1894	0,3873	0,05
39	39	40	0,1894	0,3873	0,14
40	40	41	0,1894	0,3873	0,01
41	2	85	0,1894	0,3873	0,124
42	11	59	1,2011	0,485	0,117
43	59	60	1,2011	0,485	0,118
44	60	82	1,2011	0,485	0,2
45	60	61	1,2011	0,485	0,153
46	61	83	1,2011	0,485	0,16
47	61	62	1,2011	0,485	0,22
48	62	63	1,2011	0,485	0,05
49	62	64	1,5212	0,467	0,03
50	64	65	1,5212	0,467	0,05
51	64	103	1,5212	0,467	0,05
52	13	66	1,5212	0,467	0,174

B.4 Alimentador NEO01N6

a) Diagrama unifilar (Fig. B.3)

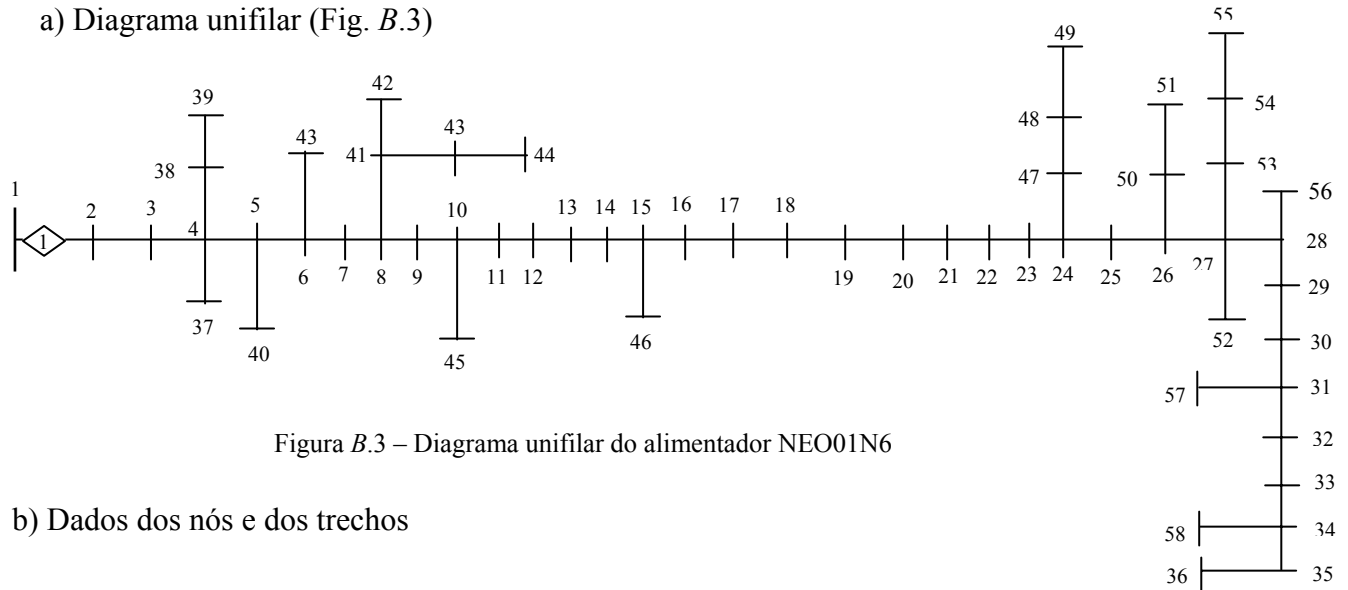


Figura B.3 – Diagrama unifilar do alimentador NEO01N6

b) Dados dos nós e dos trechos

Tabela B.5 - Dados de nós do NEO01N6

Tabela B.5 – (cont.)

Tabela B.6 – Dados de trechos do NEO01N6

Tabela B.6 – (cont.)

