

Universidade Federal Fluminense

JOHNNY EDWARD VILLAVICENCIO TAFUR

**INDICADORES DE OBSERVABILIDADE PARA
ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Niterói

2012

JOHNNY EDWARD VILLAVICENCIO TAFUR

**INDICADORES DE OBSERVABILIDADE PARA
ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do Grau de Doutor em Computação. Área de concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Orientadores:

**Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D.Sc.
Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D.Sc.**

Niterói

2012

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

T124 Tafur, Johnny Edward Villavicencio.
Indicadores de observabilidade para estimação de estado em sistemas de potência / Johnny Edward Villavicencio Tafur. – Niterói, RJ : [s.n.], 2012.
110 f.

Tese (Doutorado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, 2012.

Orientadores: Milton Brown do Coutto Filho, Julio Cesar Stacchini de Souza.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Estimação de estado (energia elétrica). 3. Indicador de observabilidade. I. Título.

CDD 621.3191

**INDICADORES DE OBSERVABILIDADE
PARA ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA**

JOHNNY EDWARD VILLAVICENCIO TAFUR

Tese de Doutorado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Computação. Área de Concentração: Computação Científica e Sistemas de Potência.

Aprovada em 23 de Agosto de 2012.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc. – Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza, D. Sc. – Orientador
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Julius Cesar Barreto Leite, Ph.D.
UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Djalma Mosqueira Falção, Ph.D.
UFRJ/COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Jose Luiz Rezende Pereira, Ph.D.
UFJF – Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho a Deus que iluminou e abençoou todos os passos deste trabalho estando sempre presente em cada momento.

Aos meus pais Jorge e Lucila e a minha querida irmã Erika que sempre me deram carinho, apoio e ânimo em todos os momentos da minha vida.

E a Renata Maria pelo carinho e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sua constante presença em minha vida, guiando-me sempre em todos os momentos da minha vida.

Aos meus orientadores, Prof. Milton Brown Do Coutto Filho e Prof. Julio César Stacchini de Souza, pelo acompanhamento e orientação técnica.

Aos meus familiares e amigos, pelo incentivo em todas as minhas conquistas.

À CAPES PEC-PG pelo apoio financeiro para a realização do meu doutorado.

A todos aqueles que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

A Estimação de Estado tem sido considerada uma importante função em centros de operação de sistemas de potência, por ocupar-se com o fornecimento de dados em tempo real necessários à operação segura de redes elétricas. Tais dados referem-se a grandezas físicas e binárias que caracterizam o estado operativo da rede, em regime conhecido como quase permanente. Tipicamente, as físicas são: tensões nodais em magnitude/ângulo e outras que delas decorrem, como fluxos e injeções de potência ativa/reativa; correntes também se encontram entre as referidas grandezas. As binárias correspondem à condição atual de dispositivos seccionadores da rede (aberto ou fechado).

Dentre os diversos aspectos que envolvem a função Estimação de Estado, aborda-se nesta Tese o problema de se quantizar a observabilidade de redes elétricas de potência. No sentido clássico, entende-se por observabilidade a aptidão para estimar o estado do sistema em sua inteireza, a partir de dados (medidas) dele obtidos. Assim sendo, lidando-se com redes observáveis, são propostos indicadores numéricos capazes de estabelecer graus de aptidão de sistemas de medição destinados a observar tais redes ou, sendo definidos de outra forma, aptos a avaliar riscos de inobservabilidade. Esses indicadores tomam por base a análise de criticalidade de medidas para uma dada configuração de rede, sendo definidos em termos da probabilidade de inobservabilidade frente à indisponibilidade de: uma medida; duas medidas; k medidas; uma unidade de medição; um ramo; dois ramos. Complementarmente, considera-se a probabilidade de aumento do risco de inobservabilidade referente à perda de uma medida. Outros indicadores propostos são: concentração de medidas em conjuntos críticos (contribui para o aumento da probabilidade de inobservabilidade na ocorrência da perda de duas medidas); redundância global normalizada (de mais fácil interpretação do que a definição de redundância usualmente conhecida).

Por meio de uma série de casos correspondentes a condições distintas de observabilidade, simuladas no sistema IEEE 14 barras, os indicadores propostos são calculados, de modo a se demonstrar sua conformidade aos propósitos para os quais são definidos. A análise das criticalidades estudadas e o cálculo de indicadores alcança-se através de um programa computacional, denominado **ObservApp** (*Observability Analysis Application*), desenvolvido no curso desta Tese. O aplicativo tem como principal característica a facilidade de uso, notadamente considerando-se sua interface gráfica de usuário.

ABSTRACT

State Estimation has been considered an important function in power system control centers, by occupying itself with the provision of real-time data required for the secure operation of electric power grids. These data refer to physical and binary quantities which characterize the network operating state, under a regime known as *quasi* stationary. Typically, the physical quantities are: nodal voltages (magnitudes and phase angles) and others deriving from them, such as active/ reactive power flows and injections; currents also are among these quantities. The binary ones correspond to the current condition of circuit breakers and switching devices (open/closed).

Among several aspects concerning the State Estimation function, this Thesis concentrates on the problem of quantifying power network observability. In the classical sense, observability is the aptitude for estimating the system state in its entirety from the data currently available. Thus, dealing with observable grids, numerical indicators capable of establishing degrees of metering systems' aptitude (also defined as unobservability risks) are proposed. These indicators are based on measurement criticality analyses for a given network configuration, being defined in terms of the probability of unobservability, assuming that an event has occurred, such as the unavailability of: *a single* measurement; *one pair* of measurements; *one k-tuple* of measurements; *a single* metering unit; *a single* network branch; *one pair* of network branches. Complementarily, the probability of raising the risk of unobservability, given that the loss of a single measurement has occurred, is considered. Other proposed indicators are: concentration of measurements in critical sets (it contributes to increase the probability of unobservability, occurring the loss of a pair of measurements); normalized global redundancy (of easier interpretation than the redundancy definition usually known).

