SAULO AUGUSTO RIBEIRO PIERETI

**Configurador de Redes Baseado na Representação Nó-
Profundidade Para Efeito de Estimação de Estado**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto
London Junior

São Carlos
2007

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

P618c Piereti, Saulo Augusto Ribeiro
Configurador de redes baseado na representação nó-
profundidade para efeito de estimação de estado / Saulo
Augusto Ribeiro Piereti ; orientador João Bosco Augusto
London Junior. -- São Carlos, 2007.

Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Sistemas
Elétricos de Potência) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

1. Sistemas elétricos de potência. 2. Operação em
tempo-real. 3. Estimação de estado. 4. Configurador de
redes. 5. Representação no-profundidade. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SAULO AUGUSTO RIBEIRO PIERETI**

Dissertação defendida e julgada em 17/08/2007 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **JOÃO BOSCO AUGUSTO LONDON JUNIOR (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovado

Prof. Dr. **ALEXANDRE CLAUDIO BOTAZZO DELBEM**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP) Aprovado

Prof. Dr. **ARTURO SUMAN BRETAS**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS) Aprovado

Prof. Associado **GERALDO ROBERTO MARTINS DA COSTA**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico este trabalho a toda minha família, especialmente à minha esposa Patrícia Piereti, aos meus pais Nelson Piereti e Eunice Ribeiro, à minha avó Iracema Ribeiro, aos meus irmãos Douglas Piereti e Luana Gasparotto, ao amigo Deoclides de Lima e a memória de Ecliton Ribeiro.

Agradecimentos

Ao professor Dr. João Bosco A. London Jr. pela orientação, ensinamentos e conselhos profissionais e pessoais.

Ao professor Dr. Alexandre Cláudio B. Delbem, pela co-orientação, e apoio a este projeto de pesquisa.

Ao professor Dr. Luiz Fernando C. Alberto, pelo ensinamento e amizade.

Aos professores e colegas do LACO (Laboratório de Análise Computacional em Sistemas Elétricos de Potência), pelo companheirismo.

Aos amigos Raphael Augusto, Robson Pereira, Diogo Rabelo, Wallisson Figueiredo, Roberto Inoue, Marcelo Nanni, Eduardo Marmo, Antonio Carlos, Rafael Borges, Carlisson Ramos, Elmer Pablo, Moussa Mansour, Marcos Oliveira, Michael Trento, Lincon Moraes, Uyre Barros e Ricardo Monteiro.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

PIERETI, S. A. R. **Configurador de Redes Baseado na Representação Nó-Profundidade Para Efeito de Estimação de Estado**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

A modelagem em tempo real dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é extremamente importante para se obter uma operação em tempo real segura e confiável dos mesmos. O Configurador de Redes (CR) é uma ferramenta fundamental, para modelagem em tempo real dos SEP. A função do CR é determinar, em tempo real, a topologia atual da rede e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo. Para isso, o configurador processa medidas lógicas, que consistem em estados de chaves e disjuntores, bem como dados armazenados em um banco de dados estático, que descreve a conexão dos equipamentos do sistema com as seções de barramento. Em razão de os CRs exigirem algoritmos de busca em um grafo, o desempenho desses algoritmos torna-se fortemente afetado pela forma com que as árvores são computacionalmente representadas. Propõe-se, neste trabalho, um CR “Tracking”, para efeito de estimação de estado, que se baseia em uma nova forma de representar árvores, denominada Representação Nó-Profundidade (RNP). A RNP permite um acesso direto para cada nó de um grafo e pode representar eficientemente árvores (grafos conexos e acíclicos) e florestas (um grafo com uma ou mais árvores). O CR proposto possui as seguintes características: (i) A RNP possibilita uma rápida atualização da topologia da rede, no modelo barra-ramo; (ii) Esta estrutura também Permite a realização das etapas configuração de subestação e de rede ao mesmo tempo, diminuindo assim o tempo de processamento necessário para a obtenção do modelo barra-ramo. Para isso, o CR proposto representa cada seção de barramento do SEP como nó de um grafo e usa a RNP e outras duas estruturas de dados, que serão apresentadas no Capítulo 5; (iii) Possibilita a associação dos medidores aos

componentes do SEP, no modelo barra-ramo, de forma direta. Para isso, o CR proposto usa a RNP e cria barras fictícias para representar os componentes shunt do SEP. Testes realizados comprovam a eficiência e a robustez do configurador proposto tendo em vista os resultados coerentes obtidos para todos os testes, mesmo para os casos em que a mudança nos estados dos dispositivos seccionadores acarretava uma alteração drástica na rede elétrica.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Operação em Tempo-Real, Estimação de Estado, Configurador de Redes e Representação Nó-Profundidade.

Abstract

PIERETI, S. A. R. **Tracking Network Topology Processor Using Node-depth Representation for State Estimation.** 2007. Dissertation (Máster study) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

On-line models of power system networks have a wide variety of critical uses, covering from security monitoring and control to market operation. Network Topology Processor (NTP) is a key tool in providing robust and reliable on-line model of power networks. The function of NTP is the determination of the Bus/Branch Topology Model (BBTM) of the network and the assignment of metering devices to the components of the BBTM. In order to do this, the NTP processes: logical measurements that consist of switching-device (breakers and switchers) status; as well as a static data-base describing the network connectivity in terms of bus-sections and switching-devices. Since NTPs require search algorithms for graphs, their performance can be drastically affected by the adopted computational graph representation. This work proposes a new tracking NTP for state estimation purposes, that uses a new graph representation named Node-depth Representation (NDR). This encoding enables a straightforward access to each one of the graph nodes and can efficiently represent trees (acyclic and connected graphs) and forests (a graph with one or more trees). The proposed tracking NTP has the following characteristics: (i) Using NDR for representation of a BBTM of the network, this NTP can track, over time, the changes of the network connectivity in a very direct and fast way; (ii) Processes both steps Substation and Network Configurations in the same time, reducing the CPU time necessary to obtain the BBTM. In order to do this, the proposed NTP represents each bus-section as a graph node and uses NDR and other two data structures, which will be presented in the chapter 5; and (iii) To assign metering devices to the components of the BBTM, in a straightforward way, the proposed NTP creates additional buses, called Fictitious Buses, to represent shunt

devices. The results of several tests have shown the proposed NTP is reliable, fast and suitable for real-time operation.

Key-words: Power System, Real-Time Operation, State Estimation, Network Topology Processor and Node-Depth Representation.

Lista de Figuras

Figura 2.1:	Exemplo de erro topológico múltiplo do tipo seccionamento de barra.	13
Figura 3.1	Sistema Genérico para análise do configurador de redes.	19
Figura 3.2	Resultado do processo do configurador de subestação, para subestação1 em análise do sistema apresentado na Figura 3.1.	20
Figura 3.3	Subestações com as respectivas barras.	20
Figura 3.4	Resultado do processamento da fase configuração de rede.	21
Figura 3.5	Exemplos de arranjos de medidores de potência (MW-MVAr).	24
Figura 3.6	Efeito da redução topológica da rede na atribuição de medida.	25
Figura 4.1	Exemplo de um grafo.	30
Figura 4.2	Exemplo de um grafo e uma árvore geradora indicada pelas linhas espessas.	33
Figura 4.3	Representação Nó-Profundidade do grafo da Figura 4.2, considerando o nó 1 como raiz desta árvore.	33
Figura 4.4	Ilustração dos passos do operador 1: (a) <i>Ade</i> , <i>Apara</i> e RNP; (b) <i>Atmp</i> e RNP; e (c) <i>Ade'</i> , <i>Apara'</i> e RNP.	35
Figura 4.5	Exemplo para determinar o <i>Atmp2</i> . As linhas espessas destacam os nós de <i>r</i> ate <i>p</i> . Os valores da profundidade, mostrados nesta figura, consideram a profundidade do nó <i>a</i> igual a zero: (a) <i>Apara</i> e RNP; (b) Sub-árvores enraizadas entre os nós <i>r</i> e <i>p</i> “ <i>Atmp1</i> ”; (c) RNP da sub-árvore “ <i>Atmp2</i> ”.	37
Figura 4.6	Representação da matriz <i>D</i> (equação (4.1)), através de uma lista de ponteiros para vetores.	38
Figura 4.7	Representação de uma matriz com linhas iguais (equação (4.2)), através de uma lista de ponteiros para vetores.	39
Figura 4.8	Representação de uma estrutura com vetores de tamanhos variados através de uma lista de ponteiros para vetores.	40

Figura 4.9	RNP da Floresta da Figura 4.4(c), através de uma lista de ponteiros para matrizes.	41
Figura 5.1	Tipos de seções de barramento.	43
Figura 5.2	Sistema genérico para análise do configurador de redes proposto.	46
Figura 5.3	Matriz conexão topológica do SEP apresentado na Figura 5.2.	46
Figura 5.4	Matriz conexão topológica do SEP apresentado na Figura 5.2, (a) após o armazenamento, na estrutura RNP, dos nós das árvores energizadas, (b) após o armazenamento, na estrutura RNP, dos nós que não estão em árvores energizada.	49
Figura 5.5	(a) Floresta inicial; (b) Árvores do SEP apresentado na Figura 5.2 em forma de RNP; (c) Árvores armazenadas na floresta.	49
Figura 5.6	Estrutura AR do SEP apresentado na Figura 5.2.	51
Figura 5.7	Estrutura RBS.	52
Figura 5.8	Exemplo da construção de uma nova árvore, utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com uma árvore; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com duas árvores.	54
Figura 5.9	Exemplo da união de duas árvores utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.	55
Figura 5.10	Exemplo da união de uma sub-árvore à outra árvore, utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com duas árvores.	57
Figura 5.11	Exemplo da reordenação de nós de uma mesma árvore, utilizando o operador 2; (a) Floresta inicial com uma árvore; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.	58
Figura 5.12	Exemplo da união de duas árvores utilizando o operador 2; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.	59
Figura 5.13	(a) Modelo barra-ramo do SEP da Figura 5.2; (b) RNP, AR e RBS do SEP da Figura 5.2.	61
Figura 5.14	Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 1.	64

Figura 5.15	Exemplo do uso do operador 1 “União de duas árvores” (Ciclo 1).	65
Figura 5.16	Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 2.	66
Figura 5.17	Exemplo do uso do operador 2: “Reordenar nós de uma mesma árvore” (Ciclo 2).	67
Figura 5.18	Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 3.	68
Figura 5.19	Exemplo do uso do operador 1: “Construir uma nova árvore” (Ciclo 3).	69
Figura 5.20	Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 4.	70
Figura 5.21	Exemplo do uso do operador 2: “Unir duas árvores” (Ciclo 4).	71
Figura 5.22	Arranjos de medidores utilizados neste trabalho.	72
Figura 5.23	Possibilidades de associação de medidores relativo ao arranjo (a) da Figura 5.22: (a) ligações entre SBBs, (b) ligação entre SBB e componente shunt.	73
Figura 5.24	Possibilidades de associação de medidores relativo ao arranjo (b) da Figura 5.22: (a) ligações entre SBBs, (b) ligação entre SBB e componente shunt.	73
Figura 5.25	Sistema genérico para análise do configurador de redes proposto, incluindo arranjos de medidores	75
Figura 5.26	(a) Modelo barra-ramo do SEP da Figura 5.25, incluindo os arranjos de medidores; (b) RNP, AR e RBS do SEP da Figura 5.25.	76
Figura 5.27	Ciclo 1: associação de medidores.	78
Figura 5.28	Ciclo 2: associação de medidores.	79
Figura 5.29	Ciclo 3: associação de medidores.	80
Figura 5.30	Ciclo 4: associação de medidores.	81
Figura 6.1	Arranjo número 1.	86
Figura 6.2	Arranjo número 2.	87
Figura 6.3	Arranjo número 3.	88
Figura 6.4	Arranjo número 4.	89
Figura 6.5	Sistema de 6 barras do IEEE, sem associação de arranjos de subestação.	91

Figura 6.6	Sistema de 14 barras do IEEE, sem associação de arranjos de subestação.	91
Figura 6.7	Sistema de 6 barras do IEEE em nível de seções de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores.	92
Figura 6.8	Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7; (a) Modelo barra-ramo com medidas; (b) RNP, AR e RBS.	92
Figura 6.9	Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após abertura dos dispositivos seccionadores 26 e 27 (1ª Seqüência); (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.	93
Figura 6.10	Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após o processamento das mudanças descritas na 1ª e 2ª seqüências; (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.	94
Figura 6.11	Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após o processamento das mudanças descritas na 1ª, 2ª e 3ª seqüências; (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.	95
Figura 6.12	Sistema de 14 barras do IEEE em nível de seções de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores.	96
Figura 6.13	Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12.	97
Figura 6.14	Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após abertura dos dispositivos seccionadores 7, 12, 30, 36, 41, 55 e 82 (1ª seqüência).	98
Figura 6.15	Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após a abertura dos dispositivos seccionadores 28, 29, 32 e 33. Partindo do estado dos dispositivos seccionadores apresentados no sistema da Figura 6.12.	99
Figura 6.16	Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após o processamento das mudanças descritas na 1ª e 2ª seqüências.	99
Figura A1	Sistema Genérico para análise do bando de dados de entrada.	115

Figura A2	Banco de dados de entrada do configurador de redes proposto, para o SEP apresentado na Figura A.1.	116
Figura B1	Sistema de 6 Barras do IEEE.	119
Figura B2	Banco de dados de saída do configurador de redes proposto, para o SEP apresentado na Figura B.1.	120

Lista de Tabelas

Tabela 31:	Legenda.	18
Tabela 3.2	Dados do sistema após o processamento da fase configuração de subestação.	21
Tabela 3.3	Dados do sistema após o processamento da fase configuração de rede.	22
Tabela 4.1	Grau de cada um dos nós do grafo apresentado na Figura 4.1.	30
Tabela 5.1	Legenda.	45
Tabela 6.1	Legenda.	90
Tabela A.1	Índice e Significado do bando de dados da Figura A.2.	117
Tabela A.2	Índice e Significado do bando de dados da Figura B.2.	121

Lista de Abreviaturas e Siglas

SEP	–	Sistemas Elétricos de Potência.
SCADA	–	Supervisory Control and Data Acquisition.
EMS	–	Energy Managment System.
RNP	–	Representação Nó-Profundidade.
EGs	–	Erros Grosseiros.
WLS	–	Weighted Least Squares.
AR	–	Arestas Reservas.
RBS	–	Representação Barra-Subestação.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Proposição	3
1.2	Descriminação dos Próximos Capítulos	4
2	Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência	5
2.1	Etapas envolvidas no processo de estimação de estado em SEP	6
2.2	Erros topológicos e erros de parâmetros	11
2.2.1	Tipos de erros topológicos	12
2.2.2	Tratamento dado aos erros topológicos	13
3	Configurador de Redes	17
3.1	Configurador de Redes Tradicional	18
3.1.1	Configuração de Subestação	18
3.1.2	Configuração de Rede	21
3.1.3	Tabulação de Resultados	22
3.2	Redução da rede	23
3.2.1	Arranjos de medidores	24
3.3	Configurador de Redes para o Estimador de Estado Generalizado	26
4	Representação Nó-Profundidade	29
4.1	Alguns conceitos da teoria de grafos	29
4.2	Representação Nó Profundidade	31
4.2.1	Operador 1	34
4.2.2	Operador 2	36
4.3	Detalhes computacionais da RNP	38
5	Configurador de Redes “Tracking” Usando a Representação Nó-Profundidade	43
5.1	Obtenção e atualização da topologia da rede no modelo barra-ramo	44
5.1.1	Armazenando os dados na estrutura RNP	47
5.1.2	Armazenando os dados na estruturas AR	50

5.1.3	Armazenando os dados na estrutura RBS	51
5.2	Funções dos operadores 1 e 2, para o configurador de redes proposto	53
5.2.1	Funções do operador 1	53
5.2.2	Funções do operador 2	57
5.3	Saída do configurador de redes	60
5.4	Exemplos	60
5.4.1	Inicializando as estruturas RNP, AR e RBS	60
5.4.2	Atualizando as estruturas	63
5.4.3	Inicializando as estruturas RNP, AR e RBS, com associação de medidores	71
5.4.4	Atualizando as estruturas, com associação de medidores	77
5.5	Análise de complexidade do algoritmo de atualização da topologia do SEP no modelo barra-ramo	82
5.6	Comparação da complexidade do algoritmo de atualização da topologia do SEP proposto com algoritmos convencionais de busca em grafo	84
6	Testes e Análise de Resultados	85
6.1	Arranjos de barramento de interligação	85
6.2	Testes com os sistema de 6 e 14 barras do IEEE	90
6.3	Análise dos resultados	100
7	Conclusões e Perspectivas Futuras	101
7.1	Perspectivas Futuras	102
	Referências Bibliográficas	105
	Anexo A: Banco de dados de entrada do configurador de redes proposto	115
	Anexo B: Banco de dados de saída do configurador de redes proposto	119

Capítulo 1

Introdução

A modelagem em tempo real dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) é extremamente importante para se obter uma operação em tempo real segura e confiável dos mesmos. As ferramentas fundamentais, para a modelagem em tempo real dos SEP, são o Configurador de Redes e o Estimador de Estado.

A função do Configurador de redes é determinar, em tempo real, a topologia atual da rede e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo¹. Para isso, o configurador processa medidas lógicas, que são obtidas continuamente pelo sistema SCADA (do inglês “Supervisory Control and Data Acquisition”) e que consistem em estados de chaves e disjuntores, bem como de dados armazenados em um banco de dados estático, o qual descreve as conexões dos equipamentos do sistema (geradores, transformadores, cargas, capacitores, linhas, transformadores de corrente e de potencial, medidores, etc.) com correspondentes seções de barramento.

Considerando como correta a topologia do SEP, obtida pelo configurador de redes, bem como do conjunto disponível de medidas analógicas (fluxo de potência ativa e reativa nas linhas, injeção de potencia ativa e reativa e algumas magnitudes de tensão nas barras), o estimador de estado permite determinar as variáveis de estado (tensões complexas) nas barras do SEP.

Deve-se destacar que além do estimador de estado, outros aplicativos de um sistema de gerenciamento de energia (EMS – do inglês Energy Managment System) fazem uso da topologia do SEP obtida pelo configurador de redes (MONTICELLI, 1999), como por exemplo: análise de contingências, fluxo de potência do operador, fluxo de potência ótimo, previsão de carga por barra, etc.

¹ O modelo barra-ramo corresponde ao diagrama unifilar do SEP, onde as barras representam as subestações ou usinas geradoras e os ramos as linhas de transmissão ou transformadores.

O configurador de redes tradicional baseia-se em algoritmos de busca em grafo e desenvolve-se normalmente em três fases (SASSON et al., 1973; DYLIACCO; RAMARAO; WEINER, 1973). Na primeira fase, conhecida como Configuração de Subestação, as seções de barramento de cada subestação são processadas, para determinar se estão conectadas por dispositivos seccionadores (chaves e/ou disjuntores). Desta forma, todas as seções de barramento envolvendo uma barra² do SEP, conectadas por dispositivos seccionadores fechados, irão compor uma única barra do SEP no modelo barra-ramo. A segunda fase do processo recebe o nome de Configuração de Rede, na qual se identificam possíveis ilhamentos do SEP. Nesta fase, processam-se as barras do SEP, determinadas na fase anterior, para verificar se as mesmas estão conectadas, através de seccionadores fechados, a equipamentos série (linhas de transmissão e transformadores). Essas conexões serão representadas como ramos do SEP, no modelo barra-ramo. A fase final do processo é a Tabulação de Resultados, que consiste da tabulação de todos os equipamentos conectados às barras do SEP, no modelo barra-ramo. Vale destacar que as tabelas devem ser estruturadas de tal forma que os programas subsequêntes tenham um fácil acesso aos resultados.

Quando o Configurador de Redes é utilizado para fins de estimação de estado, além da topologia da rede, o mesmo deve associar as medidas realizadas nas subestações aos devidos componentes no modelo barra-ramo.

Em um configurador tradicional, o mecanismo utilizado para realizar essa última tarefa pode ser interpretado como um processo de redução de rede, isto é, realiza-se uma transformação da matriz Jacobiana, que representa o modelo do SEP em termos de seções de barramento, em uma matriz Jacobiana representando o modelo barra-ramo do SEP (MONTICELLI, 1999).

Para obter a topologia inicial de um SEP, o configurador de redes deve processar todos os dispositivos seccionadores disponíveis. Depois dessa “inicialização”, o configurador será executado novamente somente na ocorrência de mudanças da posição de dispositivos seccionadores.

² Podendo ser barra de operação ou de transferência (Resolução (RS-SE-306/78)).

1.1 Proposição

Os primeiros configuradores desenvolvidos possuem limitações de desempenho, pois não possibilitam uma atualização eficiente da topologia, isto é, mesmo na ocorrência de uma alteração pequena no modelo barra-ramo, todo o processo de configuração de redes é executado novamente (GODERYA et al., 1980; BERTRAN, 1982).