Nó	Tipo	S/D/Q	fp	Nó	Tipo	S/D/Q	fp
1	0	0	1	30	0	75	0,92
2	0	150	0,92	31	0	75	0,92
3	0	45	0,92	32	0	75	0,92
4	0	75	0,92	33	0	112,5	0,92
5	0	112,5	0,92	34	0	0	1
6	0	75	0,92	35	0	75	0,92
7	0	75	0,92	36	1	123,39	0,94
8	0	75	0,92	37	0	75	0,92
9	0	75	0,92	38	0	112,5	0,92
10	0	0	1	39	0	150	0,92
11	0	30	0,92	40	0	150	0,92
12	0	75	0,92	41	0	75	0,92
13	0	112,5	0,92	42	0	75	0,92
14	0	30	0,92	43	0	75	0,92
15	0	75	0,92	44	0	75	0,92
16	0	30	0,92	45	0	45	0,92
17	0	112,5	0,92	46	1	61,5	0,71
18	1	26,24	0,93	47	0	75	0,92
19	1	307,01	0,94	48	0	75	0,92
20	1	62,73	0,95	49	0	112,5	0,92
21	0	75	0,92	50	0	75	0,92
22	0	150	0,92	51	0	112,5	0,92
23	0	30	0,92	52	0	150	0,92
24	0	112,5	0,92	53	0	75	0,92
25	0	112,5	0,92	54	0	112,5	0,92
26	0	75	0,92	55	0	112,5	0,92
27	0	75	0,92	56	0	112,5	0,92
28	0	75	0,92	57	0	75	0,92
29	0	112,5	0,92	58	0	112,5	0,92

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
1	1	2	0,1894	0,3873	0,4
2	2	3	0,1894	0,3873	0,3
3	3	4	0,1894	0,3873	0,2
4	4	5	0,1894	0,3873	0,33
5	5	6	0,1894	0,3873	0,39
6	6	7	0,1894	0,3873	0,19
7	7	8	0,1894	0,3873	0,17
8	8	9	0,1894	0,3873	0,43
9	9	10	0,1894	0,3873	0,15
10	10	11	0,1894	0,3873	0,1
11	11	12	0,1894	0,3873	0,18
12	12	13	0,1894	0,3873	0,1
13	13	14	0,1894	0,3873	0,49
14	14	15	0,5827	0,4512	0,49
15	15	16	0,5827	0,4512	0,14
16	16	17	0,5827	0,4512	0,3
17	17	18	0,5827	0,4512	0,04
18	18	19	0,5827	0,4512	0,1
19	19	20	0,5827	0,4512	0,04
20	20	21	0,5827	0,4512	0,21
21	21	22	1,2011	0,485	0,08
22	22	23	1,2011	0,485	0,15
23	23	24	1,2011	0,485	0,03
24	24	25	1,2011	0,485	0,32
25	25	26	0,5827	0,4512	0,2
26	26	27	1,2011	0,485	0,12
27	27	28	1,2011	0,485	0,41
28	28	29	1,2011	0,485	0,12
29	29	30	1,2011	0,485	0,11

Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
			Ω/km	Ω/km	km
30	30	31	1,2011	0,485	0,07
31	31	32	1,2011	0,485	0,13
32	32	33	1,2011	0,485	0,02
33	33	34	1,2011	0,485	0,21
34	34	35	1,2011	0,485	0,15
35	35	36	1,2011	0,485	0,3
36	4	37	0,1894	0,3873	0,23
37	4	38	0,1894	0,3873	0,02
38	38	39	0,1894	0,3873	0,02
39	5	40	0,1894	0,3873	0,22
40	8	41	0,1894	0,3873	0,09
41	41	42	0,1894	0,3873	0,12
42	41	43	0,1894	0,3873	0,18
43	43	44	0,1894	0,3873	0,21
44	10	45	0,1894	0,3873	0,08
45	15	46	0,5827	0,4512	0,4
46	24	47	1,2011	0,485	0,2
47	47	48	1,2011	0,485	0,2
48	48	49	1,2011	0,485	0,07
49	26	50	1,2011	0,485	0,17
50	50	51	1,2011	0,485	0,26
51	27	52	1,2011	0,485	0,3
52	27	53	1,2011	0,485	0,22
53	53	54	1,2011	0,485	0,21
54	54	55	1,2011	0,485	0,12
55	28	56	1,2011	0,485	0,21
56	31	57	1,2011	0,485	0,11
57	34	58	1,2011	0,485	0,15

B.5 Alimentador NTU01J3

a) Diagrama unifilar (Fig. B.4)