By means of a series of test cases, corresponding to diverse observability conditions, simulated in the IEEE 14-bus system, the proposed indicators are calculated, so as to demonstrate their conformity to the objectives for which they are defined. The studied criticality analysis and the calculation of the proposed indicators are achieved through an application program, named ObservApp (Observability Analysis Application), developed in the course of this Thesis. The application has as main feature the ease of use, notably considering its graphical user interface.

SUMÁRIO	Pág.
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1. Considerações Preliminares	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Estrutura da Tese	5
1.4. Publicações	5
Capítulo 2 - Estimação de Estado	6
2.1 Introdução	6
2.2. Etapas	7
2.3. Fundamentos	9
Capítulo 3 - Análise de Observabilidade	11
3.1. Introdução	11
3.2. Revisão Bibliográfica	11
3.3. Observabilidade Numérica	15
3.4. Criticalidades	17
3.5. Medidas e Conjuntos Críticos	18
3.5.1. Identificação	19
3.5.2. Atualização	22
3.6. k -Tuplas Críticas	25
3.7. Unidades de Medição Críticas	26
3.8. Ramos Críticos	28
3.9 Comentários Finais	29
Capítulo 4 - Indicadores de Observabilidade	31
4.1. Introdução	31
4.2. Perda Iminente de Observabilidade	32
4.3. Graus de Observabilidade	33
4.4. Redundância Global	37
4.5 Comentários	39
4.6 Resumo	39
Capítulo 5 - Testes e Resultados	
5.1. Introdução	41
5.2. Sistema IEEE-14 barras	41

Caso 1: Cconj hiperconcentrado	41
Caso 2: Vários Cconjs	46
Caso 3: Comparação entre dois sistemas de medição de mesma redundância global	51
Caso 4: Avaliação de um sistema medição otimizado	60
Caso 5: Robustez ($m-k$)	67
Caso 6: Indisponibilidade de ramos da rede	68
Caso 7: Disponibilidade de unidades de medição fasorial (UMFs)	75
5.3. Conclusão	78
Capítulo 6 – Conclusões	79
Apêndice A - Medidas e Conjuntos Críticos	83
A.1 Medidas Críticas (Cmeds)	83
A.2 Conjuntos Críticos (Cconjs)	84
Apêndice B – ObservApp	86
B.1. Descrição Geral	86
B.2. Estrutura do Aplicativo	86
B.3. Diagrama de Classes	87
B.4. Funcionalidades	88
B.4.1. Opções Iniciais	88
B.4.2. Criação de Casos Novos	89
B.4.3. Sistema de Medição	92
B.4.4 Alteração de Configuração da Rede	93
B.4.5 Exibição de Resultados	94
B.4.6 Menu de Opções	95
Apêndice C - Sistemas IEEE	96
C.1. 24 Barras	96
C.2. 30 Barras	97
C.3. 57 Barras	98
C.4. 118 Barras	99
Referências Bibliográficas	101

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 2.1:	Etapas básicas do processo de estimação de estado	9
Figura 3.1:	Fluxograma simplificado do algoritmo para identificação de Cmeds e Cconjs	20
Figura 3.2:	Exemplo ilustrativo da atualização de conjuntos críticos	24
Figura 3.3:	Fluxograma simplificado para identificação de criticalidades: reprocessamento	25
Figura 5.1:	Sistema IEEE-14 barras: <i>Caso 1</i>	42
Figura 5.2:	Sistema IEEE-14 barras: <i>Caso 2</i>	47
Figura 5.3:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 2</i>	47
Figura 5.4:	Diagrama de criticalidade de medidas – IEEE-14 barras – <i>Caso 2</i>	50
Figura 5.5:	Diagrama de criticalidade de medidas, representadas por UTRs – IEEE-14 barras – <i>Caso 2</i>	50
Figura 5.6:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 3</i> – <i>Situação (a)</i>	51
Figura 5.7:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 3</i> – <i>Situação (b)</i>	52
Figura 5.8:	Diagrama de criticalidade de medidas – IEEE-14 barras – <i>Caso 3</i> – <i>Situação (a)</i>	57
Figura 5.9:	Diagrama de criticalidade de medidas, representadas por UTRs – IEEE-14 barras – <i>Caso 3</i> – <i>Situação (a)</i>	57
Figura 5.10:	Diagrama de criticalidade de medidas – IEEE-14 barras <i>Caso 3</i> – <i>Situação (b)</i>	58
Figura 5.11:	Diagrama de criticalidade de medidas, representadas por UTRs – IEEE-14 barras – <i>Caso 3</i> – <i>Situação (b)</i>	58
Figura 5.12:	Sistema IEEE-14 barras: <i>Caso 4</i>	60
Figura 5.13:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 4</i>	61
Figura 5.14:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 4 modificado</i>	64
Figura 5.15:	Sistema IEEE-14 barras: <i>Caso 6</i>	69
Figura 5.16:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 6</i>	69
Figura 5.17:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 7a</i>	75
Figura 5.18:	Tela de ObservApp – Sistema IEEE-14 barras - <i>Caso 7b</i>	78
Figura B.1:	Estrutura de Componentes do aplicativo ObservApp	87
Figura B.2:	Diagrama de Classes do aplicativo ObservApp	88
Figura B.3:	Tela inicial	89

Figura B.4:	Janela de opções para criação de novos casos	90
Figura B.5:	Exemplo de adição de ramo entre a barra 1 e 3	91
Figura B.6:	Exemplo de alinhamento de ramos	91
Figura B.7:	Exemplo de seleção de medidores	92
Figura B.8:	Exemplo de alteração de status do ramo 4 – 9	93
Figura B.9:	Exemplo de resultados na forma gráfica	94
Figura B.10:	Indicadores de observabilidade para o sistema de medição analisado ...	95
Figura C.1.	Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 24 barras	96
Figura C.2.	Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 24 barras	97
Figura C.3.	Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 30 barras	97
Figura C.4.	Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 30 barras	98
Figura C.5.	Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 57 barras	98
Figura C.6.	Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 57 barras	99
Figura C.7.	Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 118 barras	99
Figura C.8.	Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 118 barras	100

LISTA DE TABELAS

Pág.