Para superar tal limitação, foram desenvolvidos os chamados Configuradores “Tracking” que, armazenando a configuração proveniente da última execução, possibilitam uma rápida atualização da topologia da rede, na ocorrência de pequenas alterações.

O conceito de Configurador “Tracking” foi introduzido por Prais e Bose (1988). Em (YEHSAKUL; DABBAGHCHI, 1995) foi proposto um novo Configurador “Tracking”, que atualiza a topologia da rede de uma forma mais rápida, aplicando localmente um algoritmo de busca em profundidade.

Em razão de os configuradores de redes exigirem algoritmos de busca em grafo, o desempenho desses algoritmos torna-se fortemente afetado pela forma com que as árvores³ são computacionalmente representadas.

Este trabalho propõe um configurador de redes “*Tracking*”, para efeito de estimação de estado, que se baseia em uma nova forma de representar árvores, denominada Representação Nó-Profundidade (RNP). Abordagens baseadas na RNP, para problemas que requerem manipulação de grafos (redes), têm apresentado melhor desempenho computacional, em relação aos métodos que utilizam outras estruturas de dados (DELBEM et al., 2004). No configurador proposto, cada seção de barramento, envolvendo uma barra do SEP, é representada por um nó; e as ligações entre essas seções de barramento são representadas por arestas de um grafo. A RNP permite um acesso direto para cada nó de um grafo e pode representar eficientemente árvores e florestas (um grafo com uma ou mais árvores (DIESTEL, 2005)). Conseqüentemente, um configurador baseado na RNP torna-se muito útil para análise e atualização da topologia de um SEP.

³ Uma árvore é um grafo conexo acíclico.

O configurador de redes proposto possui as seguintes características:

- Permite a realização das etapas configuração de subestação e de rede ao mesmo tempo, diminuindo assim o tempo de processamento necessário para a obtenção do modelo barra-ramo. Para isso, o configurador proposto representa cada seção de barramento, envolvendo uma barra do SEP, como nó de um grafo e faz uso da RNP e de outras duas estruturas de dados, que serão apresentadas no Capítulo 5;
- Possibilita a associação dos medidores aos componentes do SEP, no modelo barra-ramo, de forma direta. Para isso, usa a RNP e cria barras fictícias para representar os componentes shunt do SEP;

A eficiência do configurador de redes proposto foi comprovada através de diversos testes realizados com os sistemas de 6 e 14 barras do IEEE (Capítulo 6), associados a arranjos de barramento de subestações do Sistema Interligado Sudeste do Brasil.

1.2 Organização da Dissertação

O capítulo 2 apresenta todas as etapas envolvidas no processo de estimação de estado em SEP e uma objetiva revisão bibliográfica sob o tema. O capítulo 3 descreve detalhadamente o configurador de redes tradicional e suas etapas, bem como o configurador de redes para o estimador de estado generalizado. Conceitos da teoria de grafos e da RNP, proposta por Delbem et al. (2004), estão descritas no Capítulo 4. O capítulo 5 explica o configurador de redes proposto, juntamente com exemplos da sua aplicação. O capítulo 6 apresenta testes avaliando a eficiência do configurador de redes proposto. Conclusões e as perspectivas de pesquisas futuras estão expostas no capítulo 7. Existem ainda dois Anexos descrevendo os arquivos de entrada e saída do configurador proposto.

Capítulo 2

Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

A estimação de estado em SEP consiste na obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP (tensões complexas nas barras do sistema), através de um conjunto redundante de medidas analógicas com ruído.

Em razão de ser de fundamental importância, para a realização das funções relacionadas à segurança da operação dos SEP, diversas pesquisas têm sido realizadas, ao longo das últimas décadas, visando a aumentar a confiabilidade do processo de estimação de estado em SEP.

A partir dos primeiros trabalhos publicados por Schweppe, no final da década de 60 e início de 70 (SCHWEPPE; WILDES; RON, 1968; SCHWEPPE; WILDES; 1970; SCHWEPPE; RON, 1970; SCHWEPPE, 1970), os quais delinearam vários conceitos e a natureza geral do problema, a estimação de estado em SEP tornou-se alvo de inúmeras pesquisas. Em trabalhos como (COUTTO FILHO et al., 1990; WU, 1990; BOSE et al., 1987), tem-se uma vasta bibliografia em relação aos estudos sobre estimação de estado em SEP, entre os anos de 1968 e 1989.

No IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005, realizado em São Francisco, Califórnia – Estados Unidos, organizou-se uma seção técnica destinada à análise dos problemas relacionados à estimação de estado em SEP, intitulada: “*State Estimation in Practice*”, na qual se afirmou que a grande maioria dos estimadores de estado já instalados, se não todos, ainda não produzia uma base de dados confiável, para a realização da análise e monitoração de segurança dos SEP.

Assim, embora tenha sido tema de inúmeras pesquisas, a estimação de estado em SEP representa ainda um desafio aos pesquisadores, no sentido da busca de ferramentas que possibilitem contornar os problemas encontrados, na implementação prática dos estimadores de estado.

2.1 Etapas envolvidas no processo de estimação de estado em SEP

O processo de estimação de estado em SEP é tradicionalmente dividido em quatro etapas (MONTICELLI, 1999):

- 1º Etapa: Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra-ramo (Configurador de Redes);
- 2º Etapa: Análise e restauração da observabilidade do sistema;
- 3º Etapa: Estimação de estado;
- 4º Etapa: Processamento de erros grosseiros (EGs) em medidas analógicas.

Todas as etapas estão descritas nas próximas subseções, com uma objetiva revisão bibliográfica.

1º Etapa: Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra-ramo

A partir das medidas lógicas, bem como de informações quanto ao tipo e à localização dos medidores instalados no sistema, o configurador de redes permite determinar a topologia e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo, que corresponde ao diagrama unifilar da rede, onde as barras são as subestações ou usinas geradoras e os ramos são as linhas de transmissão ou transformadores. Cada barra deve ser identificada juntamente com sua geração, suas cargas e dispositivos em derivação. A conectividade entre as barras, devido à presença de linhas de transmissão e transformadores, deve também ser descrita. Cabe ainda, ao configurador, identificar ilhamentos e descartar as ilhas que não têm geração, incluindo barras e ramos isolados.

As informações processadas pelo configurador de redes são modeladas ao nível de seção de barramento (representação física dos elementos do sistema).

Devido à importância do processo de obtenção da topologia do sistema para análise de redes, a partir de 1973 diversos estudos vêm sendo desenvolvidos na busca por configuradores de redes confiáveis (SASSON et al., 1973; DY LIACCO; RAMARAO; WEINER, 1973).

A limitação dos primeiros configuradores desenvolvidos está no fato de que não possibilitavam uma atualização da topologia, isto é, mesmo na ocorrência de uma alteração pequena no modelo barra-ramo, dava-se início a todo o processo de configuração de redes (GODERYA; METWALLY; MANSOUR, 1980; BERTRAN; CORBELL, 1982).

Em Bose e Clements (1987), todo o processo da obtenção da topologia é descrito, juntamente com suas fases, baseado em Sasson et al. (1973). As fases descritas no processo são as seguintes: configuração de subestação, configuração de rede e tabulação dos resultados.

Tomando por base o trabalho de Bose e Clements (1987), Prais e Bose (1988) introduziram o conceito de Configurador "Tracking", que permite a atualização da topologia da rede, em tempo real, armazenando informações de ciclos passados. Tal configurador desenvolvia-se mais lentamente que os convencionais, quando aplicado pela primeira vez, porém com maior velocidade, quando aplicada para atualização da topologia após a mudança nos estados de dispositivos seccionadores.

Yehsakul e Dabbaghchi (1995) propuseram um novo Configurador "Tracking" que aplica localmente um algoritmo de busca em profundidade, possibilitando a atualização da topologia de uma forma bastante rápida.

2º Etapa: Análise e Restauração da Observabilidade do Sistema

Uma vez obtida a topologia do sistema, no modelo barra-ramo, a próxima etapa é verificar se é possível, através das medidas analógicas e virtuais¹ disponíveis, determinar as variáveis de estado em todas as barras do sistema. Em caso afirmativo, o sistema é dito observável. Caso contrário, a falta de medidas pode ser suprida, em algumas situações, por pseudo-medidas², através das quais o sistema se torna observável como um todo. Este processo é denominado restauração da observabilidade.

¹ São medidas de injeção nula em barras de passagem, isto é, com injeção líquida de potência igual a zero.

² Dados de previsão de carga, previsão de geração, dados históricos, etc, que fazem parte do banco de dados do centro de operação.

Uma alternativa para a situação em que o sistema não é observável como um todo é determinar as partes observáveis do sistema, isto é, as “*ilhas observáveis*”.

O método para análise de observabilidade, baseado em conceitos da teoria de controle linear (FETZER; ANDERSON, 1975), mostrou-se inviável para aplicação em tempo real, por requerer um grande esforço computacional.

De acordo com Krumpholz, Clements e Davis (1980), um sistema de potência é topologicamente observável, com relação a um conjunto de medidas, unicamente se existir, associada a tal sistema, uma árvore que, além de relacionar todas as barras da rede, possua uma medida distinta associada a cada um de seus ramos. A partir dessa definição de observabilidade, denominada “Observabilidade topológica”, Krumpholz, Clements e Davis (1980) desenvolveram um algoritmo para análise de observabilidade baseado na teoria de grafos.

Quintana et al. (1982a), através do conceito de Observabilidade topológica, propôs um algoritmo baseado na teoria de “*Matroid Intersection*”, que é uma forma diferenciada de representar grafos.

Monticelli e Wu (1985) desenvolveram um método numérico, baseado na fatoração triangular da matriz ganho, o qual permite testar a observabilidade da rede e, caso o sistema não seja observável como um todo, possibilita a identificação das ilhas observáveis. O método permite também a restauração da observabilidade, através de pseudo-medidas.

Slutsker e Scudder (1987) propuseram uma metodologia baseada na redução simbólica da matriz Jacobiana, o qual se considera apenas a posição dos elementos não nulos dessa matriz. Chen (1990) apresenta uma modificação do método proposto por Slutsker e Scudder (1987), na qual os elementos não nulos da matriz Jacobiana são considerados com valores inteiros.

Baseado na análise topológica e numérica, Contaxis e korres (1988), desenvolveram um algoritmo híbrido. As ilhas formadas apenas por medidas de fluxo são processadas via método topológico e, em seguida, procede-se à análise numérica sobre as barras fronteiras das ilhas de fluxo, para se determinar a observabilidade completa do sistema. Em 1991, Monticelli e Garcia (1991) introduziram a modelagem de elementos de impedância zero à estimação de estado, estendendo assim, os conceitos de observabilidade para as novas variáveis.

A partir da triangulação da matriz ganho e dos conceitos de caminhos de grafos, Bretas (1996) desenvolveu um novo método para analisar observabilidade,

identificar ilhas observáveis e restaurar a observabilidade completa da rede. As sub-rotinas requeridas para implementação do método são idênticas às rotinas disponíveis nos programas destinados à estimação de estado, o que facilita a sua implementação.

Gou e Abur (2000) desenvolveram um procedimento numérico para testar a observabilidade (identificação de ilhas observáveis e restauração da observabilidade), baseado na análise dos fatores triangulares da matriz ganho. Em Gou e Abur (2001), a metodologia foi estendida para projeto de planos de medição.

Em Simões Costa, Lourenço e Clements (2002), o conceito de observabilidade topológica, proposto por Krumpholz, Clements e Davis (1980), foi estendido aos elementos de impedância nula e chaves.

Em Gou (2005) desenvolveu-se um método para análise de observabilidade baseado na análise dos fatores triangulares da matriz aumentada de Hachtel. Na verdade, esse método é uma extensão do método proposto em Gou; Abur (2000). Já em Gou (2006) apresentou-se um novo algoritmo de análise de observabilidade baseado no processo de eliminação de Gauss aplicado a matriz Jacobiana de medidas.

Com fundamento no cálculo de espaços nulos da matriz Jacobiana, através das transformações ortogonais (CASTILLO et al., 2005), desenvolveu-se uma nova técnica algébrica para identificação de ilhas observáveis e restauração da observabilidade (CASTILLO et al., 2006).

Em London Jr. et al. (2007) foi desenvolvido um método que permite, de forma bastante rápida e simples, análise e restauração da observabilidade na ocorrência de perda de medidas. Tal método baseia-se na fatoração triangular da matriz jacobiana.

3º Etapa: Estimação de Estado

Considerando a topologia do sistema, obtida pelo configurador de redes, e através dos seus parâmetros armazenados no banco de dados, bem como do conjunto disponível de medidas com ruído, o estimador de estado permite determinar as variáveis de estado de todas as barras do sistema.

A estimação de estado consiste no cálculo de variáveis de estado desconhecidas, através de um conjunto de medidas não exatas. Destarte, a estimação obtida para as variáveis de estado desconhecidas também não será exata. Pode-se dizer então que o problema de estimação consiste em encontrar uma forma de atingir-se a melhor estimativa das variáveis de estado desconhecidas e, para isso, dos muitos critérios estatísticos existentes, tem sido mais utilizado, para a estimação de estado em SEP, é o dos mínimos quadrados ponderados (Weighted Least Squares – WLS) (SCHWEPPE, F.C, 1970), isso em razão da simplicidade da sua formulação, bem como da facilidade da sua implementação computacional.

4º Etapa: Processamento de Erros Grosseiros (EGs) em Medidas Analógicas

As medidas analógicas, fornecidas ao estimador de estado, estão sujeitas aos EGs³, que levam o processo de estimação de estado a variáveis de estado “não-verdadeiras”, ou, até mesmo, à não convergência. Devido à essa fragilidade do conjunto de medidas, o estimador de estado deve ser robusto o suficiente para detectar e identificar a ocorrência de EGs nas medidas analógicas. As medidas identificadas como portadoras de EGs são eliminadas e os estados são estimados novamente. Vale destacar que, dentre os métodos já desenvolvidos para detecção e identificação de erros grosseiros, os mais empregados são aqueles que se baseiam na análise estatística dos resíduos normalizados das medidas⁴ (MONTICELLI, 1999).

Na ocorrência de EG simples, isto é, quando apenas uma medida possui EG, os métodos para detecção e identificação de EGs baseados na análise dos resíduos normalizados, apresentam um bom desempenho, para diversas situações. Entretanto, possuem algumas limitações, como, por exemplo, o fato de não detectarem EGs em medidas críticas⁵ (CLEMENTS et al., 1981), (LONDON Jr. et al.,

³ Em geral dizemos que uma medida é portadora de Erro Grosseiro, quando a mesma desvia do seu valor verdadeiro de, no mínimo, três vezes a sua variância (MILI, L., VAN CUTSEM, T. AND RIBBENS-PAVELA, M.(1984)].

⁴ Resíduo das medidas é a diferença entre o seu valor medido e o valor estimado das mesmas.

⁵ Medida crítica é a medida que, quando perdida, faz um sistema de potência observável tornar-se não observável.

2005) e não identificarem EGs em conjuntos críticos de medidas⁶ (MILI et al., 1984). Isto em razão de as medidas críticas apresentarem resíduos nulos e as medidas de um conjunto crítico possuírem resíduos normalizados idênticos.

Para contornar essas limitações, em Korres e Contaxis (1994), Abur e Magnago (1999), Antônio et al. (2001), London Jr. et al. (2003), foram desenvolvidos métodos, que permitem a obtenção de sistemas de medição isentos de medidas críticas e de conjuntos críticos de medidas.

No caso de EGs múltiplos não interativos, quando esses não ocorrem em medidas críticas e conjuntos críticos de medidas, uma generalização da análise dos resíduos pode, na maioria das situações, ser suficiente para detectar e identificar corretamente as medidas portadoras de EGs. Entretanto, tal generalização não pode ser realizada para o processamento de EGs interativos, porquanto, nesta situação, as medidas portadoras de EGs são redundantes entre si, e, sendo os resíduos combinações lineares dos erros de medição, nem sempre as medidas com EGs são aquelas com os resíduos normalizados de maior magnitude (MILI et al. 1984).

2.2 Erros topológicos e erros de parâmetros

Além dos EGs, o processo de estimação de estado está sujeito ainda aos erros topológicos⁷ e erros de parâmetros⁸.

Conforme mostrado na seção anterior, as Etapas segunda, terceira e quarta, do processo de estimação de estado, baseiam-se na topologia obtida na primeira etapa. Em razão disto, caso ocorra algum erro topológico, que não tenha sido detectado pelo configurador de redes, este pode causar um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças dos elementos erroneamente configurados do sistema. Assim, na quarta etapa, as medidas analógicas, com resíduos elevados, são identificadas como portadoras de erros grosseiros. Nessa situação, dar-se-á início a um processo de eliminação de medidas analógicas, e,

⁶ Conjunto crítico de medidas é o conjunto de medidas formado por medidas não críticas, em que a eliminação de uma qualquer, a ele pertencente, torna as demais críticas.

⁷ Erros topológicos são erros devido a informações erradas, quanto aos estados de dispositivos seccionadores (chaves e/ou disjuntores). Logo, são erros nas medidas lógicas.

⁸ Erros de parâmetros são causados por informações erradas de algum parâmetro do sistema.

eventualmente, o processo poderá reduzir a zero o nível de redundância local. Logo, não será mais detectado erro grosseiro em medida analógica, mas o erro topológico permanece. Consequentemente, o modelo do sistema não representará corretamente a sua atual situação.

Similar análise pode realizar-se, considerando erros nos parâmetros do sistema, pois, as Etapas terceira e quarta baseiam-se nos parâmetros fornecidos ao estimador, na Etapa terceira. Assim, caso a informação de algum parâmetro do sistema tenha sido erroneamente fornecida ao estimador de estado, tal erro causará um aumento nos resíduos das medidas analógicas, localizadas nas vizinhanças do elemento, cujo parâmetro é o que forneceu aquela informação errada.

2.2.1 Tipos de erros topológicos

Os erros topológicos podem ser de dois tipos: simples e múltiplos. Erros topológicos do tipo simples ocorrem no caso de apenas um elemento mal configurado; já os erros topológicos múltiplos aparecem quando mais de um elemento da rede constituem erros de configuração (LEÃO, 1990).

Erros topológicos do tipo simples são subdivididos em erros topológicos de exclusão e erros topológicos de inclusão:

- Erro topológico de Exclusão: Ocorre quando um elemento do SEP está em operação, mas não é configurado na rede;
- Erro Topológico de Inclusão: Neste caso tem-se a situação oposta do erro topológico de exclusão. Nos erros topológicos de inclusão o elemento não está em operação, mas é configurado na rede.

Erro topológico múltiplo é obtido por uma combinação dos erros de inclusão e de exclusão.

Um exemplo de erro topológico múltiplo acontece quando se tem o seccionamento de barra, conhecido como “*bus split*”. O erro topológico múltiplo resulta na exclusão (ou inclusão) de barras conectadas (ou desconectadas) ao sistema, alterando o número total de barras e, consequentemente, o número de variáveis de estado. A Figura 2.1 ilustra um erro topológico do tipo seccionamento de barra (LEÃO, 1990).

Na Figura 2.1, observa-se que a barra 5 do sistema, no modelo barra-ramo, é dividida em duas, devido à exclusão dos ramos 2-5 e 4-5 e à inclusão dos ramos 2-6 e 4-6.

Figura 2.1: Exemplo de erro topológico múltiplo do tipo seccionamento de barra.

2.2.2 Tratamento dado aos erros topológicos

Como visto na seção 2.2, os erros topológicos são mudanças na topologia, não informadas ao configurador de redes. Logo, tais erros manifestam-se nos resíduos das medidas analógicas. Em razão disso, desenvolveu-se uma série de métodos destinados à identificação de erros topológicos, baseados na análise dos

resultados de um estimador de estado convencional, isto é, através da análise dos resíduos das medidas analógicas. Tais métodos permitem determinar as subestações suspeitas de estarem erroneamente configuradas. São aquelas nas vizinhanças das medidas analógicas, com os resíduos acima de um limiar pré-estabelecido. Essas Subestações recebem então um tratamento especial (LUGTU et al., 1980; WU; LIU, 1989).

Pelo fato de dependerem de uma estimação de estado inicial, os métodos em questão são chamados de métodos pós-filtragem e, embora apresentem bom desempenho em diversas situações, os mesmos possuem algumas limitações. Isso porque dependem da convergência de um estimador de estado, para começarem as análises. Tal convergência, entanto, já é ameaçada na presença de erros grosseiros e, na presença de erros topológicos, torna-se ainda mais complicada. Além disso, mesmo com a convergência, a análise dos resíduos da estimação pode ser totalmente inviável, devido ao efeito de espalhamento dos resíduos (MILI et al., 1985).

Considerando tais limitações, foram desenvolvidos métodos que não exigem uma estimação de estado inicial. São chamados de métodos pré-filtragem.