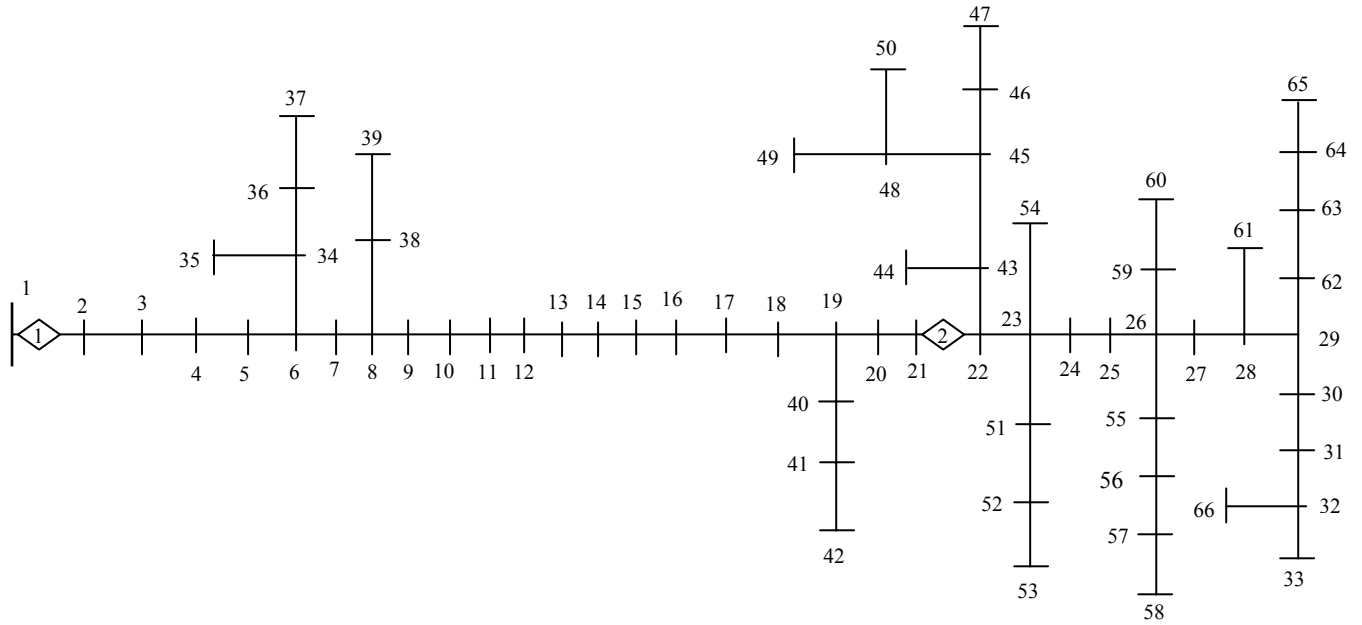


Figura B.4 – Diagrama unifilar do alimentador NTU01J3

b) Dados dos nós e dos trechos

Tabela B.7 - Dados de nós do NTU01J3				Tabela B.7 – (cont.)				Tabela B.8 – Dados de trechos do NTU01J3					Tabela B.8 – (cont.)						
Nó	Tipo	S/D/Q	fp	Nó	Tipo	S/D/Q	fp	Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.	Trecho	Ini.	Fim	R	X	Comp.
											Ω/km	Ω/km	Km				Ω/km	Ω/km	km
1	0	0	1	34	1	19,68	0,99	1	1	2	0,1894	0,3873	0,5	34	34	35	1,5212	0,467	0,09
2	0	75	0,92	35	0	30	0,92	2	2	3	0,1894	0,3873	0,12	35	34	36	1,5212	0,467	0,23
3	0	75	0,92	36	0	75	0,92	3	3	4	0,1894	0,3873	0,17	36	36	37	1,5212	0,467	0,06
4	1	55	0,89	37	1	31,57	1	4	4	5	0,1894	0,3873	0,07	37	8	38	0,3013	0,4089	0,11
5	1	22	0,91	38	1	19,27	0,89	5	5	6	0,1894	0,3873	0,04	38	38	39	0,6043	0,4352	0,14
6	0	75	0,92	39	1	143,5	0,95	6	6	7	0,1894	0,3873	0,14	39	19	40	0,1894	0,3873	0,17
7	0	75	0,92	40	0	112,5	0,92	7	7	8	0,1894	0,3873	0,28	40	40	41	0,1894	0,3873	0,04
8	0	112,5	0,92	41	0	75	0,92	8	8	9	0,1894	0,3873	0,36	41	41	42	0,1894	0,3873	0,3
9	0	150	0,92	42	0	75	0,92	9	9	10	0,1894	0,3873	0,21	42	22	43	0,6043	0,4352	0,08
10	0	150	0,92	43	0	150	0,92	10	10	11	0,1894	0,3873	0,68	43	43	44	1,5212	0,467	0,19
11	0	150	0,92	44	1	123,46	0,94	11	11	12	0,1894	0,3873	0,1	44	43	45	1,5212	0,467	0,22
12	0	75	0,92	45	0	0	1	12	12	13	0,1894	0,3873	0,01	45	45	46	1,2011	0,485	0,12
13	1	19,99	0,89	46	0	150	0,92	13	13	14	0,1894	0,3873	0,12	46	46	47	1,5212	0,467	0,11
14	1	98,26	0,98	47	0	75	0,92	14	14	15	0,1894	0,3873	0,07	47	45	48	1,2011	0,485	0,1