Tabela 4.1:	Indicadores de Observabilidade	40
Tabela 4.2:	Outros Indicadores de Observabilidade	40
Tabela 5.1:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 1</i>	43
Tabela 5.2:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 1</i>	44
Tabela 5.3:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 1</i>	44
Tabela 5.4:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 1 modificado</i>	45
Tabela 5.5:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 1 modificado</i>	45
Tabela 5.6:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 2</i>	48
Tabela 5.7:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 2</i>	49
Tabela 5.8:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 2</i>	49
Tabela 5.9:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 3 – Situação (a)</i>	53
Tabela 5.10:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 3 - Situação (a)</i>	54
Tabela 5.11:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 3 – Situação (a)</i>	54
Tabela 5.12:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 3 – Situação (b)</i>	55
Tabela 5.13:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 3 - Situação (b)</i>	56
Tabela 5.14:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 3 – Situação (b)</i>	56
Tabela 5.15:	Comparação de Indicadores – Sistema IEEE-14 barras – Caso 3 – Situações (a) e (b)	59
Tabela 5.16:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 4</i>	62
Tabela 5.17:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 4</i>	63
Tabela 5.18:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 4</i>	63
Tabela 5.19:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 4 modificado</i>	65
Tabela 5.20:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 4 modificado</i>	66
Tabela 5.21:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 4 modificado</i>	66
Tabela 5.22:	Comparação de Indicadores – Sistema IEEE-14 barras – Caso 2 e Caso 4	67
Tabela 5.23:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 6</i>	70
Tabela 5.24:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 6</i>	71
Tabela 5.25:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 6</i>	71
Tabela 5.26:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 6 modificado</i>	73
Tabela 5.27:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 6 modificado</i>	74
Tabela 5.28:	Outros Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 6 modificado</i>	74
Tabela 5.29:	Avaliação de Criticalidades – <i>Caso 7a</i>	76
Tabela 5.30:	Indicadores de Observabilidade – <i>Caso 7a</i>	77

LISTA DOS PRINCIPAIS SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SGE	Sistema de Gerenciamento de Energia
EE	Estimação de Estado
EG	Erro grosseiro de medida
UMF	Unidade de Medição Fasorial
UTR	Unidade Terminal Remota
C _{med}	Medida crítica
C _{conj}	Conjunto crítico de medidas
MQP	Mínimos Quadrados Ponderados
DEI	Dispositivo Eletrônico Inteligente
C _{ramo}	Ramo Crítico
C _{UTR}	UTR crítica
C _{k-tupla}	k-tupla crítica
ObservApp	<i>Observability Analysis Application</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1. Considerações Preliminares

A base material ou econômica e as condições indispensáveis à vida em sociedade são elementos atinentes ao que se entende por infraestrutura. A solução dos problemas de infraestrutura torna-se necessária para a melhoria do bem-estar de todos, permitindo acesso a serviços essenciais, tais como, os de energia elétrica, comunicações, transportes, água e saneamento. Ao mesmo tempo, a ampliação da infraestrutura promove a redução de custos, aumento de produtividade, aprimoramento da qualidade de bens e serviços de setores produtivos. Portanto, os sistemas que compõem a infraestrutura são considerados estratégicos para a sociedade moderna, devendo ser operados da melhor forma possível. Usualmente, atuam em tais sistemas sofisticados aplicativos computacionais, de natureza distribuída, hierarquizada, tratando dados colhidos remotamente em diversas partes da rede que os integram.

No que diz respeito aos sistemas elétricos de potência, estes produzem e atendem às necessidades de energia de seus usuários (destinadas aos mais diversos propósitos), sendo constituídos por redes interligadas de transmissão e distribuição.

De modo a garantir uma operação segura e confiável das redes elétricas, estas são supervisionadas e controladas por um sistema de controle supervisorio e aquisição de dados conhecido por SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Complementa o sistema SCADA um conjunto de aplicativos computacionais específicos para análise de redes elétricas, comumente chamado de Sistema de Gerenciamento de Energia (SGE). Entre tais aplicativos encontra-se a Estimção de Estado (EE) que processa no ambiente de tempo real, medidas redundantes recebidas via sistema SCADA, com o objetivo precípua de obter da melhor forma possível o estado de operação do sistema de interesse.

Usualmente, formula-se o problema da EE em sistemas de potência, considerando-se as seguintes hipóteses: medidas a serem processadas contêm erros estatisticamente de baixa magnitude; há medidas com redundância adequada, não apenas em termos de quantidade, mas também com relação ao tipo e posicionamento na rede; a configuração da

rede atual e valores de parâmetros dos elementos que a compõem são conhecidos corretamente.

Por vezes, as hipóteses estabelecidas para o problema de EE não são absolutamente verdadeiras, o que deu ensejo, desde sua proposição, a diversos estudos ao longo dos anos [Cout90], notadamente àqueles que lidam com: erros grosseiros de medidas (EGs); análise de observabilidade; erros de configuração da rede; erros de parâmetros.

Reconhecidamente, um dos benefícios essenciais da função EE, está na sua capacidade de detectar, identificar e corrigir medidas portadoras de EGs, de modo que estas não comprometam os resultados do processo de estimação. Para que este benefício seja alcançado, deve-se dispor de medidas redundantes, bem distribuídas pela rede estudada. A avaliação deste requisito diz respeito à análise de observabilidade, sendo desejável que esta se realize da forma mais completa possível. Tal análise deve ocorrer em tempo real, durante a execução do processo de estimação (em seu início), toda vez que houver alterações no conjunto de medidas disponíveis para processamento. Também, realiza-se em modo de estudo, nas tarefas de estabelecimento de um novo plano de medição ou de expansão de um sistema já instalado, verificando-se aspectos que envolvam robustez (capacidade de enfrentar indisponibilidades de medidas/ramos da rede) e otimização de recursos [Magn00], [Souz05].

No sentido clássico, entende-se por observabilidade a aptidão para estimar o estado do sistema em sua inteireza, considerando os dados (medições) correntes disponíveis, levando-se em conta o tipo e a localização de medidas, bem como a configuração atual da rede elétrica. Portanto, como resultado positivo da avaliação de uma rede quanto à observabilidade, diz-se que esta é observável. Do contrário, avalia-se como inobservável e busca-se ainda identificar que porções da rede (ilhas) restaram observáveis.