Seguindo essa nova linha de pesquisa, (BONANOMI; GRAMBERG, 1983) apresentaram um método baseado em procedimento de busca, através do grafo do sistema. Posteriormente, procurando um método pré-filtragem, de fácil implantação, executável em tempo reduzido, que não dependesse das características do sistema, (SINGH; GLAVITSCH, 1991) propuseram outro método, utilizando um banco de informações sobre o sistema, tentando imitar a análise que seria realizada por um operador do sistema.

Após o desenvolvimento dos valiosos trabalhos relacionados à representação dos ramos de impedância nula (MONTICELLI; GARCIA, 1991; MONTICELLI, 1993), o interesse pelo desenvolvimento de pesquisas, para a detecção e identificação de erros topológicos, foi renovado.

Surgiu então o estimador de estado generalizado (ALSAÇ et al., 1998), o qual permite a modelagem das subestações suspeitas de estarem com erros de topologia, ao nível de seção de barramento.

Para isto, o vetor de estado convencional, formado pelas magnitudes e ângulos das tensões, ganha novas variáveis de estado, que são os fluxos de potência ativa e reativa, através dos disjuntores e dos ramos cujos parâmetros serão

estimados. Novas pseudo-medidas são também introduzidas no modelo, permitindo uma melhor discriminação entre erros grosseiros, topológicos e erros de parâmetros. Devido à grande quantidade de informações, envolvidas no processo de estimação generalizada de estado, tal estimador pode tornar-se inviável para aplicação em tempo real. Em razão disto, os autores indicam a sua utilização apenas em situações especiais, isto é, quando existe a suspeita da existência de erros topológicos ou de parâmetros (ALSAÇ et al., 1998).

Face ao exposto, o estimador de estado generalizado não substitui o configurador de redes, pois, o objetivo daquele estimador não é configurar todo o sistema, mas sim corrigir possíveis erros de configuração (VEMPATI et al., 2005).

O configurador de redes para o estimador de estado generalizado esta apresentado no capítulo 3.

Capítulo 3

Configurador de Redes

A função do configurador de redes é determinar, em tempo real, a topologia atual da rede, no modelo barra-ramo, e a correspondente configuração de medidores, a partir do processamento de medidas lógicas, que estão sujeitas a variações e tornam-se disponíveis através do sistema SCADA, bem como de dados armazenados em um banco de dados estático, que descrevem a conexão dos equipamentos do sistema (geradores, transformadores, cargas, capacitores, linhas de transmissão, medidores, etc), com as correspondentes seções de barramento do SEP. As seções de barramento, que estão em um mesmo nível de tensão, podem ser conectadas pelo fechamento de dispositivos seccionadores. Conseqüentemente, para diferentes combinações de estados de dispositivos seccionadores, resultaram, em geral, diferentes topologias da rede (BOSE; CLEMENTES, 1987).

A saída do configurador de redes é a topologia da rede no modelo barra-ramo, ou seja, é o diagrama unifilar do SEP, e a correspondente configuração dos medidores. Durante o processamento do configurador, cada barra deve ser identificada juntamente com sua geração, suas cargas e dispositivos em derivação, também definindo a conectividade entre as barras interligadas por transformadores e linhas de transmissão.

Uma das funções do configurador de redes é identificar ilhamentos e descartar as ilhas que não têm geração, incluindo barras e ramos isolados.

Vale destacar que além do estimador de estado, outros aplicativos de um Sistema de Gerenciamento de Energia são também dependentes da topologia obtida pelo configurador de redes como, por exemplo: análise de contingências, fluxo de potência do operador, fluxo de potência ótimo, previsão de carga por barra, etc.

3.1 Configurador de Redes Tradicional

Diversos configuradores de redes foram desenvolvidos, mas os mais utilizados baseiam-se em algoritmos de busca em grafo (BOSE; CLEMENTES, 1987; SASSON et al., 1973). Esses algoritmos executam normalmente em três fases: - configuração de subestação; - configuração de rede; e - tabulação de resultados.

3.1.1 Configuração de Subestação

Nesta fase procede-se, através do configurador, ao processamento das seções de barramento do SEP de cada subestação, para determinar se são interconectadas por dispositivos seccionadores. Considerando, inicialmente, que cada seção de barramento é uma barra potencialmente isolada do SEP, as posições dos dispositivos seccionadores são processadas, usando técnicas de busca em grafo, as quais têm sido usadas por facilitar a obtenção dos respectivos estados de dispositivos seccionadores. Ao final desta etapa, todas as seções de barramento, envolvendo uma barra do SEP, conectadas por dispositivos seccionadores, irão compor uma única barra no modelo barra-ramo.

A Tabela 3.1 indica a legenda utilizada para as Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4, mostradas a seguir.

Tabela 3.1 – Legenda.

Legenda	
UG	Unidade Geradora
TR	Transformador
CS	Condensador Síncrono
LT	Linha de Transmissão

Para mostrar como se processa a configuração de subestação, utiliza-se o sistema constituído por três subestações, apresentado na Figura 3.1¹.

Figura 3.1: Sistema Genérico para análise do configurador de redes.

Processando os estados dos dispositivos seccionadores, “*fechado ou aberto*”, relacionados à subestação 1, a configuração de subestação determina o diagrama unifilar apresentado na Figura 3.2, onde observa-se a existência de duas barras (dois nós elétricos).

Aplicando o mesmo processo, para as outras duas subestações do sistema ilustrado na Figura 3.1, verifica-se que as três subestações geram quatro barras (quatro nós elétricos), conforme indicado na Figura 3.3.

¹ Esse sistema foi utilizado por (PRAIS; BOSE, 1988).

Figura 3.2: Resultado do processo do configurador de subestação, para subestação1 em análise do sistema apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.3: Subestações com as respectivas barras.

São indicadas na Tabela 3.2, cada subestação, seus respectivos nós e os circuitos adjacentes a cada nó. Por exemplo, verifica-se que a subestação 1 possui dois nós elétricos: o nó 1, com os circuitos UG1 e TR1; e o nó 2, com os circuitos TR1, LT1, LT2 e CS1. A mesma análise pode ser realizada para as demais subestações.

Caso tenha ocorrido alteração no estado de um ou mais dispositivos seccionadores, o processo é repetido. Isto devido à possibilidade de ter ocorrido mudança da topologia do sistema.

Tabela 3.2 – Dados do sistema após o processamento da fase configuração de subestação.

Subestação	Nó i	Circuitos adjacentes ao nó i
1	1	UG1, TR1
	2	TR1, LT1, LT2, CS1
2	3	LT1, LT2, Carga 1
3	4	LT1, LT3, Carga 2, Carga 3

3.1.2 Configuração de Rede

Após a configuração de cada subestação do SEP, a fase seguinte é a de configuração de rede.

Os possíveis ilhamentos do sistema são indicados nesta fase. Entretanto, ao invés de se combinarem seções de barramento, através de dispositivos seccionadores fechados, agora as barras, determinadas na fase 1, são combinadas, através de ramos (linhas de transmissão ou transformadores), para formar ilhas. Ao final, identificam-se todas as ilhas que possuem geração.

Dando continuidade à análise do sistema ilustrado na Figura 3.1, tomando por base o resultado obtido na primeira fase, configuração de subestação, processa-se a fase configuração de rede (a Figura 3.4 apresenta o resultado obtido). Verifica-se que, no caso deste exemplo, a rede é conexa, sendo composta de apenas uma ilha.

Figura 3.4: Resultado do processamento da fase configuração de rede.

Na Tabela 3.3 encontram-se os resultados da aplicação desta fase. Indicam-se, na mesma, os componentes da rede (unidades geradoras, linhas de transmissão, transformadores, condensadores síncronos e cargas) e suas respectivas barras terminais. Como exemplo, observando a Linha de Transmissão 1 (LT1), verifica-se a sua ligação aos terminais $I = 2$ e $J = 4$, ou seja, está ligada às barras 2 e 4, conforme ilustrado na Figura 3.4.

Tabela 3.3 – Dados do sistema após o processamento da fase configuração de rede.

Equipamentos	Terminais	
	I	J
UG1	1	-
TR1	1	2
CS1	2	-
LT1	2	4
LT2	2	3
LT3	3	4
Carga 1	4	-
Carga 2	3	-
Carga 3	3	-

Após o término desta fase, importa prosseguir com o processo, passando para a fase tabulação de resultados.

3.1.3 Tabulação de Resultados

Trata-se da tabulação de todos os equipamentos conectados às barras. As tabelas resultantes devem ser adequadamente estruturadas, para uso em programas subseqüentes, que se destinam às demais etapas envolvidas no processo de estimação de estado, ou em outros programas de análise de rede.

Os equipamentos a serem tabelados normalmente são: dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores), ramos (linhas de transmissão, transformadores, defasadores e dispositivos em série), dispositivos shunt (capacitores, reatores, condensadores síncronos, compensador estático de reativo,

unidade geradora e cargas), e medidores (medidores de fluxo de potência e corrente, medidores de injeção de potência e corrente e medidores de magnitude de tensão).

Na próxima seção apresentam-se alguns arranjos de medidores, em nível de seção de barramento, bem como o processo de redução da rede, utilizado por um configurador tradicional para associar os medidores aos componentes de um sistema no modelo barra-ramo.

3.2 Redução da Rede

Além de determinar a topologia da rede, no modelo barra-ramo, outra tarefa do configurador de redes é associar as medidas realizadas nas subestações aos devidos componentes do modelo barra-ramo. Dependendo do arranjo dos medidores disponíveis em um SEP, que são modelados em nível de seção de barramento, tal tarefa pode tornar-se bastante complexa.

Em um configurador convencional, o mecanismo utilizado para realizar essa última tarefa pode ser interpretado como um processo de redução de rede, isto é, redução da matriz Jacobiana do estimador WLS através do processo de Eliminação de Gauss. Em outras palavras, realiza-se uma transformação da matriz Jacobiana, que representa o modelo do SEP em termos de seção de barramento, em uma matriz Jacobiana representando o modelo barra-ramo do SEP (MONTICELLI, 1999).

A redução de rede realiza-se tomando por base algumas regras que, dependendo do arranjo do medidor, pode torna-se uma tarefa difícil de ser realizada.

Para uma melhor compreensão de como se realiza o processo de redução da rede, apresentam-se, a seguir, exemplos da aplicação de tal processo (Figura 3.6), em alguns arranjos de medidores em nível de seção de barramento.

3.2.1 Arranjos de medidores

A Figura 3.5 ilustra alguns exemplos de arranjos de medidores.

Figura 3.5: Exemplos de arranjos de medidores de potência (MW-MVAr).

Aplicando o processo de redução de rede aos arranjos de medidores apresentados na Figura 3.5, tem-se que: na Figura 3.5(a), todas as seções de barramento são unidas em uma única barra no modelo barra-ramo, e os medidores de potência ativa e reativa são atribuídos à linha de transmissão LT, isto é, para o modelo barra-ramo aqueles medidores são representados por medidas de fluxo no ramo que vai representar a LT. Na situação da Figura 3.5(b), requer-se menor modificação para o processo de redução de rede; neste caso o configurador vai atribuir os medidores de potência (localizados em um ramo com impedância nula conectando um disjuntor com uma barra da rede) à linha de transmissão adjacente, ou seja, em termos de modelo barra-ramo os medidores serão representados como medidas de fluxo de potência no ramo representando a LT. No arranjo apresentado na Figura 3.5(c), o processo de redução da rede elimina todos os dispositivos seccionadores (um disjuntor e três chaves seccionadoras); neste caso, os medidores de potência medem a soma dos fluxos de potência ativa e reativa nas duas linhas de transmissão. Assim, esses medidores seriam representados, no modelo barra-ramo, como um grupo de medidas de fluxo. A Figura 3.5(d) representa uma situação diferente, com a soma dos fluxos em dois disjuntores atribuídos a uma simples linha;

neste caso, o processo de redução da rede atribuirá a medida de fluxo à linha de transmissão.

Normalmente os medidores com os arranjos apresentados nas Figuras 3.5 (c) e (d) são descartados pelo configurador, pois cada medida deve ser associada a um único componente (ASADA, 2004).

A Figura 3.6 ilustra algumas regras práticas que são utilizadas para redução da rede em nível de seção de barramento para o modelo barra-ramo; na mesma figura encontram-se as disposições dos medidores, antes e depois da redução da rede.

Σ Transformador de corrente

Nota1: Linhas tracejadas em vermelho representam a parte eliminada da rede

Nota2: R representa um ramo com impedância nula (com dispositivos seccionadores fechados)

Figura 3.6: Efeito da redução topológica da rede na atribuição de medida.

3.3 Configurador de Redes para o Estimador de Estado Generalizado

No estimador de estado generalizado, o vetor de estado convencional ganha novas variáveis de estado, que são os fluxos de potência ativa e reativa, através dos disjuntores e dos ramos cujos parâmetros serão estimados. Novas pseudo-medidas são também introduzidas no modelo, permitindo assim uma melhor discriminação entre erros grosseiros, topológicos e erros de parâmetros.

Face ao exposto, o modelo generalizado, utilizado pelo estimador generalizado (ALSAÇ et al, 1998), possui várias diferenças em relação ao modelo barra-ramo utilizado pelo estimador de estado tradicional.

As diferenças entre os modelos barra-ramo e o generalizado já começam pela representação das subestações, pois, no generalizado elas deixam de ser representadas por uma simples barra da rede.

Apresentam-se, a seguir, as principais diferenças entre os modelos barra-ramo e generalizado:

- Modelo barra-ramo
 - Ramo: Linhas de transmissão e transformadores.
 - Barra (ou nó): Subestações.
- Modelo Generalizado ou Modelo seção de barramento / dispositivos seccionadores / ramo
 - Ramo: Chaves seccionadoras, disjuntores, linhas de transmissão, transformadores.
 - Barra (ou nó): Seção de barramento.

A forma de representar dispositivos de impedância nula, como chaves e disjuntores, foi desenvolvida em (MONTICELLI; GARCIA, 1991) e (MONTICELLI, 1993) respectivamente.

Em razão de o estimador de estado generalizado trabalhar com o modelo generalizado e não com o modelo barra-ramo, desenvolveu-se o chamado configurador generalizado.

O configurador generalizado identifica as ilhas energizadas, ilhas desenergizadas e barras isoladas do SEP, como o configurador de redes tradicional, identificando também a extensão das ilhas em que os dispositivos seccionadores aparecem explicitamente na base de dados. Os estados dos dispositivos

seccionadores desconhecidos e/ou suspeitos de estarem com erros de topologia podem também ser representados no modelo, para uma melhor análise de possíveis erros de parâmetros e de topologia. Entretanto, tendo em vista as diferenças entre os modelos barra-ramo e generalizado, o configurador generalizado se difere do tradicional nos seguintes pontos:

- Não considera o estado de dispositivos seccionadores para a formação de um nó elétrico (ou barra). Assim, em uma representação em estrutura de grafo, todos os pontos de conexão são representados e os dispositivos seccionadores são considerados como ramos.
- Não realiza a atribuição das medidas aos seus componentes, uma vez que cada medidor é relacionado com um componente.

Capítulo 4

Representação Nó-Profundidade

Esse Capítulo introduz a representação computacional para grafos do tipo floresta, denominada Representação Nó-Profundidade (RNP), proposta por Delbem et al. (2004).

A RNP será utilizada neste trabalho para representar computacionalmente a topologia de um SEP. As formas convencionais de representação computacional de grafos podem ser vistas em (AHUJA et al., 1993).

Na literatura a respeito deste assunto, os elementos de um grafo têm varias definições (WILSON, 1972; AHUJA et al., 1993; BALAKRISHNAN, 1997; GOODAIRE; PARMENTER, 1997). Na próxima seção, serão apresentados alguns conceitos sobre grafos, a serem utilizados neste trabalho.

4.1 Alguns conceitos da teoria de grafos

Um **grafo** $G(V, A)$ é definido pelo par V e A , onde:

- V – conjunto de **vértices** ou **nós** do grafo;
- A – conjunto de pares de nós não-ordenados: as **arestas** do grafo.

Se u e v são dois nós de um grafo e se o par $\{u, v\}$ é uma aresta denotada por y , diz-se que y conecta u e v , como pode ser visto na Figura 4.1. Neste caso, a aresta $\{u, v\}$ é dita ser incidente ao nó u e ao nó v .

Figura 4.1: Exemplo de um grafo

A **ordem** de um grafo G é dada pelo número de elementos do conjunto de nós, ou seja, pelo número de nós de G ; a ordem do grafo apresentado na Figura 4.1 é 4. O **grau** de um nó é dado pelo número de arestas que lhe são incidentes. A Tabela 4.1 informa o grau de cada nó do grafo apresentado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Grau de cada um dos nós do grafo apresentado na Figura 4.1.

Nó	Grau
w	1
u	2
v	2
z	3

Um **caminho** é uma seqüência de nós, tal que de cada um dos nós exista uma aresta distinta, para o nó seguinte. Além disso, se nenhum dos nós no caminho se repete, o caminho é chamado de caminho simples ou **cadeia**. O comprimento do caminho é o número de arestas que o caminho usa. Dois caminhos são independentes se não tiverem nenhum nó em comum, exceto o primeiro e o último.

Se um caminho começa e acaba no mesmo nó, este caminho é chamado de **ciclo**. Um exemplo de ciclo é a seqüência de arestas $\{u, v\}$, $\{v, z\}$, $\{z, u\}$ da Figura 4.1, ou o caminho $\{u, v, z, u\}$ da mesma Figura 4.1.

Um par de nós em um grafo é um **par conexo**, se existir um caminho entre eles. Um grafo $G(V, A)$ é um **grafo conexo**, se todo par de nós em $G(V, A)$ for um par conexo.

Diz-se que H é um **subgrafo conexo máximo** de um grafo G , se o único subgrafo conexo contendo H é o próprio H . Um subgrafo conexo H máximo também é chamado de **componente**. Um grafo G é conexo, se o número de seus componentes for igual a um.

Um grafo chama-se **acíclico** se não contém ciclos. **Uma árvore** é um grafo conexo acíclico. Seja $G(V, A)$ um grafo de ordem $n > 2$; as propriedades seguintes são equivalentes, para caracterizar o grafo G como uma árvore:

- G é conexo e acíclico;
- G é acíclico e tem $n - 1$ arestas;
- G é conexo e tem $n - 1$ arestas;
- G é acíclico e por adição de uma aresta se cria um ciclo e somente um;
- G é conexo, mas deixa de sê-lo se uma aresta é eliminada (todas as arestas são pontes¹).
- Todo par de nós de G é unido por uma e somente uma cadeia simples.

Um grafo formado por um conjunto de árvores é chamado de **floresta**. Logo, cada componente de uma floresta é uma árvore. No caso de uma floresta com apenas uma árvore, tem-se uma floresta conexa. Assim, uma árvore é uma floresta conexa.

É usual chamar um dos nós de uma árvore de **nó raiz**. Este nó, em geral, funciona como uma referência de onde se inicia a árvore. Um nó raiz pode ter grau maior ou igual a um.

Na próxima seção será apresentado o embasamento teórico da RNP.

4.2 Representação Nó Profundidade

A maior parte do texto desta seção é retirada de (DELBEM et al., 2004).

A RNP baseia-se nos conceitos de caminho e profundidade do nó em um grafo (árvore), e consiste basicamente de uma lista contendo os nós da árvore e suas respectivas profundidades (DELBEM et al., 2004), formando pares do tipo (n_x, p_x) , onde n_x é o nó da árvore e p_x a profundidade do nó. A ordem em que os pares são dispostos na lista é importante.

Neste trabalho a estrutura RNP será armazenada através de uma matriz de dimensão " $2 \times n$ ", sendo " n " o número de nós de uma determinada árvore. Desta forma, cada par (n_x, p_x) será armazenado numa determinada coluna da matriz RNP;

¹ Uma aresta é dita ser uma ponte, se sua remoção provoca uma redução na conexidade do grafo.

sendo p_x e n_x armazenados na primeira e segunda linha respectivamente (Figura 4.3).

Para armazenar uma árvore geradora na estrutura RNP, realiza-se uma busca em profundidade, a partir do nó raiz da árvore.

Para entender como se dá o armazenamento de uma árvore na estrutura RNP, vamos analisar a Figura 4.3, que apresenta o armazenamento da árvore geradora ilustrada na Figura 4.2. Inicialmente armazena-se o nó raiz da árvore, no caso o nó 1, com profundidade igual a zero. Em seguida, faz-se uma busca em profundidade na árvore geradora, através dos ramos conectados ao nó raiz, para armazenar os demais nós. Por exemplo: partindo do nó raiz da árvore, nó 1, encontra-se o nó 2. Assim, este nó é armazenado na segunda coluna da matriz RNP, com profundidade igual à profundidade do nó que ele está conectado na árvore, no caso o nó raiz, somado de um, ou seja, com profundidade igual a “ $0 + 1 = 1$ ”. Dando continuidade a busca, a partir do nó 2, encontra-se o nó 8. Desta forma, o nó 8 é armazenado na terceira coluna da matriz RNP, com profundidade do nó 2 somado de um, ou seja, “ $1 + 1 = 2$ ” (Figura 4.3). Em razão de o nó 8 não possuir conexão com nenhum outro nó da árvore, a busca retorna ao nó anterior até encontrar outra conexão. Neste caso, a busca retorna ao nó 1, e, através do ramo 1 - 3, encontra-se o nó 3, que é armazenado na quarta coluna da matriz RNP, com profundidade do nó 1 somada de um, isto é, “ $0 + 1 = 1$ ”. Esta busca se faz até que todos os nós da árvore geradora estejam armazenados na matriz RNP (Figura 4.3).