15	0	150	0,92	48	0	112,5	0,92	15	15	16	0,1894	0,3873	0,09	48	48	49	0,6005	0,4321	0,07
16	0	45	0,92	49	0	150	0,92	16	16	17	0,1894	0,3873	0,24	49	48	50	1,5212	0,467	0,06
17	0	150	0,92	50	0	112,5	0,92	17	17	18	0,1894	0,3873	0,04	50	23	51	0,1894	0,3873	0,14
18	0	112,5	0,92	51	0	150	0,92	18	18	19	0,1894	0,3873	0,13	51	51	52	0,1894	0,3873	0,02
19	1	20	1	52	1	64,58	0,95	19	19	20	0,1894	0,3873	0,22	52	52	53	0,1894	0,3873	0,05
20	0	75	0,92	53	0	150	0,92	20	20	21	0,1894	0,3873	0,11	53	23	54	0,1894	0,3873	0,16
21	0	0	1	54	1	43,97	0,85	21	21	22	0,1894	0,3873	0,04	54	26	55	1,5212	0,467	0,08
22	0	112,5	0,92	55	0	75	0,92	22	22	23	0,1894	0,3873	0,24	55	55	56	1,5212	0,467	0,05
23	0	15	0,92	56	1	49,2	0,86	23	23	24	0,1894	0,3873	0,15	56	56	57	1,5212	0,467	0,05
24	1	66,01	0,87	57	0	75	0,92	24	24	25	0,1894	0,3873	0,04	57	57	58	1,5212	0,467	0,09
25	0	150	0,92	58	1	50	0,91	25	25	26	0,1894	0,3873	0,11	58	26	59	1,5212	0,467	0,1
26	0	75	0,92	59	1	28,7	0,99	26	26	27	0,1894	0,3873	0,1	59	59	60	1,5212	0,467	0,03
27	1	50,4	0,97	60	0	75	0,92	27	27	28	0,1894	0,3873	0,16	60	28	61	0,1894	0,3873	0,03
28	0	75	0,92	61	1	1356,48	0,95	28	28	29	0,1894	0,3873	0,05	61	29	62	0,1894	0,3873	0,11
29	0	0	1	62	0	75	0,92	29	29	30	1,5212	0,467	0,09	62	62	63	0,1894	0,3873	0,08
30	1	156,21	1	63	1	45,51	0,94	30	30	31	1,5212	0,467	0,04	63	63	64	0,1894	0,3873	0,04
31	0	112,5	0,92	64	0	112,5	0,92	31	31	32	1,5212	0,467	0,13	64	64	65	0,1894	0,3873	0,01
32	0	75	0,92	65	1	57,91	0,86	32	32	33	1,5212	0,467	0,29	65	32	66	1,5212	0,467	0,15
33	1	151,54	0,96	66	0	112,5	0,92	33	6	34	1,5212	0,467	0,1						