Análise de criticalidade diz respeito à identificação de limites de observabilidade, considerando-se a disponibilidade de medidas individualmente ou em grupos, para determinada configuração da rede. A criticalidade de uma medida caracteriza-se pela iminente inobservabilidade da rede, caso esta medida venha a se tornar indisponível. Esta situação limite, correspondente a medida sem redundância, faz com que EGs em medidas críticas sejam indetectáveis pela análise de resíduos da estimação. Situação semelhante pode ocorrer com pares críticos de medidas, i.e., caso um destes torne-se indisponível, a rede resulta inobservável. EGs em conjuntos destes pares (conjuntos críticos) são detectáveis, mas não identificáveis.

Embora os problemas associados à observabilidade, criticalidade e detecção/identificação de EGs estejam intimamente ligados, muitas vezes são analisados em separado, em razão da segmentação usualmente adotada em processos de estimação: observabilidade e criticalidade são avaliadas antes da etapa de estimação propriamente dita (filtragem) e o processamento de EGs ocorre ao fim do processo, na etapa de análise dos resíduos de estimação das medidas. Entretanto, uma abordagem mais própria aos referidos problemas consiste em considerá-los como um só, caracterizando-se sua dependência estrita à estrutura do sistema de medição, independentemente dos valores das medidas coletadas, o que será proposto na presente Tese.

Outro ponto a se destacar, refere-se à disponibilidade de medidas oriundas de unidades de medição fasorial (UMFs), destinadas a enriquecer o processo de EE [Mora09], [Guim11]. Uma UMF instalada em determinada barra da rede pode prover medidas de fasores de tensão (módulo e ângulo), observações diretas do estado, bem como medidas de fasores de corrente nas linhas incidentes nesta barra. Assim sendo, agregar medidas desta natureza torna-se de todo vantajoso, com implicações na observabilidade, criticalidade e tratamento de EGs, de acordo com o que foi exposto anteriormente.

Por fim, deve-se mencionar que a análise da observabilidade de uma rede elétrica, sob a supervisão da função EE, tem sido recentemente alvo de pesquisas relacionadas ao problema de segurança frente a ataques cibernéticos em redes essenciais à infraestrutura, tais como as dos sistemas elétricos de potência [Liu09], [Bobb10]. Estudos de vulnerabilidade de medidas frente a ataques maliciosos que visam infligir EGs em grupos críticos de medidas vêm sendo conduzidos [Teix10].

1.2. Objetivos

Atributos da redundância de medidas (quantidade, tipo e localização na rede) desempenham um papel importante na observabilidade, criticalidade e processamento de EGs, nem sempre devidamente considerados.

Na análise de observabilidade convencional, comumente verifica-se que esta não apresenta nenhuma informação sobre os riscos da perda iminente da capacidade de se observar a rede elétrica como um todo, nem tampouco sobre a incapacidade das rotinas de validação de resíduos da estimação em processar EGs, decorrentes da presença de dados críticos.

Assim sendo, esta Tese objetiva definir indicadores de observabilidade referentes a sistemas de medição destinados à EE em sistemas de potência. Estes serão propostos para revelar quantitativamente deficiências de dados em níveis global e local para a EE, quando efetuada a etapa da análise de observabilidade.

Na avaliação de criticalidades, tomando-se por base a identificação de medidas críticas (Cmeds) e conjuntos críticos de medidas (Cconjs), os indicadores propostos deverão refletir a capacidade de cobertura de um sistema de medição. Cmeds são medidas não redundantes (i.e., completamente não correlacionadas com as demais), para as quais a EE é inútil, ou seja, não filtrará qualquer ruído ou detectará EGs que nelas possam estar presentes. A remoção de uma Cmed torna o sistema inobservável. Define-se Cconj como um grupo de medidas redundantes em que a perda de qualquer um dos seus elementos torna os restantes do grupo, Cmeds. A perda de um par qualquer de medidas de um Cconj causa inobservabilidade.

Além das criticalidades mais frequentes - individual de medidas (Cmeds) e pares de medidas (Cconjs) - outras de grau de cardinalidade mais elevado (k -tuplas críticas) serão definidas, generalizando-se o conceito de criticalidade de medidas. Além disto, criticalidades de ramos da rede serão abordadas. Os indicadores correspondentes a estas diversas criticalidades também serão propostos.

No sistema de medição considerado para avaliação da observabilidade, serão admitidas medidas convencionais (fluxos e injeções de potência ativa/reactiva, magnitudes de tensão) e fasoriais (tensões e correntes).

Espera-se mostrar que os indicadores de observabilidade propostos— de forma simples, eficaz, quantitativa—se prestem a retratar os riscos de inobservabilidade a que se expõem as redes elétricas de potência supervisionadas pela função EE. Além disso, também sejam capazes de servir de métrica para a comparação de diferentes alternativas de investimentos destinados à construção/expansão de planos de medição.

Finalmente, será desenvolvido um aplicativo computacional, com interface gráfica, destinado à avaliação de criticalidades em sistemas de medição, a partir do qual os indicadores de observabilidade propostos poderão ser determinados.

1.3. Estrutura da Tese

O presente trabalho de pesquisa está estruturado em seis capítulos, cujos conteúdos são a seguir descritos sucintamente:

O Capítulo 2 contém aspectos básicos do processo de EE em sistemas de potência, construído por meio do Método dos Mínimos Quadrados Ponderados, compreendido pelas etapas de configuração da rede, análise de observabilidade, filtragem e análise de resíduos.

No Capítulo 3, faz-se uma revisão bibliográfica do problema de análise de observabilidade, de modo a apresentar as diferentes abordagens encontradas na literatura da área, tendo em vista a definição de condições críticas de observabilidade. Regras que simplificam a identificação de tais condições em diversos casos são propostas.

No Capítulo 4, indicadores de observabilidade são propostos para quantificar os diferentes riscos de inobservabilidade.

O Capítulo 5 refere-se a testes efetuados com sistemas padrão IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), visando demonstrar a adequação dos indicadores propostos para avaliação da observabilidade. Os resultados destes testes foram alcançados por meio de um aplicativo computacional, **ObservApp**, com interface gráfica amigável, desenvolvido durante o trabalho de pesquisa desta Tese.