Para representar uma floresta possuindo “ n_A ” árvores, teremos um conjunto de “ n_A ” RNPs. Destarte, a estrutura de dados da floresta pode ser facilmente implementada, utilizando ponteiros e matrizes, onde cada ponteiro indica os pares (n_x, p_x) , ou seja, nó e sua profundidade na árvore da floresta.

Figura 4.2: Exemplo de um grafo e uma árvore geradora indicada pelas linhas espessas.

Profundidade	0	1	2	1	2	3	2	3	4	5	3	4	4	5	4
Nó	1	2	8	3	9	10	4	11	12	13	5	14	6	7	15

Figura 4.3: Representação Nó-Profundidade do grafo da Figura 4.2, considerando o nó 1 como raiz desta árvore.

Para facilitar a manipulação da floresta armazenada em RNPs, criaram-se dois operadores bastantes similares, chamados de operador 1 e operador 2 (DELBEM et al., 2004). Ambos os operadores transferem uma sub-árvore (parte podada) de uma árvore “Ade” (árvore origem) para uma árvore “Apara” (árvore destino). Entretanto, no operador 1 a raiz da sub-árvore podada é a mesma em “Ade” e “Apara”; já no operador 2, um novo nó (diferente da raiz) é escolhido para ser a nova raiz da sub-árvore em “Tpara” (DELBEM; CARVALHO, 2003).

O operador 1 requer a definição prévia de dois nós: o nó de poda p , que indica a raiz da sub-árvore que será podada; e o nó adjacente a , que é o nó da árvore *Apara*, onde a sub-árvore será inserida. Além desses dois nós, o operador 2 requer ainda o nó r , que será a nova raiz da sub-árvore que será transferida.

4.2.1 Operador 1

Para descrição do operador 1, considera-se que os nós p e a sejam previamente escolhidos. A RNP é implementada utilizando-se matrizes, sendo conhecidos os índices de p (i_p) e a (i_a) (Figura 4.4(a)) nas matrizes Ade e $Apara$, respectivamente.

O operador 1 pode ser descrito através dos seguintes passos:

1. Determina-se a série $(i_p - i_i)$ de índices na árvore Ade , correspondente à sub_árvore enraizada no nó p (Figura 4.4(a)). Conhecido i_p , cumpre encontrar i_i . A série $(i_p - i_i)$ corresponde ao nó p em i_p e consecutivos nós x na segunda linha da matriz Ade , tal que $i_x > i_p$ e $p_x > p_p$ (entre linhas tracejadas na Figura 4.4(a)), onde p_x é a profundidade do nó x ;
2. Copiam-se os dados da série $(i_p - i_i)$, da árvore Ade , em uma matriz temporária determinada de $Atmp$ (contendo os dados da sub-árvore que está sendo transferida); ver Figura 4.4(b). A profundidade de cada nó x , da série $(i_p - i_i)$ é atualizada, utilizando-se a seguinte equação: $p_x = p_x - p_p + p_a + 1$, onde: p_x , p_p , p_a são as profundidades dos nós x , p e a , respectivamente;
3. Cria-se uma matriz $Apara'$, contendo os nós de $Apara$ e inserindo depois a matriz $Atmp$ na posição $i_a + 1$ de $Apara$, isto é, gera-se uma nova árvore, que conecta a sub-árvore na árvore $Apara'$; ver Figura 4.4 (c);
4. Constrói-se uma matriz Ade' , que possua os nós de Ade , sem os nós de $Atmp$;
5. Atualiza-se a floresta, fazendo com que a estrutura de dados que antes apontava para Ade e $Apara$, agora aponte para Ade' e $Apara'$.

Figura 4.4: Ilustração dos passos do operador 1: (a) *Ade*, *Apara* e RNP; (b) *Atmp* e RNP; e (c) *Ade'*, *Apara'* e RNP.

4.2.2 Operador 2

No operador 2, os nós p , r estão na árvore Ade , e o nó a na $Apara$; o índice i_r do nó r , está na matriz Ade .

A diferença entre o operador 1 e o operador 2 evidencia-se nos passos 2 e 3, mostrados na seção 4.2.1, isto é, a formação da sub-árvore e como a mesma é armazenada em matrizes são diferentes. Os passos 2 e 3, para o operador 2, são descritos na sequência. As Figuras 4.5 (a), 4.5(b) e 4.5(c) ilustram um exemplo destes passos.

O procedimento da cópia da sub-árvore, para o operador 2, pode ser dividida em dois passos: O primeiro é similar ao passo 2 do operador 1, com a diferença de que, no operador 2, troca-se o índice i_p por i_r . A matriz retornada deste processo designou-se por $Atmp1$.

No segundo passo consideram-se os nós de r até p de Ade , (isto é $r_0, r_1, r_2, \dots, r_n$, onde $r_0 = r$ e $r_n = p$), como raízes de sub-árvores (ver os nós destacados na Figura 4.5(a)). A sub-árvore enraizada em r_1 contém a sub-árvore enraizada em r_0 . A sub-árvore enraizada em r_2 contém a sub-árvore enraizada em r_1 , e assim por diante (ver Figura 4.5(a)). O algoritmo para o segundo passo mostra a cópia das sub-árvores enraizadas em r_i ($i = 1, 2, \dots, n$), sem a sub-árvore enraizada em r_{i-1} (veja Figura 4.5(b)) e armazena o resultado das sub-árvores, na matriz temporária $Atmp2$ (veja Figura 4.5(c)).

O terceiro passo do operador 1 cria a matriz $Apara'$, de $Apara$ e $Atmp$. No operador 2 usa-se a matriz $[Atmp1 \ Atmp2]$ para construir $Apara'$.

Figura 4.5: Exemplo para determinar o *Atmp2*. As linhas espessas destacam os nós de *r* até *p*. Os valores da profundidade, mostrados nesta figura, consideram a profundidade do nó *a* igual a zero: (a) *Apara* e RNP; (b) Sub-árvores enraizadas entre os nós *r* e *p* “*Atmp1*”; (c) RNP da sub-árvore “*Atmp2*”.

4.3 Detalhes computacionais da RNP

Essa seção apresenta detalhes da RNP usada para representar computacionalmente a topologia de SEP radiais, através de grafos do tipo floresta. No Capítulo 5 é abordada uma solução para representação da topologia de SEP malhados, utilizando a RNP e arestas reservas.

Utiliza-se a estrutura de ponteiros (AHUJA et al., 1993) e matrizes, para armazenar a RNP na memória de um computador. Um ponteiro é um endereço de memória; seu valor indica onde uma variável está armazenada, mas não o que está armazenado. Proporciona um modo de acesso a uma variável, sem referenciá-la diretamente. Usualmente a notação dada a um ponteiro é uma seta: $\rightarrow$.

Assim, uma matriz pode ser manipulada e representada computacionalmente por uma lista de ponteiros, onde cada ponteiro aponte para um vetor (todos os vetores possuem o mesmo tamanho). A Figura 4.6 ilustra a representação da matriz apresentada na equação 4.1, como uma lista de ponteiros, para vetores de mesmo tamanho.

$$D = \begin{bmatrix} 20 & 05 & 1982 \\ 11 & 10 & 1981 \\ 23 & 04 & 1981 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Figura 4.6: Representação da matriz D (equação (4.1)), através de uma lista de ponteiros para vetores.

Na Figura 4.6, as caixas representam posições de memória, que podem armazenar valores. Um conjunto de caixas adjacentes ($\cdots$) representa um vetor. Desta forma, cada conjunto de caixas adjacentes, na Figura 4.6, representa um vetor que corresponde a uma linha da matriz D (equação (4.1)): $d_1 = [20\ 05\ 1982]$, $d_2 = [11\ 10\ 1981]$ e $d_3 = [23\ 04\ 1981]$.

O conjunto de caixas adjacentes constantes da Figura 4.6, na vertical, também é um vetor, que será denominado S , sendo s_j o j -ésimo elemento de S . Os valores desses s_j elementos são os endereços da posição de memória inicial dos vetores d_1 , d_2 e d_3 . Os valores dos elementos s_j 's indicam para onde cada elemento do vetor aponta. Para facilitar a visualização, usam-se as setas, chamadas ponteiros, no lugar dos valores de endereços de memória, conforme mostrado na Figura 4.6.

A notação $S \rightarrow v_j$ será usada para indicar o vetor apontado pelo j -ésimo ponteiro de S . Assim, para o exemplo da Figura 4.6, $S \rightarrow v_1 = d_1 = [20\ 05\ 1982]$, $S \rightarrow v_2 = d_2 = [11\ 10\ 1981]$ e $S \rightarrow v_3 = d_3 = [23\ 04\ 1981]$. Usando essa notação, um elemento de D pode ser indicado por $S \rightarrow v_j(k)$. Por exemplo, $S \rightarrow v_2(3) = 1981$, isto é, a terceira posição do segundo vetor armazena o valor 1981.

A Figura 4.7 ilustra um outro exemplo do uso de ponteiros. Os dados representados nesta figura correspondem à matriz representada na equação (4.2).

$$D = \begin{bmatrix} 20 & 05 & 1982 \\ 20 & 05 & 1982 \\ 20 & 05 & 1982 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Figura 4.7: Representação de uma matriz com linhas iguais (equação (4.2)), através de uma lista de ponteiros para vetores.

Neste caso, os ponteiros de S podem apontar para um mesmo vetor: $S \rightarrow v_1 = d_1 = [20 \ 05 \ 1982]$, $S \rightarrow v_2 = d_1 = [20 \ 05 \ 1982]$ e $S \rightarrow v_3 = d_1 = [20 \ 05 \ 1982]$. Observe que $S \rightarrow v_j$ refere-se ao vetor apontado pelo j -ésimo ponteiro de S e **não** a um vetor chamado v_j (nesse exemplo todos os ponteiros apontam para o mesmo vetor d_1).

Na Figura 4.8, tem-se a representação de uma estrutura de ponteiros que não corresponde a uma matriz, uma vez que as linhas apresentam tamanhos diferentes. As estruturas que serão usadas na RNP não correspondem a matrizes e os ponteiros apontam em geral para vetores de tamanhos variados. Neste caso, é preciso também indicar o tamanho de cada vetor apontado por S . O tamanho do vetor $S \rightarrow v_j$ será denotado por $S \rightarrow tv_j$. Como exemplo, na Figura 4.8, $S \rightarrow tv_2 = 2$ e $S \rightarrow tv_3 = 4$.

Figura 4.8: Representação de uma estrutura com vetores de tamanhos variados através de uma lista de ponteiros para vetores.

A notação $S \rightarrow m_j$ será usada para indicar a matriz apontada pelo j -ésimo ponteiro de S .

Na RNP temos que armazenar além dos nós n_x das árvores, as respectivas profundidades p_x ; destarte, cada uma das matrizes, onde serão armazenados os dados das árvores, terá dimensão " $2 \times nt$ ", sendo " nt " o número total de nós da árvore armazenada, isto é, $S \rightarrow tm_j = 2 \times nt$.

Uma floresta inteira pode ser representada usando-se um vetor de ponteiros F , sendo cada elemento f_i de F um endereço para uma estrutura S_i (relativa a uma árvore (uma matriz de duas linhas)). Para a floresta da Figura 4.4(c), tem-se $F \rightarrow S_1$ e $F \rightarrow S_2$, onde S_1 e S_2 apontam para as RNP de cada árvore (ver Figura 4.9), isto é, a floresta da Figura 4.4(c) é completamente representada, computacionalmente,

pelas seguintes estruturas: $F \rightarrow S_1$, onde $S_1 \rightarrow m_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & 2 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$ e $F \rightarrow S_2$,

onde $S_2 \rightarrow m_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 2 \\ 11 & 4 & 5 & 6 \end{bmatrix}$.

Figura 4.9: RNP da Floresta da Figura 4.4(c), através de uma lista de ponteiros para matrizes.

No capítulo 5, a RNP será apresentada com maiores detalhes, para obtenção e atualização da topologia de um SEP no modelo barra-ramo, com objetivo de obter um configurador de redes robusto e mais eficiente que os configuradores já existentes.

Capítulo 5

Configurador de Redes “Tracking” Usando a Representação Nó-Profundidade

Este capítulo apresenta o configurador de redes “Tracking” proposto, para efeito de estimação de estado em SEP, utilizando a RNP. O configurador proposto vai representar a topologia do SEP através de grafos, sendo que: cada seção de barramento do tipo 1 do SEP, definida na Figura 5.1, será representada por um nó de um grafo; as ligações entre essas seções de barramento serão representadas por arestas de um grafo.

Neste trabalho, as seções de barramento do tipo 1 serão chamadas simplesmente de Seção de Barramento de Barra (SBB).

Seção de barramento:

Tipo 1 - são aquelas envolvendo uma barra da rede, onde a barra pode ser de operação ou transferência.
Tipo 2 - são aquelas que não contêm barra da rede.

Figura 5.1. Tipos de seções de barramento.

O configurador de redes utilizando a RNP abrange os passos de configuração de subestação e configuração de rede, de uma só vez, de maneira diferente dos configuradores de redes tradicionais (ver seção 3.1 do capítulo 3). Assim, as

ligações entre as SBBs, para o configurador de redes proposto, podem ser realizadas através exclusivamente de dispositivos seccionadores, o que dará origem a uma única barra no modelo barra-ramo. As ligações podem ocorrer também através da associação desses dispositivos com linhas de transmissão e/ou transformadores, dando origem a um ramo no modelo barra-ramo.

A codificação, utilizando a RNP, é muito útil para análise e atualização da topologia da rede, pois permite um acesso direto para cada nó de um grafo e pode representar eficientemente árvores e florestas. Além disso, permite uma rápida atualização da estrutura da floresta, em caso da ocorrência de mudanças nos estados de dispositivos seccionadores. Para possibilitar essa rápida atualização, foram desenvolvidos os operadores 1 e 2, descritos nas próximas seções.

O configurador de redes proposto possui as seguintes características:

- Permite a realização das etapas configuração de subestação e de rede ao mesmo tempo, diminuindo assim o tempo de processamento necessário para a obtenção do modelo barra-ramo. Para isso, o configurador proposto representa cada SBB do SEP como nó de um grafo e faz uso da RNP e de outras duas estruturas de dados, que serão apresentadas a seguir;
- Possibilita a associação dos medidores aos componentes do SEP, no modelo barra-ramo, de forma direta. Para isso cria barras fictícias para representar os componentes shunt do SEP.

Observação 5.1: Para facilitar o entendimento do configurador de redes proposto, inicialmente será apresentado como este possibilita a obtenção e atualização da topologia da rede, no modelo barra-ramo. Em seguida, será apresentado como o mesmo atribui os medidores aos componentes do SEP no modelo barra-ramo.

5.1 Obtenção e atualização da topologia da rede no modelo barra-ramo

Os dados de entrada para obtenção da topologia do SEP, no modelo barra-ramo, são dispostos de forma estratégica (em formato *.txt*), para a leitura inicial do programa do configurador proposto (ver Anexo A). Compõem os dados de entrada:

SBBs, dispositivos seccionadores e seus estados, ramos (transformadores e linhas de transmissão), dispositivos shunts (unidades geradoras, cargas, capacitores, reatores, etc.) e os medidores relacionados a cada ramo do SEP.

Todas as informações do SEP, compostas pelos dados de entrada, são armazenadas em estruturas¹.

A partir dos dados de entrada armazenados nas estruturas, monta-se uma matriz chamada de matriz conexão topológica; sua dimensão é $n \times n$, onde n é o número de nós na estrutura RNP, que corresponde ao número total de SBBs do SEP. Cada posição “(i , j) = X, para $i \neq j$ ”, da matriz conexão topológica, indica que os nós “i” e “j” são conectados através de dispositivos seccionadores fechados, como ilustrado na Figura 5.3.

A Tabela 5.1 indica as legendas utilizadas nas Figuras deste capítulo.

Tabela 5.1 – Legenda.

Legenda	
UG	Unidade Geradora
TR	Transformador
CS	Condensador Síncrono
LT	Linha de Transmissão

¹ Estruturas são tipos de variáveis que agrupam dados geralmente desiguais.

Figura 5.2: Sistema genérico para análise do configurador de redes proposto.

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		×						
2	×			×				×
3								
4		×			×	×		
5				×				
6				×				×
7								
8		×				×		

Figura 5.3: Matriz conexão topológica para o SEP apresentado na Figura 5.2.

O configurador de redes proposto possui três estruturas principais, a partir das quais torna-se possível a obtenção e atualização da topologia do SEP no modelo barra-ramo, ou seja, do diagrama unifilar do SEP.

As estruturas citadas são:

- Representação Nó-Profundidade (RNP); em cada uma das RNPs armazena-se uma árvore, que representa os dados radiais do SEP, como visto no Capítulo 4. Para representar uma floresta, utilizam-se várias RNPs.
- Aresta Reserva (AR); a função inicial desta estrutura é armazenar arestas que formariam ciclos no grafo (nos SEP seriam ligações que formariam malhas), se fossem armazenadas na estrutura RNP.
- Representação Barra-Subestação (RBS), esta estrutura estabelece a correspondência entre as SBBs e as barras da rede no modelo barra-ramo.

5.1.1 Armazenando os dados na estrutura RNP

A RNP é armazenada na forma de ponteiro e matrizes, assim como visto no capítulo 4, mantendo a profundidade na primeira linha da matriz e os nós na segunda linha. Interessa destacar que, para montar a primeira estrutura RNP, faz-se uma busca na matriz conexão topológica, verificando as SBBs conectadas por dispositivos seccionadores fechados e, com a lembrança de que as conexões entre as SBBs, que formam malhas, não serão representadas na estrutura RNP, mas sim na estrutura AR.

O SEP da Figura 5.2 é utilizado para exemplificar o funcionamento do configurador de redes proposto.

Apresentam-se, a seguir, os passos utilizados para montar a estrutura RNP.

Observação 5.2: Inicialmente a floresta possui n posições de memória, todas apontadas para NULL, Figura 5.5(a), em que n é o número de SBBs do SEP. Cada árvore gerada pelo programa aponta para um endereço de memória da floresta. Os demais elementos da floresta, que não apontam para nenhuma árvore, continuam apontando para NULL, Figura 5.5(c).

- Analisando a matriz conexão topológica, procura-se um nó ligado a uma unidade geradora, como é o caso do nó 1 do SEP ilustrado na Figura 5.2. Esse nó é adicionado à estrutura RNP, com profundidade igual a zero, ou seja, é o nó raiz da árvore, Figura 5.5(b). Árvores com pelo menos um nó ligado a uma unidade geradora são chamadas de árvores energizadas (para o SEP são as ilhas elétricas energizadas).
- Continuando a busca na matriz conexão topológica, todos os outros nós conexos, que tenham dispositivos seccionadores fechados formando um caminho partindo do nó raiz, são armazenados na estrutura RNP (Figura 5.5(b)).
- A medida que um nó é armazenado na estrutura RNP, coloca-se um indicativo na diagonal principal da matriz conexão topológica, referente a este nó. Isto informa que este nó já está armazenado na estrutura RNP, Figura 5.4(a).
- Após a primeira árvore ter sido totalmente armazenada em um vetor, a mesma é apontada para o primeiro endereço de memória da floresta Figura 5.5(c).
- Depois que todas as árvores energizadas estiverem armazenadas na floresta, cumpre buscar as árvores não energizadas, isto é, aquelas árvores em que nenhum de seus nós esteja ligado a, pelo menos, uma unidade geradora, como é o caso dos nós 3 e 7, do SEP indicado na Figura 5.2. Para o SEP, as árvores não energizadas são ilhas elétricas não energizadas.
- A busca das árvores não energizadas é feita através da diagonal principal da matriz conexão topológica, que não apresenta indicativo de armazenamento na estrutura RNP (como é o caso dos nós 3 e 7 da matriz conexão topológica da Figura 5.4(a) Quando os nós das árvores não

energizadas são armazenados na estrutura RNP, coloca-se também um indicativo na matriz conexão topológica, Figura 5.4(b).

- Finalmente armazenam-se as árvores não energizadas, na floresta indicada na Figura 5.5(c).

Figura 5.4: Matriz conexão topológica do SEP apresentado na Figura 5.2, (a) após o armazenamento, na estrutura RNP, dos nós das árvores energizadas, (b) após o armazenamento, na estrutura RNP, dos nós que não estão em árvores energizadas.