No Capítulo 6, sintetizam-se as principais conclusões da Tese e apresentam-se propostas para trabalhos de pesquisa futura.

1.4. Publicações

Os seguintes artigos oriundos do presente trabalho de pesquisa foram publicados:

- Johnny E. Villavicencio Tafur, M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini Souza, M. Th. Schilling, "Cálculo de índices de observabilidade na estimação de estado em sistemas de potência", Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Juiz de Fora - MG, Anais do XVII CBA, v.1, pp 1-8, Set./2008.
- M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza, Johnny E. Villavicencio Tafur, "Indicators of critical conditions for state estimation", IEEE Power & Energy Society General Meeting, Proc. IEEE PES General Meeting, v.1, pp.1-6, Calgary-Canada, Jul./2009.

Capítulo 2

Estimação de Estado

2.1 Introdução

Intuitivamente, o conceito de estado diz respeito à condição (física, operativa) em que determinado sistema se encontra, caracterizada por um conjunto mínimo de grandezas, observadas em um dado intervalo de tempo. O procedimento conhecido por Estimação de Estado (EE) refere-se à obtenção do melhor valor para o estado, de acordo com um critério estabelecido, recorrendo-se a observações (medidas) realizadas no sistema.

Em sistemas de potência, considera-se Schweppe como pioneiro na construção de processos de EE [Schw70]. Nestes, o estado caracteriza-se pelas tensões complexas (magnitude e ângulo) em todas as barras da rede, observadas direta ou indiretamente por medidas de grandezas elétricas (e.g., fluxos e injeções de potência), adquiridas remotamente na rede elétrica sob supervisão. Admite-se que o sistema opere em condições normais, em um regime conhecido por quase estático, no qual variações suaves e lentas de carga são sentidas, seguidas de ajustes de geração. Considera-se *a priori* que a configuração da rede elétrica e respectivos parâmetros de seus ramos sejam perfeitamente conhecidos.

Ao longo dos anos, a função EE em redes elétricas de potência tornou-se um campo fértil de pesquisa e desenvolvimento [Cout90], considerando o caráter multifacetado das diversas etapas que a integram e sua implementação computacional em centros de operação de sistemas. Fundamentalmente, tal função realiza a tarefa de prover valores confiáveis das grandezas elétricas de interesse para a operação, atuando como um filtro para suavizar erros estatisticamente pequenos (corriqueiros) e reter aqueles oriundos de eventual mau funcionamento do sistema de aquisição de dados. Faz parte do processo de estimação, a obtenção atualizada da correta configuração da rede elétrica e sua observabilidade.

Atualmente, algoritmos de EE com base no método dos mínimos quadrados ponderados (MQP), executados em nível hierárquico superior (de forma centralizada), processando um conjunto de medidas referente a uma varredura da rede supervisionada,

tornaram-se bem estabelecidos como parte integrante de aplicativos de sistemas de gerenciamento de energia.

Seja qual for o processo adotado para a EE, para que seja bem sucedido, deve lidar com um conjunto de medidas redundantes, influentes nas diversas etapas (não estanques) que estabelecem este processo.

Avalia-se a redundância de um conjunto de medidas considerando aspectos, tais como: observabilidade (alcance de todas as barras da rede); confiabilidade (tratamento de dados espúrios), qualidade (precisão das estimativas) e robustez (fazer frente a indisponibilidades de dados).

Dentre de certos limites (notadamente, avaliando-se custo), sempre deseja-se dispor de sistemas de medição de elevada redundância. Entretanto, considerando o ambiente competitivo (onde se preconiza a aplicação otimizada de investimentos) em que se inserem as empresas de energia elétrica atuais, muitas vezes, a supervisão de redes de potência se dá sem a devida redundância de dados. Contribuem para isto, condições operativas tais como: funcionamento temporariamente inadequado do sistema de comunicação de dados que resulte em perda de dados; indisponibilidades de medidas rejeitadas como espúrias por terem sido colhidas por unidades de medição temporariamente defeituosas; manutenção de dispositivos de medição; eliminação (sem substituição) de medidas espúrias; reconfigurações da rede. Como resultado de tudo, processos de EE, notadamente os de natureza estática, podem apresentar problemas de desempenho a serem criteriosamente estudados.

A seguir, busca-se apresentar principais etapas e fundamentos de processos de EE baseados no método MQP, de modo a que se alcance suficiente entendimento sobre o problema de estimação.

2.2. Etapas

A EE destina-se à construção de uma base de dados completa e confiável a ser utilizada por funções de segurança e otimização. Tradicionalmente, o problema de EE compõe-se de várias etapas [Abur04]: pré-processamento; configuração da rede; análise de observabilidade; filtragem; e análise de resíduos. Uma breve descrição do conteúdo de tais etapas apresenta-se a seguir.

Etapa 1: Pré-processamento

Realiza-se a verificação de limites de aceitabilidade dos valores das grandezas medidas, considerando os estados atuais dos equipamentos de chaveamento, de maneira a eliminar medidas flagrantemente errôneas e corrigir erros de configuração da rede.

Etapa 2: Configuração da Rede

A partir de dados digitais de *status* corrente (aberto/fechado) de dispositivos tais como chaves e disjuntores, bem como considerando informações referentes ao tipo e localização de medidores, determina-se a configuração atual da rede elétrica supervisionada e seus respectivos medidores. Esta etapa faz-se necessária para que se possa transformar o modelo seção de barra-dispositivos de chaveamento (i.e., aqueles que estabelecem as conexões físicas dos elementos da rede) no modelo conhecido por barra-ramo, presente nos diagramas unifilares utilizados pelos aplicativos de análise de redes elétricas. Usualmente, o módulo computacional responsável pela configuração da rede atua por exceção, i.e., apenas quando há alterações de *status* dos referidos dispositivos ou em ciclos pré-estabelecidos.

Etapa 3: Observabilidade

Considerando o processamento realizado na etapa anterior, avalia-se para o conjunto de medidas disponíveis em um dado instante, se a EE realiza-se em toda a rede. Caso não seja possível observar a rede como um todo, identificam-se, as ilhas observáveis e as medidas (faltantes), necessárias para tornar o sistema completamente observável (pseudomedidas). A análise de criticidade de medidas pode ser agregada a esta etapa.

Etapa 4: Filtragem

Esta etapa de filtragem, considerada como um núcleo do processo de EE, ocupa-se da obtenção de estimativas para o estado mais favorável de operação do sistema, usualmente por meio do método de MQP.

Etapa 5: Análise de Resíduos

Aqui são realizados testes estatísticos para se detectar e identificar possíveis erros na configuração da rede e EGs nas grandezas medidas que não foram eliminados na etapa de pré-processamento.

A Figura 2.1 apresenta a sequência de etapas do processo de EE descritas anteriormente. O detalhamento de cada uma destas etapas pode ser encontrado em [Mont99] e [Abur04].

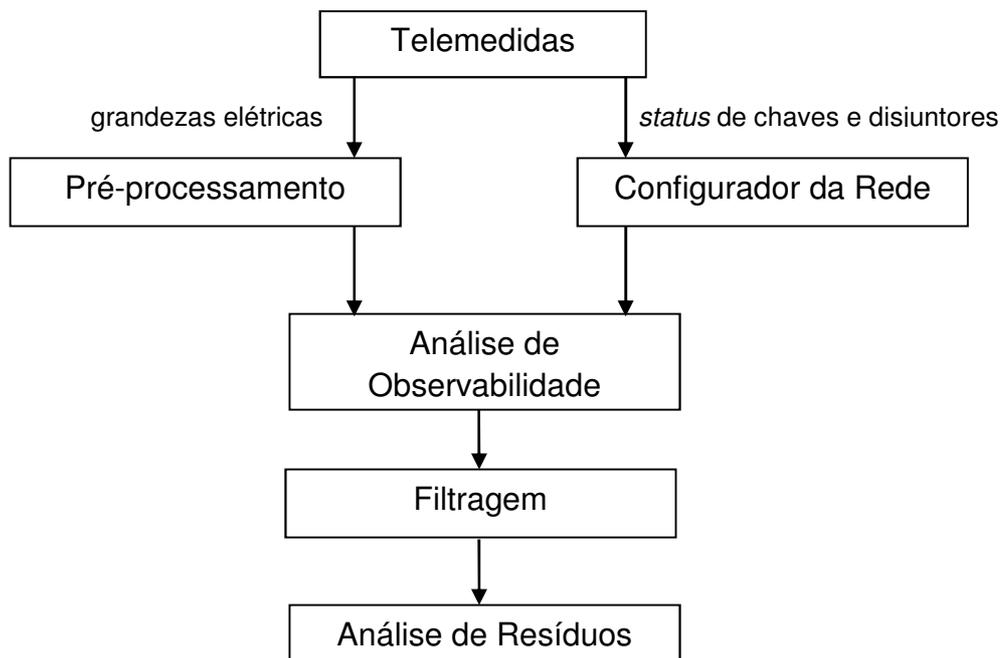


Figura 2.1 Etapas básicas do processo de estimação de estado

Para a construção de um algoritmo de EE, alguns aspectos básicos da EE convencional serão resumidamente apresentados como segue.

2.3. Fundamentos

Usualmente, o problema de EE tem sido formulado através do método de MQP, que utiliza a equação que relaciona estado x e suas observações (medidas) z , para então construir uma função-objetivo $J(x)$ a ser minimizada [Abur04], conforme se vê a seguir.

$$z = h(x) + v \quad (2.1)$$

$$J(x) = [z - h(x)]^t R^{-1} [z - h(x)] \quad (2.2)$$

onde x e z são vetores de estado ($n \times 1$) e de medidas ($m \times 1$), respectivamente; h vetor das funções de fluxo de potência, tomando-se a configuração atual da rede; v vetor de ruído Gaussiano, com média zero e matriz de covariância R . Ângulos e magnitudes das tensões nodais compõem o vetor de estado, enquanto que fluxos e injeções ativas/reativas e magnitudes de tensão formam o vetor das medidas convencionais.

O estado \hat{x} que minimiza $J(x)$ pode ser obtido por:

$$H^t R^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (2.3)$$

O que leva ao seguinte processo iterativo:

$$x^{i+1} = x^i + K^i [z - h(x^i)] \quad (2.4)$$

i = contador de iterações

$$K = \Sigma H^t R^{-1}, \Sigma = [H^t R^{-1} H]^{-1}, H = \frac{\partial h}{\partial x}, em x = x^i$$

O vetor de resíduos r , definido como sendo a diferença entre z e as correspondentes quantidades filtradas $\hat{z} = h(\hat{x})$ é normalizado e submetido ao seguinte teste de validação:

$$r_N(i) = |r(i)| / \sigma_E(i) < \lambda \quad (2.5)$$

$$E = R - H [H^t R^{-1} H]^{-1} H^t \quad (2.6)$$

sendo $\sigma_E(i) = \sqrt{E(i, i)}$ o desvio-padrão da i -ésima componente do vetor-resíduo. Violações do limite λ indicam alguma anormalidade no processo de EE.

No próximo capítulo, o problema de observabilidade de sistemas será abordado, estabelecendo-se, em termos de diversas criticalidades, alguns limites impostos pela medição à EE.

Análise de Observabilidade

3.1. Introdução

Para a construção de um processo de estimação que produza resultados confiáveis (i.e., estimativas estatisticamente consistentes do estado de operação mais provável de um sistema de potência), planos de medição devem ser projetados para garantir níveis adequados de redundância de medidas que evitem o ingresso em situações críticas de observabilidade. Entretanto, nem sempre isto acontece, quer seja por razões financeiras, quer por condições adversas de operação. A quantificação dos referidos níveis de redundância, expressos por indicadores de observabilidade, se constitui no objetivo principal desta Tese.

No campo da EE em sistemas de potência, encontram-se na literatura especializada diversos métodos para a análise de observabilidade. De forma geral, abordam este problema por meio de aspectos topológicos, numéricos ou uma combinação destes.