Figura 5.5: (a) Floresta inicial; (b) Árvores do SEP apresentado na Figura 5.2 em forma de RNP; (c) Árvores armazenadas na floresta.

5.1.2 Armazenando os dados na estrutura AR

A função da estrutura RNP é armazenar árvores de uma floresta. Contudo, uma árvore é um grafo conexo acíclico, como mencionado no capítulo 4, seção 4.1, donde a RNP armazena somente a parte radial do SEP. Entretanto, os SEP são formados em sua grande maioria por malhas (ciclos na teoria de grafos). Destarte, para a resolução do problema em pauta, criou-se a estrutura AR, que armazena todas as malhas do SEP, de tal forma que todas as informações de suas conexões sejam armazenadas nas estruturas RNP e AR.

Inicialmente a estrutura AR está totalmente zerada, não lhe reservando nenhum espaço de memória.

Os dados da estrutura AR são armazenados através dos seguintes passos.

- Durante o processo de armazenamento de uma aresta qualquer, na estrutura RNP, deve-se verificar se os nós da mesma já foram armazenados nessa estrutura. Se sim, a correspondente “aresta” forma um ciclo e deve ser armazenada na estrutura AR.
- Armazenam-se também, na estrutura AR, as arestas que não serão apresentadas na saída do configurador, em razão de estarem abertos os dispositivos seccionadores que interligam os seus nós. O armazenamento dessas arestas é muito importante, pois, evita que sejam realizadas novas consultas ao banco de dados de entrada, que está no formato *txt*.
- Para armazenar uma aresta na estrutura AR aloca-se um espaço de memória com três posições; as duas primeiras armazenam os nós da aresta e a terceira posição indica se a aresta deve ou não ser utilizada na saída do configurador de redes, com indicativos (“1”) ou (“0”) respectivamente.
- Importa salientar que, se após uma alteração na topologia do SEP, uma aresta da estrutura AR for utilizada na estrutura RNP, a posição da memória que armazenava os dados desta aresta vai apontar para NULL. De forma similar, uma aresta que não é mais representada na estrutura RNP, deve ser armazenada na estrutura AR.

A Figura 5.6 ilustra a estrutura AR do SEP apresentado na Figura 5.2. Pode-se observar que a aresta [2-8] possui um indicativo (“1”), na terceira posição de

memória, o que significa que essa aresta será utilizada na saída do configurador de redes. Já as arestas ([1-3], [2-3], [2-7], [3-4], [3-7], [3-8], [5-6], [6-7] e [7-8]), possuem um indicativo (“0”), que informa não serem elas utilizadas, na saída do configurador de redes, pois, estão associadas a seccionadores abertos.

Figura 5.6: Estrutura AR do SEP apresentado na Figura 5.2.

5.1.3 Armazenando os dados na estrutura RBS

O configurador de redes proposto, como mencionado anteriormente, processa as etapas de configuração de subestação e configuração de rede, de uma só vez, para reduzir o tempo de processamento computacional. Entretanto, o passo de configuração de subestação, no configurador de redes tradicional, informa a conectividade das subestações; destarte, utilizando a RBS, é possível determinar a conectividade das SBBs das subestações, de uma forma direta.

Através de uma análise nas estruturas RNP e AR, obtidas a partir do SEP da Figura 5.2, monta-se a RBS. A Figura 5.7 ilustra como os dados estão armazenados na estrutura RBS.

* Seção de barramento de barra " valor designado no SEP "

** Barra que representa a seção de barramento no modelo barra-ramo

Figura 5.7: Estrutura RBS.

A RBS armazena os dados das subestações em forma de ponteiro e matrizes. Cada subestação do SEP possui um endereço na posição da memória (vetor na vertical da Figura 5.7); cada uma das matrizes na horizontal define as relações entre as SBBs e as barras, do modelo barra-ramo, para cada subestação; sua dimensão é igual $2 \times m_s$, onde m_s é o número de SBB da subestação "s" (cada SBB corresponde a um nó, como pode ser observado na Figura 5.7).

Conforme apresentado na Figura 5.7, na primeira linha de cada uma das matrizes armazenam-se os números que foram designados para cada uma das SBBs; já na segunda linha encontram-se os números das barras no modelo barra-ramo. Através da análise da primeira e segunda linha de cada uma das matrizes é possível determinar as relações entre as SBBs e as barras do modelo barra-ramo, da seguinte forma:

- Quando for armazenado "0", numa posição "i" qualquer da linha 2, isto é, na posição (2,i), é porque a SBB armazenada na posição "(1,i)" não é energizada e portanto não será representada no modelo barra-ramo final (como é o caso das SBBs 3 e 7 da Figura 5.7);
- Se o número "i" for armazenado apenas na posição (2,i), a SBB armazenada na posição "(1,i)" constitui uma barra no modelo barra-ramo, que será representada pelo número "i" (como é o caso das SBBs 1,2 e 8 da Figura 5.7);

- Se um mesmo número for armazenado nas posições (2,i), (2,j) e (2,k), as SBBs armazenadas nas posições (1,i), (1,j) e (1,k) estão conectadas por dispositivos seccionadores fechados e constituem uma única barra no modelo barra-ramo. Essa barra será representada pelo menor número, dentre os números designados para as SBBs armazenadas nas posições (1,i), (1,j) e (1,k) (como é o caso das SBBs 4, 5 e 6 da Figura 5.7).

5.2 Funções dos operadores 1 e 2, para o configurador de redes proposto

Quando ocorrem mudanças nos estados dos dispositivos seccionadores, o configurador de redes proposto, através da topologia obtida no ciclo passado, atualiza a topologia da rede no modelo barra-ramo, trabalhando somente com a parte afetada das estruturas RNP, AR e RBS. Esta atualização é feita utilizando-se os operadores 1 e 2 desenvolvido por Delbem et al. (2004), assim o fazendo, contudo, com técnicas funcionais adaptadas ao problema do configurador de redes proposto.

5.2.1 Funções do operador 1

1°. Construir uma nova árvore:

A construção de uma nova árvore é necessária quando um ou mais dispositivos seccionadores são abertos entre dois nós de uma mesma árvore, dividindo, assim, uma árvore em duas.

Na Figura 5.8(a) tem-se uma árvore *A1*, de uma floresta, árvore esta composta por 4 nós. Se os dispositivos seccionadores que interligam a aresta entre os nós 2 e 8 forem abertos, uma parte da árvore *A1* será podada, sendo chamada de sub-árvore; caso não exista nenhuma aresta reserva, que interligue a parte remanescente da árvore *A1* à sub-árvore podada, deve-se criar uma nova árvore, com a sub-árvore, e armazená-la na floresta.

Passos desse funcionamento:

- Inicialmente se cria uma matriz temporária, chamado de *Atmp*, para armazenar nós e ordenar as novas profundidades da sub-árvore, Figura 5.8(b);
- Copiam-se os dados da árvore *A1*, sem os dados da sub-árvore, gerando assim a árvore *A1'*, Figura 5.8(b);
- Copiam-se os dados de *Atmp*, para a nova árvore *A2*;
- Para finalizar, criam-se dois ponteiros, o primeiro é armazenado na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de *A1*, este ponteiro é apontado para árvore *A1'*, o segundo ponteiro é armazenado na primeira posição nula da floresta e apontando para *A2'*, Figura 5.8(c).

Observação 5.3: São liberados os espaços de memória de todas as árvores que não estão mais na RNP

Figura 5.8: Exemplo da construção de uma nova árvore, utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com uma árvore; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com duas árvores.

2°. União de duas árvores:

A união de duas árvores, utilizando o operador 1, ocorre quando dispositivos seccionadores conectando nós de duas árvores distintas são fechados, e pelo menos um desses nós é um nó raiz. Em situações como essa uma das árvores deve conectar-se à outra, através do nó raiz. Quando os dois nós são “raízes” das suas

árvores, a árvore com menor ordem, isto é, com menor número de nós, será conectada à outra árvore.

A floresta da Figura 5.9(a) possui duas árvores, sendo a árvore *A1* com 4 nós e a árvore *A2* com 3 nós. Para exemplificar este funcionamento, devem ser fechados os dispositivos seccionadores, entre dois nós que interligam as árvores *A1* e *A2*, envolvendo pelo menos um nó raiz. Por exemplo, através dos nós 4 e 9 (observe que o nó 4 é o nó raiz de *A2*).

Passos desse funcionamento:

- Procura-se qual das duas árvores unir-se-á à outra, através do nó raiz; neste caso a árvore *A2*, Figura 5.9(a);
- Cria-se uma matriz temporária *Atmp*, para armazenar os nós e ordenar as novas profundidades da árvore *A2*, que será conectada à árvore *A1*, Figura 5.9(b);
- Copiam-se os dados da árvore *A1*, até o nó que vai receber a árvore *A2*, neste caso até o nó 9, dando origem a árvore *A1'*. Em seguida acrescenta-se a árvore *Atmp* em *A1'*, e, para finalizar, colocam-se em *A1'* os dados restantes da árvore *A1*, Figura 5.9(b);
- Por fim, cria-se um ponteiro, que é armazenado na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de *A1*, este ponteiro deve ser apontando para a árvore *A1'*, Figura 5.9(c).

Figura 5.9: Exemplo da união de duas árvores utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.

3°. Unir uma sub-árvore à outra árvore:

Esta ação funcional equivale à ação funcional 1 mais a ação funcional 2, do operador 1; contudo, fazendo-se ambas de uma só vez, o que acontece quando um dispositivo seccionador (pode haver mais de um dispositivo seccionador) é aberto entre dois nós de uma árvore, gerando assim uma sub-árvore; ao mesmo tempo, verifica-se uma aresta reserva que interliga a sub-árvore a uma outra árvore, com a lembrança de que, para o operador 1, a sub-árvore deve conectar-se à outra árvore, através do seu nó raiz.

A floresta da Figura 5.10(a) é igual à floresta da Figura 5.9(a), possuindo duas árvores, sendo a árvore *A1* com 4 nós e a árvore *A2* com 3 nós. Para exemplificar esta ação funcional devem-se abrir os dispositivos seccionadores, entre os nós 2 e 8, bem como fechar os dispositivos seccionadores entre os nós 5 e 8.

Passos desse funcionamento:

- Cria-se uma matriz temporária chamado de *Atmp*, para armazenar nós e ordenar as novas profundidades da sub-árvore, Figura 5.10(b);
- Copiam-se os dados da árvore *A1*, sem os dados da sub-árvore, gerando assim a árvore *A1'*, Figura 5.10(b);
- Copiam-se na árvore *A2'*; os dados da árvore *A2*, até o nó que vai receber a sub-árvore (*Atmp*); neste caso, até o nó 5, Em seguida, acrescenta-se a sub-árvore *Atmp* em *A2'*; e, por fim, colocam-se em *A2'* os dados restantes da árvore *A2*, Figura 5.10(b);
- Para finalizar, criam-se dois ponteiros, o primeiro é armazenado na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de *A1*, este ponteiro é apontado para árvore *A1'*, o segundo ponteiro é armazenado na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de *A2*, este ponteiro deve ser apontado para *A2'*, Figura 5.10(c).

Figura 5.10: Exemplo da união de uma sub-árvore à outra árvore, utilizando o operador 1; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com duas árvores.

5.2.2 Funções do operador 2

1. Reordenar nós de uma mesma árvore:

A reordenação dos nós de uma mesma árvore deve ser feita quando um ou mais dispositivos seccionadores se abrem entre dois nós de uma árvore; assim, parte desta árvore é podada, formando uma sub-árvore, mas, no entanto, existe uma aresta reserva que une um nó da árvore remanescente a outro nó da sub-árvore. Devem ser reordenados, então, os nós da sub-árvore, para depois conectá-la na árvore remanescente, formando uma nova árvore.

A floresta da Figura 5.11(a) é composta de uma árvore A1, contendo 7 nós. Para mostrar o processo desta composição, devem-se abrir os dispositivos seccionadores, entre os nós 4 e 5, investigando a existência de alguma aresta reserva, que liga a árvore remanescente com a sub-árvore; no caso em questão tem-se uma aresta reserva ligando os nós 5 e 8.

Passos desse funcionamento:

- Após a abertura de um dispositivo seccionador, verifica-se a existência de uma aresta reserva, ligando a sub-árvore à árvore remanescente; no caso existe uma aresta reserva entre os nós 5 e 8;
- Cria-se uma matriz temporária *Atmp*, para armazenar os nós e ordenar as novas profundidades da árvore podada, Figura 5.11(b);

- Copiam-se na árvore $A1'$, os dados da árvore $A1$, até o nó que vai receber a sub-árvore ($Atmp$), neste caso até o nó 8; em seguida acrescenta-se a árvore $Atmp$ em $A1'$ e, por fim, colocam-se em $A1'$ os dados restantes da árvore $A1$, Figura 5.11(b);
- Para finalizar, cria-se um ponteiro, que é armazenado na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de $A1$, este ponteiro é apontando para árvore $A1'$, Figura 5.11(c).

Figura 5.11: Exemplo da reordenação de nós de uma mesma árvore, utilizando o operador 2; (a) Floresta inicial com uma árvore; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.

2. União de duas árvores:

Analogamente ao que ocorre na união de duas árvores, utilizando o operador 1, se for utilizado o operador 2 isso também acontece, quando um ou mais dispositivos seccionadores são fechados; contudo, para o operador 2, nenhum daqueles nós é nó raiz e, portanto, nenhuma das duas árvores se conecta a outra, através do nó raiz, o que difere do operador 1.

A floresta da Figura 5.12(a) é igual à floresta da Figura 5.9(a), com duas árvores, sendo a árvore $A1$ com 4 nós e a $A2$ com 3 nós. Para exemplificar esta função, devem ser fechados os dispositivos seccionadores de uma aresta, que interliga as duas árvores, mas não através dos nós “raízes”. Então, fechando os dispositivos seccionadores entre os nós 5 e 9, pode utilizar-se o operador 2 para unir essas duas árvores.

Passos dessa função:

- Procura-se qual das duas árvores contém a menor quantidade de nós; unindo-a depois à outra árvore; neste caso a árvore $A2$ será conectada à árvore $A1$, Figura 5.12(a);
- Cria-se uma matriz temporária A_{tmp} , para armazenar os nós e re-ordenar as profundidades da árvore $A2$, de acordo com o nó que será unido à árvore $A1$, ou seja, o novo nó raiz desta árvore, que, no caso, é o nó 5, Figura 5.12(b);
- Copiam-se na árvore $A1'$, os dados da árvore $A1$, até o nó que vai receber a árvore A_{tmp} ; neste caso até o nó 9; em seguida, acrescenta-se a árvore A_{tmp} em $A1'$ e finalmente se colocam em $A1'$ os dados restantes da árvore $A1$, Figura 5.12(b);
- Para finalizar, cria-se um ponteiro, que é armazenando na posição da floresta que se armazenava o ponteiro de $A1$, este ponteiro deve ser apontando para a árvore $A1'$, Figura 5.12(c).

Figura 5.12: Exemplo da união de duas árvores utilizando o operador 2; (a) Floresta inicial com duas árvores; (b) Árvores Temporárias; (c) Floresta final com uma árvore.

5.3 Saída do configurador de redes

Da mesma forma que um configurador de redes tradicional, a saída do configurador de redes proposto constitui-se da topologia da rede, no modelo barra-ramo, e dos parâmetros do SEP.

Para possibilitar a integração do configurador proposto ao estimador de estado desenvolvido no LACO, os dados de saída do configurador proposto serão apresentados em um arquivo no formato *.txt*, que será utilizado como banco de entrada de dados pelo programa supracitado.

5.4 Exemplos

Utilizar-se-á o SEP genérico apresentado na Figura 5.2, para exemplificar o funcionamento do configurador de redes “tracking” proposto.

Observação 5.4: Quando o configurador de redes é “inicializado”, todos os dispositivos seccionadores são considerados abertos. Conseqüentemente, para cada SBB do SEP é atribuído um número, que será utilizado durante todo o processo do configurador de redes (Figura 5.2).

5.4.1 Inicializando as estruturas RNP, AR e RBS

A partir dos dados de entrada do SEP, apresentado na Figura 5.2², com a descrição das SBBs e seus dispositivos seccionadores, o configurador de redes proposto inicializa as estruturas RNP, AR e RBS, da maneira apresentada nas seções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3, respectivamente.

² Os estados dos dispositivos seccionadores mostrados na Figura 5.2 são obtidos através de telemedidas e estão sujeitos a mudanças.

A Figura 5.13(a) mostra a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo, do SEP apresentado na Figura 5.2. A Figura 5.13(b) indica as estruturas RNP, AR e RBS do SEP da Figura 5.2, que são as mesmas apresentadas nas seções 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3, respectivamente.

Figura 5.13: (a) Modelo barra-ramo do SEP da Figura 5.2; (b) RNP, AR e RBS do SEP da Figura 5.2.

Análise da Figura 5.13

- Há três árvores representadas na estrutura RNP³: a árvore 1 com os nós 1, 2, 4, 5, 6 e 8; a árvore 2 com o nó 3; e a árvore 3 com o nó 7 (Figura 5.13(b));
- A aresta entre os nós 2 e 8 do SEP da Figura 5.2 não está na estrutura RNP, pois forma um ciclo; assim tal aresta é armazenada como uma aresta reserva na estrutura AR. Entretanto, aquela aresta vai ser utilizada

³ O nó *a* na RNP corresponde à seção de barramento de barra *a* do SEP.

na saída do configurador de redes, possuindo assim um indicativo (“1”), na terceira posição de memória; as demais arestas reservas não são utilizadas na saída do configurador e seu indicativo é (“0”), Figura 5.13(b).

- Analisando a estrutura RBS apresentada na Figura 5.13(b), pode-se concluir que: as SBBs 1, 2 e 8 não são conectadas por nenhum dispositivo seccionador a outra SBB, dentro da mesma subestação (ver Figura 5.2), assim, cada uma dessas SBBs constitui uma única barra da rede, como pode ser visto na estrutura RBS da Figura 5.13(b).
- As SBBs 3 e 7 são isoladas (ver Figura 5.2), isto é, não estão conectadas a nenhuma outra SBB. Como estas SBBs não estão ligadas a nenhuma unidade geradora, as mesmas não fazem parte da rede energizada. Assim, na estrutura RBS, atribui-se zero à posição correspondente a tais SBBs, pois elas não são utilizadas na saída do configurador de redes, Figura 5.13(b).
- As SBBs 4, 5 e 6 são conectadas por dispositivos seccionadores, em uma mesma subestação (ver Figura 5.2), formando, desta forma, somente uma barra da rede no modelo barra-ramo. Assim, as posições correspondentes, na estrutura RBS da Figura 5.13(b), armazenam um mesmo número. Neste caso, o configurador proposto armazena o menor número, dentre os números atribuídos às SBBs que estão conectadas, para representar a barra no modelo barra-ramo. No caso é a SBB 4 (que se torna a barra 4 no modelo barra-ramo).
- A partir da análise das estruturas RNP, AR e RBS, o configurador de redes informa a saída da rede, no modelo barra-ramo, como mostrado na Figura 5.13(a).

5.4.2 Atualizando as estruturas

Quanto há mudança nos estados de dispositivos seccionadores, o configurador de redes proposto atualiza a topologia da rede, no modelo barra-ramo, obtida na análise do ciclo anterior, trabalhando somente com a parcela afetada das estruturas RNP, AR e RBS. Para atualizar a topologia o configurador de redes

proposto utiliza os operadores 1 e 2, apresentados anteriormente. Assim, nesta seção são apresentados quatro exemplos, sendo dois com a aplicação do operador 1 e outros dois com o operador 2.

A partir dos estados dos dispositivos seccionadores apresentados na Figura 5.2⁴, uma seqüência de mudanças de estados de dispositivos seccionadores será realizada, gerando quatro ciclos consecutivos, apresentados nas Figuras 5.15, 5.17, 5.19 e 5.21.

Observação 5.5: Para facilitar a análise das Figuras 5.15, 5.17, 5.19 e 5.21, será associado apenas um número a cada conjunto de dispositivos seccionadores, como pode ser visto na Figura 5.2.

Observação 5.6: As alterações nos estados dos dispositivos seccionadores do SEP, no modelo barra-ramo, e nas estruturas RNP, AR e RBS, relacionadas a cada ciclo, estão indicadas em vermelho nas Figuras a seguir.

Análise da Figura 5.15

Na Figura 5.15, apresenta-se-nos o chamado ciclo 1; são fechados os dispositivos seccionadores 16 e 19 da Figura 5.2, resultando no sistema da Figura 5.14. A mudança no estado do dispositivo seccionador 16 acarreta a ligação entre os pares de nós 2-7 e 6-7, através das linhas de transmissão LT2 e LT3, respectivamente, bem como a ligação entre os nós 7 e 8, através dos dispositivos seccionadores 16, 17 e 18 (ver Figura 5.14). No caso do fechamento do dispositivo seccionador 19, tem-se a ligação entre os nós 7 e 8, através dos dispositivos seccionadores 19, 20 e 21 (ver Figura 5.14).