No presente capítulo, faz-se uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos que tratem de observabilidade no problema da EE e que tenham alguma interseção com a determinação de níveis de redundância de medidas. Além disto, são propostas regras de decisão que visam facilitar a identificação de criticalidades, em diversos casos da análise de riscos de inobservabilidade.

3.2. Revisão Bibliográfica

Tradicionalmente, a análise de observabilidade pode ser entendida como uma fase de preparação para a aplicação do processo de EE, em que – a cada nova varredura executada pelo sistema de aquisição de dados – se busca assegurar que o estado da rede em estudo seja plenamente observado. Tal análise considera redundância, tipo e localização das medidas disponíveis na configuração atual da rede, em certo intervalo de tempo de processamento. A teoria de grafos e métodos numéricos referentes ao processo de cálculo adotado para a EE constituem os principais elementos das abordagens mais frequentemente encontradas na literatura para a análise da observabilidade. Adiante, os principais trabalhos desta natureza são levantados e brevemente comentados.

Para o problema de EE em sistemas de potência, analisar a observabilidade consiste essencialmente em se verificar se um dado conjunto de medidas disponíveis para processamento permite que o estado do sistema, em sua totalidade ou em parte, seja estimado. Se o estado do sistema for completamente observável, situação para a qual volta-se a presente Tese, busca-se conhecer que grau de observabilidade existe (muitas vezes revelado por meio da análise de criticalidades). Caso o estado do sistema não seja observável em sua intereza, então torna-se relevante conhecer as porções do sistema (comumente referidas como ilhas) em que o estado pode alcançado. Complementarmente, identifica-se qual o conjunto mínimo de medidas capaz de restaurar a observabilidade. Detalhes sobre os aspectos básicos da análise de observabilidade podem ser encontrados em [Mont99] e [Abur04].

A análise de observabilidade levada a efeito por meio de métodos topológicos caracteriza-se por não utilizar cálculos numéricos (em ponto flutuante); baseia-se estritamente em operações lógicas que se valem de dados sobre a conectividade dos elementos que compõem a rede elétrica, tipos de medidas e sua localização. Por sua natureza combinatorial, tal enfoque apresenta maior complexidade computacional do que aqueles de caráter numérico. Os valores reais de parâmetros elétricos para a representação dos ramos da rede não são relevantes para esta análise. As medidas são consideradas aos pares (ativo e reativo) e, conseqüentemente, o modelo desacoplado (potência ativa-ângulo) pode ser escolhido.

A primeira proposição de um método topológico para a análise de observabilidade coube a Clements e Wollenberg [Clem75] que, sem efetuar cálculos numéricos, buscaram aplicar conhecimentos heurísticos (extraídos da experiência com análise de redes elétricas) para avaliar a capacidade de cobertura de um conjunto de medidas distribuídas ao longo de uma rede sob supervisão. Posteriormente, Allemong e outros [Alle80] evidenciaram o caráter conservador de tal método (no sentido de indicar inobservabilidade, quando de fato esta não ocorreu) e sugeriram um novo algoritmo também heurístico para sanar o problema. Vários trabalhos, desenvolvidos por Clements, Krumpolz e Davis [Krum80], [Clem81], [Clem82], [Clem83], se sucederam ampliando a aplicação da análise topológica de observabilidade. Em [Quin82], [Mori91] e [Nuce91] foi proposta a utilização de conceitos topológicos (grafo, árvore, floresta, etc.) em algoritmos computacionalmente eficientes para a análise de observabilidade. Posteriormente, o algoritmo apresentado em [Qui82] foi estendido para tratar criticalidades de medidas em separado e em conjuntos [Simo90]. Em [Simo02], [Kats03] e [Korr05] a análise de observabilidade foi ampliada de modo a incluir explicitamente dispositivos de chaveamento (disjuntores e chaves seccionadoras) como elementos da rede elétrica.

Como alternativa ao enfoque topológico, métodos numéricos para a análise da observabilidade foram inicialmente propostos por Monticelli e Wu [Mont85a], [Mont85b]. Neles são apresentados conceitos relativos a ramos não observáveis e ilhas observáveis, sendo explorada a triangularização da matriz Ganho. Mais tarde, devido a problemas de mau condicionamento numérico desta matriz, esses autores desenvolveram uma metodologia baseada em métodos ortogonais para transformação da matriz Jacobiano [Mont86].

A análise de observabilidade numérica da rede pode envolver variáveis associadas a ramos [Expo98] ou nós da rede elétrica [Mont85a] e tomar por base as matrizes Jacobiano e Ganho do processo de EE. Nos métodos frequentemente adotados, operações numéricas associadas à transformação de matrizes (Eliminação de Gauss, fatoração, escalonamento, etc.) são realizadas. Por exemplo, em [Mont85a] e [Gou00] verifica-se a ocorrência de pivôs nulos durante o processo de Eliminação de Gauss aplicado à matriz Ganho. Slutsker apresentou um algoritmo que utiliza uma forma reduzida da matriz Jacobiano [Slut87]. Chen propôs um algoritmo livre da manipulação de números reais ou complicadas lógicas combinatoriais [Chen90]. Em [Falc94] encontra-se o problema da observabilidade tratado através de uma forma de escalonamento da matriz Jacobiano. Também Castillo e outros [Cast05] trabalharam com a matriz Jacobiano para a avaliação da observabilidade. Já em [Ding07] um método simples baseado na matriz Jacobiano estendida para incorporar pseudomedidas de fluxo de potência foi proposto. London e outros trabalharam com a fatoração triangular da matriz Jacobiano [Lond01], [Lond07]. Um método eficiente com base na Eliminação de Gauss e aritmética binária foi proposto em [Sola09]. Gou apresenta também uma comparação entre os algoritmos numéricos que usam a matriz Ganho e os que adotam a matriz Jacobiano [Gou06].