Em termos de grafo, tem-se o caso de união de duas árvores. Assim, através do Operador 1, as árvores 1 e 3, da floresta indicada na Figura 5.13(b), são unidas em apenas uma árvore, através da ligação dos nós 2 e 7, como pode ser visto na RNP da Figura 5.15(b).

As ligações entre os pares de nós 7-8 e 7-6 não estão representadas na estrutura RNP, pois elas relacionam nós que já estão nesta estrutura, indicando que aquelas ligações formariam ciclos, que é armazenado na estrutura AR, e o indicativo

⁴ A saída no modelo barra-ramo e as estruturas associadas ao SEP apresentado na Figura 5.2 são apresentadas na Figura 5.13.

da saída do configurador passa de (“0”) para (“1”), como pode ser visto na Figura 5.15(b).

Para atualizar a estrutura RBS, cumpre verificar se alguma subestação teve sua topologia alterada; no caso a subestação 3 é alterada, pois o nó (SBB) 7 uniu-se ao nó (SBB) 8 e, neste caso, a subestação 3 é representada pelo nó de menor índice, que é o nó 7, como pode ser visto na Figura 5.15(b).

Em termos de modelo barra-ramo, as mudanças dos estados dos dispositivos seccionadores consideradas no ciclo 1 ocasionaram apenas a alteração na topologia da subestação 3, que passou a ser representada pelo nó 7, ao invés do no 8, Figura 5.15(a).

Figura 5.14: Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 1.

Figura 5.15: Exemplo do uso do operador 1: “União de duas árvores” (Ciclo 1).

Análise da Figura 5.17

Na Figura 5.17, exibe-se o chamado ciclo 2, que trabalha a partir das informações da topologia da rede, no modelo barra-ramo, e com as estruturas RNP, AR e RBS resultantes do ciclo 1. Ou seja, as mudanças a serem consideradas neste ciclo serão realizadas após aquelas consideradas no ciclo 1.

No caso do ciclo 2, a abertura do dispositivo seccionador 13, apresentado na Figura 5.14, resultando no sistema da Figura 5.16, entre os nós (SBBs) 4 e 6, causa a separação destes nós, dentro da subestação 2, caso este chamando de “bus split”.

Na estrutura RBS é mantido o nó 4, para representar os nós 4 e 5, porquanto continuam interligados na subestação 2 (ver Figura 5.17(b)), já o nó 6 é representado por ele mesmo, pois não está mais ligado a nenhum nó na subestação 2 (ver Figura 5.17(b)).

No ciclo 2, a árvore 1, da floresta mostrada na da Figura 5.15(b), é dividida em duas árvores, uma das quais com os nós 1, 2, 7, 4 e 5; a outra com os nós 6 e 8. Contudo, existe, na estrutura AR, a aresta composta pelos nós 2 e 8 (Figura

5.15(b)), que interliga as duas árvores. Desta forma será utilizado o operador 2, com a função de reordenar nós de uma mesma árvore, para obter a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo.

Após re-ordenar os nós, as duas árvores são ligadas através dos nós 2 e 8, como pode ser visto na estrutura RNP, da Figura 5.17(b). A aresta composta pelos nós 2 e 8, da estrutura AR, foi utilizada na Estrutura RNP, pois agora já não representa um ciclo; assim, esta aresta é retirada da estrutura AR; por outro lado, a estrutura AR recebe a aresta entre os nós 4 e 6, com indicativo igual a ("0"), pois essa aresta não é mais utilizada na saída do configurador de redes (ver Figura 5.17(b)).

A partir da análise das estruturas RNP, AR e RBS atualizadas, obtém-se a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo apresentado na Figura 5.17(a); a alteração da saída do ciclo 1 para o ciclo 2 está na subestação 2, onde a SBB 6 está separada das SBBs 4 e 5.

Figura 5.16: Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 2.

Figura 5.17: Exemplo do uso do operador 2 “Reordenar nós de uma mesma árvore” (Ciclo 2).

Análise da Figura 5.19

Na Figura 5.19 ilustra-se o chamado ciclo 3, que trabalha com as informações da topologia da rede, no modelo barra-ramo, e com os dados das estruturas RNP, AR e RBS resultantes das alterações consideradas no ciclo 2.

Neste ciclo, são abertos os dispositivos seccionadores 17 e 20, apresentados na Figura 5.16, resultando no sistema da Figura 5.18. A mudança no estado do dispositivo seccionador 17 acarreta a separação dos pares de nós 2-8 e 6-7, que estavam conectados através das linhas de transmissão LT2 e LT3, respectivamente, bem como a separação dos nós 7 e 8, que estavam conectados através de dois conjuntos de seccionadores fechados: (i) dispositivos seccionadores 16, 17 e 18; e (ii) dispositivos seccionadores 19, 20 e 21 (ver Figura 5.16).

Em termos de grafo, a árvore 1, da floresta mostrada na Figura 5.17(b), é dividida em duas árvores, uma das quais com os nós 1, 2, 7, 4 e 5; a outra com os nós 6 e 8 (ver estrutura RNP da Figura 5.19(b)); esta divisão ocorre devido a desconexão dos nós 2 e 8, e a desconexão das arestas composta pelos nós (6 e 7)

e (7 e 8), que estão ilustradas na estrutura AR, da Figura 5.17(b). Utilizar-se-á o operador 1, com a função de construir uma nova árvore, para obter a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo.

Na estrutura RBS armazena-se zero na posição que indica as SBBs 6 e 8, uma vez que estas não estão ligadas a nenhuma unidade geradora, não fazendo parte da rede energizada Figura 5.19(b); já as arestas entre os nós (6 e 7) e (7 e 8) agora aparecem na estrutura AR, com indicativo igual a ("0"), pois não é mais utilizada na saída do configurador de redes. A aresta entre os nós 2 e 8 é armazenada novamente na estrutura AR, com indicativo igual a ("0"), pois sua conexão é perdida devido a abertura do dispositivo seccionador 17 (ver Figura 5.19(b)).

Com os dados das estruturas RNP, AR e RBS atualizados, tem-se a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo, sem a linha de transmissão LT3 e a barra 6 da rede (Figura 5.19(a)).

Figura 5.18: Estados de dispositivos seccionadores considerados no Ciclo 3.

Figura 5.19: Exemplo do uso do operador 1: “Construir uma nova árvore” (Ciclo 3).

Análise da Figura 5.21

Na Figura 5.21, apresenta-se-nos o chamado ciclo 4, que trabalha com as informações da topologia da rede no modelo barra-ramo e com os dados das estruturas RNP, AR e RBS, resultantes do ciclo 3.

No caso do ciclo 4, é fechado o dispositivo seccionador 13, apresentado na Figura 5.18, resultando no sistema da Figura 5.20. Em razão de esse seccionador estar localizado entre os nós 4 e 6, que correspondem a duas SBBs da subestação 2, ambas passam a constituir apenas uma barra da rede. Como o nó 6 fazia parte, juntamente com o nó 8, de uma outra árvore não energizada (árvore 3), temos a união das árvores 1 e 3 da floresta indicada na Figura 5.19(b), porém não através de nó raiz. Assim, utiliza-se o operador 2, com a função de unir duas árvores, para este ciclo.

A ligação entre os nós 4 e 6 é eliminada da estrutura AR, Figura 5.19(b), uma vez que agora esta ligação é representada na estrutura RNP, indicada na Figura 5.21(b).

Figura 5.21: Exemplo do uso do operador 2: “Unir duas árvores” (Ciclo 4).

5.4.3 Inicializando as estruturas RNP, AR e RBS, com associação de medidores

Além das informações da topologia da rede no modelo barra-ramo, é possível obter também, através dos dados das estruturas RNP, AR e RBS, as informações necessárias para atribuir às medidas realizadas nas subestações, nas barras do sistema no modelo barra-ramo.

Neste trabalho serão considerados os arranjos de medidores da Figura 5.22, que são os mesmos arranjos (a) e (b) da Figura 3.5, apresentados previamente no Capítulo 3. Entretanto, deve-se destacar que o configurador de redes proposto pode ser adaptado para trabalhar com outros arranjos de medidores.

Figura 5.22: Arranjos de medidores utilizados neste trabalho.

Como descrito no Capítulo 3, seção 3.2.1, em ambos os arranjos apresentados na Figura 5.22 os medidores de potência ativa e reativa são atribuídos à linha de transmissão LT, isto é, para o modelo barra-ramo aqueles medidores são representados por medidas de fluxo no ramo que vai representar a LT (Figura 5.23(a) e 5.24(a)). Essa associação acontece, também, se tivéssemos um transformador de potência, ao invés de uma LT, ligado às SBBs apresentadas na Figura 5.22. Ou seja, em termos de modelo barra-ramo os medidores de potência seriam representados por medidas de fluxo no ramo que vai representar o transformador. Entretanto, quando, ao invés de uma LT, tiver-se a conexão de um componente shunt (capacitor, reator, condensador síncrono, unidades geradoras, cargas, etc), para o modelo barra-ramo aqueles medidores seriam representados por medidas de injeção de potência, nas barras que vão representar aquelas SBBs (Figura 5.23(b) e 5.24(b)). Importa mencionar que, se em uma barra existir mais de um componente shunt, deve-se atribuir à medida de injeção na barra, apenas se todos os dispositivos shunt possuírem um medidor de potência.

Para possibilitar a associação das medidas de fluxo e injeção de potência aos componentes do sistema no modelo barra-ramo, através da análise das estruturas RNP, AR e SBR, o configurador proposto cria barras fictícias, para representar os componentes shunt do sistema. A função dessas barras é indicar os medidores de potência que devem ser representados através de medidas de injeção. Isto é, analisando as estruturas supracitadas, quando for encontrado algum medidor de

potência em um ramo que conecta uma SBB com uma barra fictícia, no modelo barra-ramo tal medida será representada por uma medida de injeção na barra correspondente àquela SBB (Figura 5.23(b) e 5.24(b)). Por outro lado, se o medidor de potência estiver num ramo que conecta duas SBBs, tal medidor será representado por uma medida de fluxo naquele ramo (Figura 5.23(a) e 5.24(a)).

Figura 5.23: Possibilidades de associação de medidores relativo ao arranjo (a) da Figura 5.22: (a) ligações entre SBBs, (b) ligação entre SBB e componente shunt.

Figura 5.24: Possibilidades de associação de medidores relativo ao arranjo (b) da Figura 5.22: (a) ligações entre SBBs, (b) ligação entre SBB e componente shunt.

Face ao exposto, no banco de dados de entrada do configurador proposto, apresentado detalhadamente no Anexo A, tem-se a relação medida-ramo. Assim, uma vez definido os ramos que serão apresentados no modelo barra-ramo final na saída do configurador, basta verificar se existem medidas relacionadas a esses ramos.

A Figura 5.25 ilustra o SEP, apresentado na Figura 5.2, mas agora com arranjos de medidores. Observa-se, também, na Figura 5.25, que foi criado cinco barras fictícias, representando os seguintes dispositivos shunt: unidade geradora UG1, condensador síncrono CS1, carga1, carga2 e carga3, com os seguintes números respectivamente 9, 10, 11, 12 e 13.

Em razão de os ramos ligando SBB e barras fictícias serem de fundamental importância para associação de medidas, tais ramos devem ser representados nas estruturas RNP, AR e SBR. Assim, as barras fictícias do sistema são armazenadas normalmente na estrutura RNP, de acordo com as suas conexões com as SBBs. Porém, barras fictícias não são utilizadas para informar a topologia da rede, no modelo barra-ramo. Desta forma, na estrutura AR as arestas que possuem uma barra fictícia são armazenadas com indicativo “0” ou “1”, na terceira posição de memória; entretanto, neste caso, o indicativo “1” será utilizado apenas para atribuição de medidas de injeção de potência. Já na estrutura RBS, atribui-se “0” para representar as barras fictícias.

A Figura 5.26(a) mostra a saída do configurador de redes no modelo barra-ramo, do SEP apresentado na Figura 5.25, com a devida associação das medidas. A Figura 5.26(b) apresenta as estruturas RNP, AR e RBS do SEP da Figura 5.25.

Figura 5.25: Sistema genérico para análise do configurador de redes proposto, incluindo arranjos de medidores.

dois, da estrutura SBR, é atribuído “0”, indicando que essas barras não serão apresentadas no modelo barra-ramo final (saída do configurador).

- Para fazer a associação de medidas de fluxo e de injeção de potência nos devidos componentes no modelo barra-ramo, o configurador de redes proposto verifica, através do banco de entrada de dados, se um determinado medidor é incidente a um ramo entre duas SBBs; ou a um ramo entre uma SBB e uma barra fictícia. Das diversas medidas existentes na Figura 5.25, será analisado duas situações para verificar como se dá a associação de medidas:
 - Medidor entre os nós 1 e 9: o nó 9 corresponde a uma barra fictícia, assim o medidor incidente a esta aresta será representado por uma medida de injeção na barra 1 da rede no modelo barra-ramo;
 - Medidor entre os nós 8 e 6: os nós 8 e 6 correspondem a SBBs. Desta forma, o medidor incidente a esta aresta será representado por uma medida de fluxo, da barra 8 para a barra 4, da rede no modelo barra-ramo, uma vez que a SBB 6 é representada pela barra 4, na estrutura RBS.

5.4.4 Atualizando as estruturas, com associação de medidores

Nesta seção serão analisados os mesmos quatro ciclos de alteração de estados de dispositivos seccionadores, apresentados na seção 5.4.2. Porém, agora, ao invés de considerar como ponto de partida o sistema apresentado na Figura 5.2, será considerado o sistema apresentado na Figura 5.25. A única diferença entre esses sistemas é que no sistema da Figura 5.25 apresentam-se arranjos de medidores. Face ao exposto, nesta seção será analisado apenas o funcionamento do configurador proposto em termos de alterações relativas à atribuição de medidas, uma vez que na seção 5.4.2 já foi apresentado como o mesmo procede a atualização da topologia da rede.

Análise da Figura 5.27

Ciclo 1 (Figura 5.27): são fechados os dispositivos seccionadores 16 (conectando os pares de nós 2-7, 7-6 e 7-8) e 19 (conectando os pares de nós 7-8). Devido a esta alteração, temos a união das SBBs 7 e 8, que passam a constituir apenas uma barra do modelo barra-ramo, que passa a ser representada pela SBB 7 (ver estrutura RBS da Figura 5.27(b), mais detalhes podem ser visto na análise da Figura 5.15. Em termos de associação de medidores no modelo barra-ramo, as medidas que estavam associadas à barra 8, passam a ser associadas à barra 7 (Figura 5.27(a)).

Figura 5.27: Ciclo 1: associação de medidores.

Análise da Figura 5.28

Ciclo 2 (Figura 5.28); abre-se o dispositivo seccionador 13 (desconectando os nós 4 e 6). Temos um caso de “bus-split”, isto é, uma barra do modelo barra-ramo se divide em duas. Isto porque, com a abertura daquele dispositivo seccionador, a SBB 6 se separa das SBBs 4 e 5, do sistema da Figura 5.25 (mais detalhes da alteração na topologia do sistema pode ser visto na análise da Figura 5.17). Em termos de associação de medidores no modelo barra-ramo, a única mudança, em relação ao ciclo 1, é que a medida de fluxo que era atribuída ao ramo (4-7), da barra 4 para barra 7, passa a ser atribuída ao ramo (6-7), da barra 6 para barra 7 Figura 5.28(a).

Figura 5.28: Ciclo 2: associação de medidores.

Análise da Figura 5.29

Ciclo 3 (Figura 5.29): são abertos os dispositivos seccionadores 17 (desconectando os pares de nós 7-8, 7-6 e 2-8) e 20 (desconectando os nós 7 e 8). Verifica-se, a partir da análise da Figura 5.19, que as SBBs 6 e 8 não fazem mais parte de uma árvore energizada. Desta forma, todos os medidores que eram atribuídos a essas SBBs, não serão mais representados na rede, no modelo barra-ramo, como pode ser visto na Figura 5.29(a) e (b).

Figura 5.29: Ciclo 3: associação de medidores.

Análise da Figura 5.30

Ciclo 4 (Figura 5.30); fecha-se o dispositivo seccionador 13 (conectando os nós 4 e 6). Neste ciclo a árvore 1 e a árvore 3, do sistema da Figura 5.29, são unidas em apenas uma árvore, como pode ser visto nas estruturas apresentadas na

Figura 5.30(b) (mais detalhes da alteração da topologia pode ser visto na análise da Figura 2.21). Em termos de associação de medidas no modelo barra-ramo, todas as medidas atribuídas a SBB 6, agora será atribuídas a SBB 4, visto que agora as SBBs 4 e 6 foram unidas, passando a constituir apenas uma barra da rede, no modelo barra-ramo (ver estrutura RBS da Figura 5.30(b)). Como a SBB 8 esta presente novamente na saída do configurador de redes, no modelo barra-ramo, todas as medidas atribuídas a essa SBB serão também apresentadas na saída; com exceção da medida de fluxo no ramo (8-2), da barra 8 para barra 2, pois as SBBs não estão conectadas.

Figura 5.30: Ciclo 4: associação de medidores.

Para mostrar a eficiência do configurador de redes proposto, no capítulo 6 são apresentados alguns testes realizados com os sistemas IEEE de 6 e 14 barras, associados a arranjos de barramento de subestações do Sistema Interligado Sudeste do Brasil.

5.5 Análise de complexidade do algoritmo de atualização da topologia do SEP no modelo barra-ramo.

```

// o vetor arestas_alteradas é obtido a partir do disjuntor alterado, ver análise de complexidade abaixo.
1  Atualização_topologia (disj_alterado, arestas_alteradas)
2  PARA i de 1 ate tamanho(arestas_alteradas) FACA
3    SE estado do disj_alterado == "ABERTO" FACA
      // AR – estrutura arestas reservas
      // verifica se existe a aresta arestas_alteradas[i] na estrutura AR
4      PARA j de 1 ate tamanho(AR) FACA
5        aresta_esta_em_AR = "NAO"
6        SE aresta_alterada[i] == AR[j] FACA
7          atualiza_AR(AR[j])
8          aresta_esta_em_AR = "SIM"
9        FIM SE
10     FIM PARA
11     SE aresta_esta_em_AR == "NAO" FACA
      // determina o nó de poda p dada a aresta alterada.
12     determina_p(arestas_alteradas[i])
13     SE existe(p) FACA
      // determina o nó a adjacente a p, e o novo nó raiz r.
14     determina_a_r(p)
15     SE existe(a) E existe(r) FACA
16       SE arvore(p) == arvore(a) FACA
        // aplica-se o Operador2 para atualizar as estruturas RNP e AR
        // reordenando nós de uma mesma árvore
        operador2(p, r, a)
17       FIM SE
18       FIM SE
19       SE existe(a) E nao_existe(r) FACA
20         SE arvore(p) != arvore(a) FACA
          // aplica-se o Operador1 para atualizar as estruturas RNP e AR
          // unindo uma sub-árvore a outra árvore
          operador1(p, a)
21         FIM SE
22         FIM SE
23         SE nao_existe(a) E nao_existe(r) FACA
          // aplica-se o Operador1 para atualizar as estruturas RNP e AR
          // para construir uma nova árvore
          operador1(p)
24         FIM SE
25         FIM SE
26       FIM SE
27       FIM SE
28     FIM SE
29     SE NAO
      // determina o nó de poda p dada a aresta alterada.
30     determina_p(arestas_alteradas[i])
31     SE existe(p) FACA
      // determina o nó a adjacente a p, o novo nó raiz r.
32     determina_a_r(p)
33     SE existe(a) E nao_existe(r) FACA
34       SE arvore(p) != arvore(a)
        // aplica-se o Operador1 para atualizar as estruturas RNP e AR
        // unindo duas árvores
        operador1(p, a)
35       FIM SE
36       FIM SE
37       SE existe(a) E existe(r) FACA
38         SE arvore(p) != arvore(a)
          // aplica-se o Operador2 para atualizar as estruturas RNP e AR
          // unindo duas árvores
          operador2(p, r, a)
39         FIM SE
40         FIM SE
41       FIM SE
42       FIM SE
43     FIM SE
44     informa_subestacoes_alteradas(arestas_alteradas)
45   FIM SE
46 FIM SE
47 FIM SE

```

Algoritmo 1: Atualização da topologia, no modelo barra-ramo, após a mudança de estado de dispositivo seccionador.

Análise de complexidade da função disjuntor alterado

A função que verifica qual disjuntor foi alterado e consequentemente as arestas alteradas, possui complexidade da ordem $O(n_{MA} \times n_{MDA})$, onde o número n_{MA} é o número máximo de arestas relacionada ao disjuntor alterado e n_{MDA} , corresponde ao número máximo de disjuntores que interligam uma aresta. Ambos n_{MA} e n_{MDA} podem ser limitados por constantes. Assim, a complexidade da função será da ordem $O(1)$.

Análise de complexidade da função determina_p

A função que acha o nó de poda **p** possui complexidade $O(1)$, pois somente compara as profundidades dos nós da aresta alterada para verificar qual será o nó **p**.

Análise de complexidade da função determina_a_r

A função que determina o nó adjacente **a** e o novo nó raiz **r**, possui complexidade da ordem de $O(t_{AR})$, sendo t_{AR} o número de arestas reservas do SEP. Pois, para verificar se a aresta alterada está presente na estrutura AR (determinando os nós **a** e **r**), tal função percorre essa estrutura apenas uma vez.

Análise de complexidade do Operador1 e do Operador 2

O operador1 e o operador 2 percorrem a RNP da árvore que será alterada. Além disso, esses operadores percorrem uma vez a estrutura AR. Assim, esses operadores têm ordem de complexidade igual a $O(t_A + t_{AR})$, onde t_A é o tamanho da árvore.

Análise de complexidade do Algoritmo 1

As rotinas entre as linhas (4-10), do algoritmo1, possuem complexidade $O(t_{AR})$, pois tem-se um laço que percorre todas as arestas para verificar se a aresta alterada está nos dados da estrutura AR.

As rotinas entre as linhas (15-19), (20-24) e (25-26), possuem a mesma complexidade, que são as complexidades das funções do operador1 e do operador2 que é $O(t_A + t_{AR})$. Assim, a complexidade das rotinas entre as linhas (13-28) será o somatório da complexidade entre as linhas (15-19), (20-24) e (25-26), mais a

complexidade da função determina_a_r, que resulta em $O(t_A + t_{AR} + t_A + t_{AR} + t_A + t_{AR} + t_{AR}) = O(t_A + t_{AR})$.

A complexidade das rotinas apresentadas entre as linhas (11-29), será na ordem da complexidade entre as linhas (13-28), mais a complexidade da função determina_p, ou seja, ordem $O(t_A + t_{AR})$.

Entre as linhas (3-30) tem-se a ordem de complexidade descrita entre as linhas (11-29) mais as descritas entre as linhas (4-10), o que resulta na ordem $O(t_A + t_{AR} + t_{AR}) = O(t_A + t_{AR})$.

Entre as linhas (34-38) e (39-43) tem-se complexidade da ordem da complexidade dos operador1 e operador2. Assim, a complexidade entre as linhas (30-46), possui a complexidade das rotinas entre as linhas (34-38), mais os das linhas (39-43), mais as da função determina_a_r e mais as da função determina_p, resultando na complexidade da ordem $O(t_A + t_{AR} + t_A + t_{AR} + t_{AR}) = O(t_A + t_{AR})$.

Portanto, a complexidade do algoritmo de atualização da topologia da rede no modelo barra-ramo, que compõem a rotina entre as linhas (2-47), terá ordem igual a complexidade das rotinas entres as linhas (3-30), mais a das linhas (30-46), ou seja, terá ordem $O(t_A + t_{AR} + t_A + t_{AR}) = O(t_A + t_{AR})$.

5.6 Comparação da complexidade do algoritmo de atualização da topologia do SEP proposto com algoritmos convencionais de busca em grafo.

Conforme apresentado na seção anterior, a complexidade do algoritmo de atualização do configurador proposto é da ordem $O(t_A + t_{AR})$.

Para atualizar a topologia de um SEP, os configuradores “Tracking” tradicionais fazem uso de algoritmos de busca em grafo, o que requer um maior esforço computacional, pois, os mesmos possuem complexidade da ordem $O(n_N + n_A)$, onde n_N é o número de nós e n_A é o número de arestas do grafo (CORMEN et al., 1990).

Face ao exposto, pode-se dizer que o configurador proposto atualiza o sistema de forma mais rápida do que os configuradores tradicionais. Pois, em geral, $O(t_A + t_{AR}) < O(n_N + n_A)$.

Capítulo 6

Testes e Análise de Resultados

Para mostrar a eficiência do configurador de redes proposto, neste capítulo são apresentados alguns testes realizados com os sistemas de 6 e 14 barras do IEEE, associados a arranjos de barramento de subestações do Sistema Interligado Sudeste do Brasil.

Os sistemas IEEE não possuem nenhum modelo de arranjos de barramento de subestação, isto é, não se tem os arranjos das subestações no modelo. Assim, para tornar os testes realizados neste trabalho o mais próximo da realidade, resolveu-se trabalhar com arranjos de barramento de subestação do Sistema Interligado Sudeste do Brasil.

Alguns arranjos utilizados neste trabalho foram retirados da Resolução (RS-SE-306/78) de 04/01/1978, e estão apresentados na próxima seção, com suas características especificadas.

6.1 Arranjos de barramento de interligação

Arranjo número 1:

Este arranjo, conhecido como disjuntor e meio, é constituído de barra dupla, sendo ambas de operação, com a característica de possuir um disjuntor e meio para cada equipamento (Figura 6.1).

Vantagens:

- Permite o isolamento de qualquer disjuntor ou barra sem interrupção do serviço.

- Permite que as manobras para transferência de barra sejam feitas através de disjuntores.
- Permite minimizar os riscos de operação incorreta de seccionadores, devido não somente ao próprio arranjo, como também ao esquema relativamente simples de intertravamento entre os dispositivos seccionadores.
- Apresenta ótima flexibilidade operativa.
- Apresenta boa confiabilidade para o sistema por ocasião de impedimentos para manutenção.

Desvantagens:

- Com um disjuntor fora de serviço, a operação automática do disjuntor adjacente poderá causar uma interrupção desnecessária do circuito.
- A operação incorreta de disjuntores poderá afetar equipamentos adjacentes e, em casos extremos, separar o sistema na subestação.
- Apresenta pouca visibilidade da instalação, aumentando o risco de manobras errôneas.

Utiliza-se este arranjo na subestação (2) do sistema de 6 e nas subestações (1, 2, 6 e 10) do sistema de 14 barras do IEEE.

Figura 6.1: Arranjo número 1.

Arranjo número 2:

Este arranjo é constituído de barra dupla de operação, podendo qualquer uma delas ser usada como barra de transferência (Figura 6.2).

Vantagens:

- Permite o isolamento de qualquer disjuntor ou barra sem interrupção do serviço.
- Permite que a operação normal seja efetuada por uma ou por ambas as barras.
- Apresenta boa flexibilidade operativa.

Desvantagens:

- Quando apresenta superposição física de barras, reduz substancialmente a confiabilidade do sistema, por ocasião de certos serviços de manutenção na barra superior.
- Não possui seccionamento de barras.

Variantes deste arranjo:

- O “by-pass” do disjuntor ao invés de estar conectado entre as chaves seccionadoras seletoras de barra, está conectado diretamente a uma única barra. Portanto, introduz a desvantagem de redução da flexibilidade operativa.

Utiliza-se este arranjo na subestação (6), do sistema de 6 barras do IEEE, e na subestação (9), do sistema de 14 barras do IEEE.

Figura 6.2: Arranjo número 2.

Arranjo número 3:

Este arranjo é constituído de barra dupla, sendo uma de operação e outra de transferência, porém com operação normal limitada a uma única barra (Figura 6.3).

Vantagens:

- Permite o isolamento de qualquer disjuntor sem interrupção do serviço.

Desvantagens:

- Não permite o isolamento da barra de operação sem interrupção do serviço.
- Apresenta pouca flexibilidade operativa.
- Apresenta pouca confiabilidade para o sistema por ocasião de impedimentos para manutenção.
- Quando apresenta superposição física de barras reduz substancialmente a confiabilidade do sistema por ocasião de certos serviços de manutenção na barra superior.

Variantes deste arranjo:

- Apresenta barra de operação e/ou de transferência sem seccionamento. Portanto, introduz uma desvantagem adicional de se ter de impedir toda a barra para manutenção, ao invés de trechos de barra.
- Não possui disjuntor de transferência, eliminando, portanto, para este caso, a única vantagem apontada para este arranjo.

Utiliza-se este arranjo na subestação (1) do sistema de 6 barras do IEEE e nas subestações (7 e 8) do sistema de 14 barras do IEEE.

Figura 6.3: Arranjo número 3.

Observação 6.1: Nos testes realizados, o arranjo número 3 não possui dispositivos seccionadores separando uma mesma barra, como indicado na Figura 6.3.

Arranjo número 4:

O arranjo descrito a seguir não é exposto na Resolução (RS-SE-306/78) de 04/01/1978, foi retirado da subestação 3 do SEP proposto por Prais e Bose (1988). Este arranjo é composto por três barras de operação, ligadas uma na outra através de dispositivos seccionadores, formando assim um anel (Figura 6.4).

Utiliza-se este arranjo na subestação (3) do sistema de 6 e 14 barras do IEEE.

Figura 6.4: Arranjo número 4.

Outros arranjos:

Os arranjos da subestação (4) do sistema de 6 barras do IEEE (Figura 6.7) e os arranjos das subestações (4 e 5) do sistema de 14 barras do IEEE (Figura 6.12) foram elaborados de acordo com os dados das ligações entre as barras do sistema de 6 e 14 barras do IEEE, isso quando a ligação for composta por transformadores.

No caso do sistema de 6 barras do IEEE, tem-se um transformador entre as barras 4 e 5; já no sistema de 14 barras do IEEE, tem-se três transformadores, sendo o primeiro entre as barras 5 e 6, o segundo entre as barras 4 e 9 e o terceiro entre as barras 4, 8 e 9 (este último sendo um transformador de três enrolamentos, o que exige a utilização de uma barra fictícia, barra 7, no sistema de 14 barras do IEEE).

Na próxima seção são apresentados os testes realizados nos sistemas propostos.

6.2 Testes com os sistema de 6 e 14 barras do IEEE

Para cada sistema tem-se:

- O SEP em nível de seção de barramento associados aos dispositivos seccionadores, incluindo os arranjos de medidores nas subestações.
- O SEP no modelo barra-ramo com a correspondente configuração de medidores.
- O SEP no modelo barra-ramo, depois de mudanças nos estados dos dispositivos seccionadores, a serem indicados na sequência.
- Comentários para cada mudança dos estados dos dispositivos seccionadores, em relação à topologia da rede e a configuração de medidores.
- Para o sistema de 6 barras do IEEE será apresentado também, juntamente com cada modelo barra-ramo, as estruturas RNP, AR e RBS.

A Tabela 6.1 indica as legendas utilizadas nas próximas Figuras deste capítulo.

Tabela 6.1 – Legenda.

Legenda	
UG	Unidade Geradora
TR	Transformador
BC	Bando de Capacitor
CS	Condensador Síncrono
LT	Linha de Transmissão

Nas Figuras 6.5 e 6.6 têm-se, respectivamente, os sistemas de 6 e 14 barras do IEEE, sem associação dos arranjos de medidores.

Figura 6.5: Sistema de 6 barras do IEEE, sem associação de arranjos de subestação.

Figura 6.6: Sistema de 14 barras do IEEE, sem associação de arranjos de subestação.

A Figura 6.7 apresenta o sistema de 6 barras do IEEE, em nível de seção de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo os arranjos de medidores nas subestações.

Figura 6.7: Sistema de 6 barras do IEEE em nível de seção de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores.

Figura 6.8: Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7; (a) Modelo barra-ramo com medidas; (b) RNP, AR e RBS.

A partir dos estados dos dispositivos seccionadores indicado na Figura 6.7, obtém-se o sistema de 6 barras do IEEE no modelo barra-ramo e a correspondente configuração de medidores, indicado na Figura 6.8(a); e as correspondentes estruturas RNP, AR e RBS estão na Figura 6.8(b).

Para testar o configurador de redes proposto, no sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, consideram-se três seqüências de mudanças na topologia da rede, partindo dos estados dos dispositivos seccionadores do sistema da Figura 6.7, do modelo barra-linha da Figura 6.8(a) e das estruturas apresentadas na Figura 6.8(b).

1° Seqüência: São abertos os dispositivos seccionadores 26 e 27 do sistema da Figura 6.7. A consequência desta mudança é a perda da ligação entre as barras 401 e 501 da rede. Assim, perde-se tal ligação no modelo barra-ramo atualizado (Figura 6.9(a)), bem como as medidas atribuídas a barra 501, inclusive a medida de fluxo de potência da barra 401 para barra 501. As estruturas RNP, AR e RBS atualizadas são apresentadas na Figura 6.9(b).

Figura 6.9: Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após abertura dos dispositivos seccionadores 26 e 27 (1° Seqüência); (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.

2° Seqüência: Partindo dos dados da 1° seqüência (Figura 6.9(a) e 6.9(b)), abrem-se os dispositivos seccionadores 5, 10, 13 e 16. Tendo em vista essas alterações, perdem-se as linhas de transmissão LT1 e LT3, dividindo o sistema em duas ilhas elétricas. As medidas de fluxo de potência incidentes às linhas de transmissão LT1 e LT3 são também perdidas (Figura 6.10(a)). Na Figura 6.10(b) apresentam-se as estruturas RNP, AR e RBS atualizadas.

Figura 6.10: Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após o processamento das mudanças descritas na 1° e 2° seqüências; (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.

3° Seqüência: Neste caso, a partir dos dados da 2° seqüência (Figura 6.10(a) e 6.10(b)), consideram-se as seguintes mudanças: fecham-se os dispositivos seccionadores 13, 16, 26, 27 e 36; e abre-se o seccionador 35 (esses seccionadores são apresentados na Figura 6.7). As conseqüências destas mudanças são:

- O sistema volta a formar apenas uma ilha energizada, pois, através da linha de transmissão LT3 volta a existir uma conexão entre as barras 201 e 301. As medidas de fluxo incidentes à linha de transmissão LT3 estão presentes novamente no sistema (Figura 6.11(a));

- A barra 501 é conectada novamente na parte energizada do sistema. Conseqüentemente, os medidores incidentes a essa barra voltam a fazer parte do sistema de medição disponível (Figura 6.11(a));
- A barra 601 sai de operação; já a barra 602 entra em operação. Desta forma, perdem-se os medidores que relacionam a subestação 5 (Figura 6.11(a)).
- As estruturas RNP, AR e RBS atualizadas estão indicadas na Figura 6.11(b).

Figura 6.11: Sistema de 6 barras do IEEE apresentado na Figura 6.7, após o processamento das mudanças descritas na 1ª, 2ª e 3ª seqüências; (a) Modelo barra-ramo; (b) RNP, AR e RBS.

Na Figura 6.12 tem-se o sistema de 14 barras do IEEE, em nível de seção de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores.

Figura 6.12: Sistema de 14 barras do IEEE em nível de seção de barramento e dispositivos seccionadores, incluindo arranjos de medidores.

A partir dos estados dos dispositivos seccionadores indicado na Figura 6.12, obtém-se o sistema de 14 barras do IEEE no modelo barra-ramo e a correspondente configuração de medidores, indicado na Figura 6.13.

Figura 6.13: Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12

Para testar o configurador de redes proposto, no sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, consideram-se três seqüências de mudanças na topologia da rede, partindo dos estados dos dispositivos seccionadores apresentados na Figura 6.12. A primeira seqüência acarreta a divisão do sistema em duas ilhas elétricas; e, partindo novamente dos estados dos dispositivos seccionadores apresentados na Figura 6.12, realizam-se outras duas seqüências consecutivas de mudanças da topologia.

1º Seqüência: São abertos os dispositivos seccionadores 7, 12, 30, 36, 41, 55 e 82 do sistema da Figura 6.12. A consequência desta mudança é a perda das ligações entre as barras (101 e 201), (201 e 501), (401 e 501), (901 e 1001) e (901 e 1401). Desta forma, o sistema é dividido em duas ilhas elétricas, como mostra o sistema no modelo barra-ramo da Figura 6.14. Analisando a relação entre medidores

e componentes presentes na ilha elétrica, obtém-se a configuração de medidores apresentada na Figura 6.14.

2° Seqüência: Neste caso são abertos, partindo do sistema original indicado na Figura 6.12, os dispositivos seccionadores, 28, 29, 32 e 33, perdendo, assim, as ligações entre as barras: (401 e 901), (401 e 701), e (701 e 901). No modelo barra-ramo resultante, as barras 701 e 801, e os transformadores TR4 e TR5, não aparecem mais no sistema (Figura 6.15), consequentemente os medidos incidentes as barras 701 e 801 são perdidos também.

3° Seqüência: Partindo dos resultados obtidos após o processamento relativo à 2° Seqüência (Figura 6.15), consideram-se as seguintes mudanças: são abertos os dispositivos seccionadores 11, 14, 18, 22, 25 e 26 e fechado o dispositivo 13, apresentados na Figura 6.12. Por consequência destas alterações tem-se que: a barra 201 sai de operação; a barra 203 entra em operação; a subestação 3 é separada do sistema (Figura 6.16), pois pede-se as linhas de transmissão (LT4, LT5 e LT6). Os medidores relacionados a barra 201, e as linhas de transmissão (LT4, LT5 e LT6) e a subestação 3, são perdidos.

Figura 6.14: Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após abertura dos dispositivos seccionadores 7, 12, 30, 36, 41, 55 e 82 (1°seqüência).

Figura 6.15: Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após a abertura dos dispositivos seccionadores 28, 29, 32 e 33. Partindo do estado dos dispositivos seccionadores apresentados no sistema da Figura 6.12.

Figura 6.16: Modelo barra-ramo do sistema de 14 barras do IEEE apresentado na Figura 6.12, após o processamento das mudanças descritas na 1ª e 2ª seqüências.

6.3 Análise dos resultados

Analisando os resultados obtidos nos testes, pode comprovar-se a eficiência do configurador proposto, tendo em vista a resposta coerente a que todos chegaram.

Testes seqüenciais foram analisados, demonstrando que o configurador proposto possibilita a atualização da topologia da rede após a mudança de estados de dispositivos seccionadores, sem a necessidade de reiniciar todo o processo de configuração de rede.

Deve-se destacar que, mesmo nos testes em que as mudanças dos estados de dispositivos seccionadores acarretaram mudanças drásticas na topologia da rede, como é o caso de divisão do SEP em ilhas elétricas ou a união de ilhas elétricas, o configurador proposto foi bem sucedido.

Capítulo 7

Conclusões e Perspectivas Futuras

A motivação principal para o desenvolvimento deste trabalho foi verificar a possibilidade da obtenção de um configurador de redes robusto e eficiente, para efeito de estimação de estado, que possui algumas vantagens em relação aos configuradores existentes na literatura.

Inicialmente foram estudadas todas as etapas do processo de estimação de estado, com ênfase maior na primeira etapa, que consiste na obtenção da topologia da rede e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra-ramo,

Em razão de os configuradores exigirem algoritmos de busca em grafo, o desempenho dos configuradores é fortemente afetado pela forma com que as árvores do grafo são computacionalmente representadas.

Estudos demonstram que a estrutura para armazenamento e manipulação computacional de grafos, denominada Representação Nó-Profundidade (RNP) proposta por Delbem et al., (2004), vem apresentando melhor desempenho computacional em relação às outras estruturas disponíveis na literatura.

Face ao exposto, propomos este trabalho, cujo objetivo foi desenvolver um configurador de redes “tracking”, utilizando a estrutura RNP para representar a topologia de um SEP.

O configurador proposto foi desenvolvido e apresentado no capítulo 5, e possuiu as seguintes características:

- Permite a realização das etapas configuração de subestação e de rede ao mesmo tempo, diminuindo assim o tempo de processamento necessário para a obtenção do modelo barra-ramo. Para isso, o configurador proposto representa cada SBB do SEP como nó de um grafo e faz uso das estruturas RNP, AR e RBS;

- No banco de dados de entrada, cada medida está associada a um ramo, isto é, a uma linha de transmissão; ou transformador ou uma ligação entre SBB e componente shunt. Desta forma, o configurador de redes possibilita a associação dos medidores aos componentes do SEP, no modelo barra-ramo, de forma direta. Basta verificar as medidas existentes nos ramos que serão apresentados no modelo barra-ramo final;
- Possibilita uma rápida atualização da topologia da rede após mudanças de estados de dispositivos seccionadores, sem a necessidade de reiniciar todo o processo de configuração de redes. Para isso, o configurador proposto faz uso dos operadores apresentados no capítulo 5;
- Implementado em linguagem C++ (compilador C++ Builder 6);
- A análise de complexidade do algoritmo de Atualização da topologia, no modelo barra-ramo, apresentado no Capítulo 5, é da ordem de $O(t_A + t_{AR})$.

Deve-se destacar que para atualizar a topologia de um SEP, os configuradores “Tracking” tradicionais fazem uso de algoritmos de busca em grafo, que possuem complexidade da ordem $O(n_N + n_A)$, onde n_N é o número de nós e n_A é o número de arestas do grafo. Assim, como mencionado no capítulo 5, pode-se dizer que o configurador proposto atualiza o sistema de forma mais rápida do que os configuradores tradicionais, pois, em geral, $O(t_A + t_{AR}) < O(n_N + n_A)$.

Os testes realizados, apresentados no capítulo 6, comprovam a eficiência e a robustez do configurador proposto, tendo em vista os resultados coerentes a que todos chegaram. Deve-se destacar que, mesmo nos testes em que as mudanças dos estados de dispositivos seccionadores acarretaram mudanças drásticas na topologia da rede, como é o caso de divisão do SEP em ilhas elétricas, ou, a união de ilhas elétricas, o configurador proposto foi bem sucedido.

7.1 Perspectivas Futuras

Pretende-se, agora, integrar o Configurador de Redes proposto, como um módulo adicional, ao programa computacional desenvolvido no LACO (Laboratório de Análise Computacional, em Sistemas Elétricos de Potência, da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo).

Atualmente este programa permite a análise das seguintes etapas do processo de estimação de estado: análise de observabilidade; estimação de estado; e processamento de erros grosseiros em medidas analógicas.

Após a integração do Configurador de Redes proposto, ao programa supracitado, obteremos uma ferramenta que possibilitará a análise de todas as etapas do processo de estimação de estado, de uma forma integrada, permitindo analisar todos os tipos de erros, a que está sujeito o estimador, de forma individual ou simultânea.

Observação 7.1: Importa destacar que este projeto de pesquisa já deu origem a um artigo publicado no Power Tech 2007:

Piereti, S.A.R; Delbem, A.C.B.; London Junior, J. B. A.; Bretas, N. G. *Tracking Network Topology Processor Using Node-depth Representation*. In: IEEE Power Tech conference, 2007, Lausanne / Suíça. (Paper 404 – 6 páginas).

Referências Bibliográficas

ABUR, A.; MAGNAGO, H. Optimal meter placement for maintaining observability during single branch outages, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 14, n. 4, p. 1273, 1999.

AHUJA, R. K.; MAGNATI, T. L.; ORLIN, J. B. Network flows: Theory, algorithms, and applications, *Printce Hall, Englewood Cliffs*, 1993.

ALLEMONG, J. J.; IRISARRI, G. D.; SASSON, A. M. An examination of solvability for state estimation algorithms, *IEEE PES Winter Meeting. Paper*, n. A80 008-3, fevereiro 1980.

ALSAÇ, O.; VEMPATI N.; STOTT, B.; MONTICELLI, A. Generalized state estimation, *IEEE Transaction on Power Systems*, v.13, n. 3, 1069 p, agosto 1998.

ANTÔNIO, A.B.; TORREÃO, J.R.A.; COUTTO FILHO, M. B. D. Meter placement for power systems state estimation using simulated annealing, *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*. Porto, Portugal, setembro 2001.

ASADA, E. N. Análise de observabilidade e processamento de erros grosseiros conformativos utilizando a metaheurística busca tabu na estimação de estado generalizada, Tese (Doutorado em engenharia elétrica), *Universidade Estadual de Campinas*, Campinas, junho 2004.

BALAKRISHNA, V. K. Graph theory, *McGraw-Hill*, New York, 1997.

BERTRAN, M.; CORBELLA, X. On the validations and analysis of a new method for power network connectivity determination, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. -PAS: 101, n. 2, p. 316, fevereiro 1982.

BRETAS, N.G. Network Observability: A theory based on triangular factorization and path graph concepts - part I, *International conference on Automatic Control*, cidade do Porto, Portugal, setembro 1996.

BONANOMI, P.; GRAMBERG, G. Power system data validation and state calculation by network search techniques, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. -PAS: 102, n. 1, p. 238, janeiro 1983.

BOSE, A.; CLEMENTES, A. Real-time modeling of power networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.75, n. 12, p. 1607, dezembro 1987.

CASTILLO, E.; CONEJO, A. J.; PRUNEDA, R. E.; SOLARES, C. State estimation observability based on the null space of the measurement Jacobian matrix, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 20, n. 3, p. 1656, agosto 2005.

CASTILLO, E.; CONEJO, A. J.; PRUNEDA, R. E.; SOLARES, C. Observability analysis in state estimation: A unified numerical approach, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 21, n. 2, p. 877, maio 2006.

CHEN, R.L. A fast integer algorithm for observability analysis using network topology, *IEEE Transactions on Power Systems*, v.5, n. 3, p. 1001, agosto 1990.

CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Detection and identification of topology errors in electric power systems, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 3, n. 4, p. 1748, novembro 1988.

CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ, G. R.; DAVIS, P. W. Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v.-PAS 100, n. 4, p. 1779, abril 1981.

CLEMENTS, K. A.; SIMÕES COSTA, A. Topology error identification using normalized Lagrange Multipliers, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 13, n. 2, p. 347, maio 1998.

CLEMENTS, K. A.; WOLLENBERG, B. F. An algorithm for observability determination in power system state estimation, *IEEE PES Summer Meeting*, San Francisco, 1975.

CONTAXIS, G.C.; KORRES, G.N. A reduced model for power system observability analysis and restoration, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 3, n. 4, p. 1411, novembro 1988.

CORMEN, T.H., LEISERSON, C.E., RIVEST, R.L., STEIN, C. Introduction to Algorithms. *MIT Press/McGraw Hill*, Cambridge, MA, 1990.

COUTTO FILHO, M.B.D.; LEITE da SILVA, A.M.; CANTERA, J.M.C.; SILVA, R.A. Information debugging for real-time power systems monitoring, *IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution*, v. 136, p.145 p, maio 1989.

COUTTO FILHO, M.B.D.; LEITE da SILVA, A.M.; FALCÃO, D.M. Bibliography on power system state estimation (1968-1989), *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 5, n. 3, p. 950, agosto 1990.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F. A forest representation for evolutionary algorithms applied to network design, *In Proceedings of the 2003 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2723:634-635, Springer-Verlag, 2003.

DELBEM, A. C. B.; CARVALHO, A. C. P. L. F.; POLICASTRO, C.; Pinto, A. K. O.; GARCIA, A.; HONDA, K. Node-depth encoding for evolutionary algorithms applied to network design, *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2004.

DIESTEL, R. Graph Theory, *Springer-Verlag*, Heidelberg, 2005.

DYLIACCO, T.E.; RAMARO, K.A.; WEINER, A.W. Network status analysis for real-time systems, *8th PICA Conference Proceedings*, p. 356, julho 1973.

FALCÃO, D.M.; ARIAS, M. State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models, *IEEE Transactions On Power Systems*, v. 9, n. 2, p. 979, maio 1994.

FETZER, E. E.; ANDERSON, P. M. Observability in the state estimation of power systems, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-94, p. 1981, novembro / dezembro 1975.

GODERYA, F., METWALLY, A.A. & MANSOUR, O. Fast detection and identification of islands in power networks, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, n. 1, p. 217, Janeiro/fevereiro 1980.

GOODAIRE, E. G.; PARMENTER, M. M. Discrete mathematics with graph theory, *McGraw-Hill, Prentice Hall*, 1997.

GOU, B. Observability analysis by measurement jacobian matrix for state estimation, *in Proceedings ISCAS Conference*. p. 3881, 2005.

GOU, B. Jacobian matrix-based observability analysis for state estimation, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 21, n. 1, p. 348, fevereiro 2006.

GOU, B.; ABUR A. A direct numerical method for observability analysis, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 15, n. 2, p. 625, maio 2000.

GOU, B.; ABUR A. An improved measurement placement algorithm for network observability, *IEEE Transactions Power Systems*, v. 16, n. 4, p. 819, novembro 2001.

HABIBALLAH, I.O.; IRVING, M.R. Observability analysis for state estimation using linear programming, *IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution*, v. 148, n. 2, p. 142, março 2001.

HAIBO, Z.; BOMING, Z.; HONGBIN, S.; WU, W. Observability analysis in power system state estimation based on the solvable condition of power flow, *Proceedings of IEEE*, p. 234, 2002

HANDSCHIN, E.; SCHWEPPE, F.C.; KOHLAS, J.; FIECHTER, A. Bad data analysis for power systems state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-94, n. 2, p. 329, março/abril 1975.

IRVING, M.; OWEN, R.; STERLING, M. Power sytem state estimation using linear programming, *Proceedings of IEE*, v. 125, n. 1, p. 879, 2001.

JAIN, A.; CHOI, J.; MIN, J. Power system network observability determination using feed-forward neural networks, *Proceedings of IEEE*, p. 2086, 2002.

JAIN, A.; BALASUBRAMANIAN, R.; TRIPATHY, S. C.; SINGH, B. N. Power system topological observability analysis using artificial neural networks, *Proceedings of IEEE*, 2005.

KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. A reduced model for bad data processing in state estimation, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 6, n. 2, p. 550, maio 1991a.

KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 6, n. 3, p. 999, agosto 1991b.

KORRES, G.N.; CONTAXIS, G.C. A tool for the evaluation and selection of state estimator measurement schemes, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 9, n. 2, p. 1110, maio 1994.

KRUMPHOLZ, G.R.; CLEMENTS, K.A.; DAVIS, P.W. Power system observability: a practical algorithm using network topology. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, n. 4, p. 1534, julho/agosto 1980.

KUMAR, D. M. V.; Srivastava, S. C.; Shah, S.; Mathur, S. Topology processing and static state estimation using artificial neural networks. *IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution*, v. 143, n. 1, p. 99, Janeiro 1996.

LEÃO, J. A. Erros topológicos na estimação de estados em sistemas de potência: Abordagem geométrica, detectabilidade e identificação. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica), *Universidade Federal de Santa Catarina*, Florianópolis, julho 1990.

LEITE da SILVA, A.M.; COUTTO FILHO, M.B.D.; CANTERA, J.M.C. An efficient dynamic state estimation algorithm including bad data processing, *IEEE Transaction on Power Systems*, v.2, n. 4, p. 1050, novembro 1987.

LONDON JUNIOR, J.B.A.; ALBERTO, L.F.C.; BRETAS, N.G. Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes, *IET Generation, Transmission & Distribution (formerly IEE Proceedings Generation, Transmission & Distribution)*, v.1, p. 39 p, Janeiro 2007.

LONDON JUNIOR, J.B.A.; BRITO, G.L.R.; BRETAS, N.G. Method for meter and RTU placement for state estimation purposes. Proceedings of 2003, *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Bologna, Italy, junho 2003.

LONDON Jr. et al., A topological approach to the identification of critical measurements in power system state estimation, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, – part I, v. 1, no. 1, p.139, 2005.

LOURENÇO, E. M.; SIMÕES COSTA, A.; CLEMENTS, K. A.; CERNEV, R. A. A Topology error identification method directly based on collinearity tests, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 4, p. 1920, novembro 2006.

LU, C.N.; TENG, J.H.; CHANG, B.S. Power system network topology error detection, *IEE Proceedings. Generation, Transmission & Distribution*, v. 141, n. 6, p. 623, novembro 1994.

LUGTU, R.L. et al. Power system state estimation: detection of topological errors, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-99, n. 6, p. 2406, novembro/dezembro 1980.

MILI, L.; CHENIAE, M.; VICHARE, N.; ROUSSEEUW, P. Robust state estimation based on projection statistics, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 11, n. 2, p. 1118, 1996.

MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEEUW, P. Least median of squares estimation in power systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 2, p. 523, 1991.

MILI, L.; VAN CUTSEM, Th.; RIBBENS-PAVELLA, M. Hypothesis testing identification: A new method for bad data analysis in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vl. PAS-103, n. 11, p. 3239, novembro 1984.

MILI, L.; VAN CUTSEM, Th.; RIBBENS-PAVELLA, M. Bad data identification methods in power system state estimation- A comparative study, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-104, n. 11, p. 3037, novembro 1985.

MONTICELLI, A. Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 8, n. 3, p. 1, agosto 1993.

MONTICELLI, A. State Estimation in electric power systems: A generalized approach, *Kluwer Academic Publishers*, Massachusetts, USA, 1999.

MONTICELLI, A. Electric power system state estimation, *Proceedings of the IEEE*, v. 88, n. 2, fevereiro 2000.

MONTICELLI, A.; GARCIA, A.V. Modeling zero impedance branches in power system state estimation, *IEEE Transaction on Power Systems*, v. 6, n. 4, p. 1561, novembro 1991.

MONTICELLI, A.; WU, F.F. Network observability: Identification of observable islands and measurement placement, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-104, n. 5, p.1035, maio 1985a.

MONTICELLI, A.; WU, F.F. Network observability: Theory,. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-104, n. 5, p. 1042, maio 1985b.

PANDIT, S.; SOMAN, S.A.; KHAPARDE, S. A. Object-oriented network topology processor, *IEEE Computer Applications in Power*, p. 42, abril 2001.

PRAIS, M.; BOSE, A. A Topology processor that tracks network modifications over time, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 3, n. 3, p. 992, agosto 1988.

QUINTANA, V.H.; SIMÕES-COSTA, A.; MANDEL, A. Power system topological observability using a direct graph-theoretic approach, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-101, n. 3, p. 617, , março 1982a

RESOLUÇÃO (RS-SE-306/78), Relatório SCO.GTAN-01/77 - Arranjo de barras, janeiro de 1978.

SASSON, A. M.; EHNNANN, S. T.; LYNCH, P.; VAN SLYCK, L. S. Automatic power system network topology determination, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-92, n. 1, p. 610, março / abril 1973.

SCHWEPPE, F.C. Power system static-state estimation, part III: Implementation, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-89, n. 1, p. 130, janeiro 1970.

SCHWEPPE, F.C.; DOUGLAS, B.R. Power system static-state estimation, part II: Approximate model, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-89, n. 1, p. 125, janeiro 1970.

SCHWEPPE, F.C.; WILDES, J. Power system static-state estimation, part I: Exact model, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-89, n. 1, p. 120, janeiro 1970.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. and ROM, D. Power system static state estimation, *Power Systems. Engineering Group*, M.I.T. Rep. 10, novembro 1968.

SIMÕES COSTA, A.; LEÃO, J. A. Identification of topology errors in power system state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 8, n. 4, p. 1531, novembro 1993.

SIMÕES COSTA, A.; LOURENÇO, E. M.; CLEMENTS K. A. Power system topological observability analysis including switching branches, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 17, n. 2, p. 250, maio 2002.

SIMÕES COSTA, A.; VIEIRA, F. Topology error identification through orthogonal estimation methods and hypothesis testing, *Proceedings of 2001 IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, setembro 2001.

SINGH, N.; GLAVITSCH, H. Detection and identification of topological errors in online power system analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 1, p. 324, fevereiro 1991.

SLUTSKER, I.W.; SCUDDER, J.M. Network observability analysis through measurement Jacobian matrix reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 2, n. 2, p. 331, maio 1987.

SOUZA, J.C.M.; LEITE da SILVA, A.M.; ALVES da SILVA, A.P. Data debugging for real-time power system monitoring based on pattern analysis, *IEEE Transaction on Power Systems*, v.11, n. 3, p.1592, agosto 1996.

SOUZA, J.C.S.; LEITE DA SILVA, A.M.; ALVES DA SILVA, A.P. Online topology determination and bad data suppression in power system operation using artificial neural networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 13, n. 3, p. 796, agosto 1998.

VEMPATTI, N.; SILVA, C.; ALSAÇ, O; STOTT, B. Topology estimation, *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting*, São Francisco, California, EUA, junho 2005.

VUONG, M. H.; LEFEBVRE, S.; DO, X. D. Detection and identification of topological errors from real-time measurements reconciliation, *Proceedings IEEE Power Engineering Society 2002 Summer Meeting*, p. 228, 2002.

VUONG, M. H.; LEFEBVRE, S.; DO, X. D. A review of methods for topology errors detection, *Proceedings of IEEE*, p. 144, 2003.

WILSON, R. J. Introduction to graph theory, *Oliver & Boyd*, 1972.

WU, F. Power system state estimation a survey, *Electrical Power and Energy Systems*, vl. 12, n. 2, p. 80, 1990.

WU, F.F.; LIU W.H.E. Detection of topology errors by state estimation, *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 4, n. 1, p. 176, fevereiro 1989.

YEHSAKUL, D. P.; DABBAGHCHI, I. A topology-based algorithm for tracking network connectivity, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 10, n. 1, p. 339, fevereiro 1995.

YONGLI, Z.; SIDHU, T.S.; YANG, M.Y.; HUO, L.M. An AI-based automatic power network topology processor, *Electric Power Systems*, p. 57, 2002.

ZHONG, S.; ABUR, A. Implementation of a modified state estimator for topology error identification, *Proceedings of IEEE*, p. 765, 2003.

Anexo A

Banco de dados de entrada do configurador de rede proposto.

Na Figura A.2 apresenta-se o banco de dados de entrada, do configurador de redes proposto, relativo ao SEP ilustrado na Figura A.1.

Figura A.1: Sistema Genérico para análise do bando de dados de entrada

Figura A.2: Banco de dados de entrada do configurador de redes proposto, para o SEP apresentado na Figura A.1.

A Tabela A.1 indica o significado de cada índice do banco de dados de entrada apresentado na Figura A.2.

Tabela A.1 – Índice e Significado do bando de dados da Figura A.2.

Índice	Significado
D_Linha	Dados de Linha
De	SBB de “origem” do SEP
Pa	SBB de “destino” do SEP
Disjuntores	Disjuntores entre as SBBs (De) e (Pa)
Compo	Componente ligado entre as SBBs (De) e (Pa)
Med	Dados das medidas
I	Medidor de Fluxo da SBB (De) para (Pa)
V	Medidor de Fluxo da SBB (Pa) para (De)
Tap	Transformador entre as SBBs (De) e (Para)
R%	Reatância da linha entre as SBBs (De) e (Para)
X%	Susceptância da linha entre as SBBs (De) e (Para)
MVAR	SHUNT de linha entre as SBBs (De) e (Para)
Pi	Fluxo de potência ativa da SBB (De) para (Pa)
VarP	Desvio padrão da medida (Pi)
Qi	Fluxo de potência reativa da SBB (De) para (Pa)
VarQ	Desvio padrão da medida (Qi)
Pv	Fluxo de potência ativa da SBB (Pa) para (De)
VarP	Desvio padrão da medida (Pv)
Qv	Fluxo de potência reativa da SBB (Pa) para (De)
VarQ	Desvio padrão da medida (Qv)
D_barras	Dados de Barra
n°	Número da SBB do SEP
T	Tipo de SBB para trabalhar com o configurador de redes proposto
TB	Tipo de SBB real dos SEP
Sb	Subestação que correspondente de cada SBB do SEP
nome	Nome da SBB
Sh	SHUNT de SBB
A	Área
P	Medida de injeção ativa na SBB
DesP	Desvio padrão da medida (P)
Q	Medida de injeção reativa na SBB
DesQ	Desvio padrão da medida (Q)
V	Tensão na SBB
DesV	Desvio padrão da medida (V)
D_disjuntores	Dados dos disjuntores
Di	Número do disjuntor
S	Estado do disjuntor

Anexo B:

Modelo pretendido para o banco de dados de saída do configurador proposto.

Na Figura B.2 apresenta-se o modelo pretendido para o banco de dados de saída, do configurador de redes proposto, relativo ao SEP ilustrado na Figura B.1.

Figura B.1: Sistema de 6 Barras do IEEE

A Tabela B.1 indica o significado de cada índice do banco de dados de entrada apresentado na Figura B.2.

Figura B.2: Banco de dados de saída do configurador de redes proposto, para o SEP apresentado na Figura B.1.

Tabela B.1 – Índice e Significado do bando de dados da Figura B.2.

Índice	Significado
Dados esp.	Dados específicos para estimação de estados
NB	Número de barra do SEP
NL	Número de linhas do SEP
NIP	Número de medidas de injeção de potência ativa
NIQ	Número de medidas de injeção de potência reativa
NFP	Número de medidas de fluxo de potência ativa
NFQ	Número de medidas de fluxo de potência reativa
NMV	Número de medidas de tensão
D_bar	Dados de Barra
No	Número da barra do SEP
T	Tipo de barra real dos SEP
nome	Nome da barra
Sh	SHUNT de barra
A	Área
TP	Indica presença de medida de injeção de potência ativa
P	Medida de injeção ativa na barra
VarP	Desvio padrão da medida (P)
TQ	Indica presença de medida de injeção de potência reativa
Q	Medida de injeção reativa na barra
VarQ	Desvio padrão da medida (Q)
TV	Indica presença de medida de tensão
V	Medida de Tensão na barra
VarV	Desvio padrão da medida (V)
D_Lin	Dados de Linha
De	Barra de “origem” do SEP
Pa	Barra de “destino” do SEP
R%	Reatância da linha entre as barras (De) e (Para)
X%	Susceptância da linha entre as barras (De) e (Para)
MVAR	SHUNT de linha entre as barras (De) e (Para)
K-m	Medida da barra (De) para (Pa)
m-k	Medida da barra (Pa) para (De)
TP	Indica presença de medida fluxo de potência ativa
P	Fluxo de potência ativa
VarP	Desvio padrão da medida (P)
TQ	Indica presença de medida fluxo de potência reativa
Q	Fluxo de potência reativa
VarQ	Desvio padrão da medida (Q)