Contribuições relevantes para a observabilidade numérica podem também ser encontradas em [Gou01] e [Crai90]. Em [Mang00], o problema da provisão de pseudomedidas para manter a condição de observabilidade é abordado. Já os trabalhos de Abur e Expósito analisaram a participação de medidas de corrente no processo de EE [Abur95], [Abur97], [Expo98]. Uma abordagem que trata de forma integrada a análise de observabilidade, compreendendo a identificação de medidas críticas, medidas redundantes e irrelevantes, provisão de pseudomedidas, etc. encontra-se em [Cast06], [Prun10]. Ainda nesta categoria de métodos, incluem-se os trabalhos recentes de Almeida, Asada e Garcia que exploram alternativamente a fatoração da matriz de Gram [Alme08a], [Alme08b].

Métodos híbridos, que combinam o tratamento topológico e numérico para análise da observabilidade, podem ser encontrados em [Conta88], [Korr03a] e [Korr03b].

Considerando a revisão bibliográfica apresentada, constata-se que os trabalhos sobre análise de observabilidade, em sua imensa maioria, concentram-se nos seguintes pontos, tomados isoladamente ou em conjunto:

- verificação, em um dado intervalo de tempo, se determinado sistema de medição disponibiliza medidas suficientes (em quantidade, tipo e posicionamento) que permitam estimar o estado de todas as barras da rede elétrica (sistema observável);
- caso o sistema analisado seja inobservável, obtenção de partes (ilhas) da rede que restaram observáveis;
- seleção de pseudomedidas que permitam a restauração da observabilidade da rede, sem a contaminação do processo de EE.

Ainda, aspectos computacionais necessários ao ambiente de tempo real são focalizados, buscando-se: simplicidade de implementação; aproveitamento de rotinas de cálculo já utilizadas pelo processo de EE; e baixo esforço computacional extra.

Do ponto de vista preventivo, a análise de observabilidade convencional é deficiente, já que produz uma resposta padrão binária (sim ou não) para a rede elétrica supervisionada, sem informações sobre criticalidades. Até que a rede se torne inobservável, em geral nenhuma ação será tomada nesta etapa do processo de EE. Portanto, considerando que a análise de observabilidade da rede seja pré-requisito da função de EE, torna-se importante que tal análise deva também incluir preventivamente a identificação de possíveis criticalidades e de ações que as possam contornar. Por outro lado, estudos sobre redundância crítica de medidas têm sido por vezes uma questão tratada na esfera de interesse da análise de EGs [Ayre86], ou até mesmo mais recentemente, no projeto de planos de medição robustos [Souz05].

Assim sendo, verifica-se que há uma lacuna quanto à avaliação quantitativa da observabilidade de uma rede elétrica sob supervisão da função EE. Isto seria extremamente útil para resguardar o processo de EE de condições adversas em que haja observabilidade, mas níveis críticos de redundância estejam presentes, pondo em risco a confiabilidade deste processo [Cout99]. Tais condições referem-se à possível ocorrência de eventos, como por exemplo: indisponibilidade de uma unidade de medição que congregue diversas medidas; retirada de serviço de um importante ramo da rede.

A conjunção das análises de observabilidade e criticalidade pode ser concebida tanto do ponto de vista topológico quanto numérico. Se por um lado o enfoque topológico evita problemas de comparação numérica de valores, por outro demandam o

estabelecimento de rotinas complexas de caráter combinatório, não pertencentes aos processos clássicos de EE. Já o tratamento numérico, de mais fácil formalização e entendimento, apoia-se em rotinas de cálculo presentes nos algoritmos de filtragem para a obtenção do estado operativo do sistema.

Do exposto, na presente Tese, conclui-se pela adoção da análise numérica do problema de estabelecimento de limites de criticalidade-observabilidade, quantificáveis em termos de indicadores de observabilidade para a EE, propostos no Capítulo 4.

3.3. Observabilidade Numérica

Como o problema da observabilidade apresenta natureza estrutural, i.e., origina-se na interdependência entre as variáveis de estado e respectivas medições, usualmente simplifica-se tal problema por meio das seguintes considerações: formula-se o problema através da equação linear que relaciona medidas e estado; adota-se o princípio do desacoplamento entre os conjuntos de variáveis ativas e reativas, utilizando-se apenas o conjunto potência ativa-ângulo $P - \theta$ na formação da matriz Jacobiano H substitui-se a matriz R de covariância dos erros das medidas pela matriz identidade \mathcal{I} ; atribuem-se valores unitários aos parâmetros da rede elétrica.

A equação de medição linear desacoplada, obtida a partir de (2.1), é dada por:

$$z_a = H_a \theta + v_a \quad (3.1)$$

onde θ e z_a são, respectivamente, o vetor $(n \times 1)$ de estado (ângulos de fase das tensões das barras) e o vetor $(m \times 1)$ de medidas ativas (convencionais, fluxos nos ramos e injeções nodais de potência ativa; e fasoriais, ângulos de fase das tensões das barras e correntes nos ramos nelas incidentes); H_a representa a matriz Jacobiano $(m \times n)$ de medidas da parte ativa versus ângulos de fase das barras, para a configuração da rede atual; v_a é o vetor de erro das medidas ativas (média zero e matriz de covariância \mathcal{I} , identidade).

Como anteriormente mencionado, na análise de observabilidade todas as susceptâncias dos ramos-série da rede são arbitrariamente atribuídos valores unitários, e os ramos em derivação são ignorados. Assim, os elementos não nulos da matriz Jacobiano H_a , associados à ℓ -ésima medida, assumem os valores a seguir definidos [Abur04].

- medida de fluxo de potência entre as barras i e k , P_{ik} :

$$H_a(\ell, i) = 1$$

$$H_a(\ell, k) = -1$$

- medida de injeção de potência na barra i , P_i :

$$H_a(\ell, i) = n^\circ \text{ de ramos conectados à barra } i;$$

$$H_a(\ell, k) = -1, \text{ sendo } k \text{ o índice referente à barra que está conectada à barra } i;$$

No caso de inclusão de medidas fasoriais de ângulo de fase das tensões nodais e correntes nos ramos da rede [Chen06]:

- medida de ângulo da barra i , θ_i :

$$H_a(\ell, i) = 1$$

- medida de corrente (parte real) no ramo entre as barras i e j , I_{ij} :

$$H_a(\ell, i) = 1$$

$$H_a(\ell, j) = -1$$

A estimativa para o vetor ângulo de fase θ é obtida a partir de (2.3) adotando-se o modelo linear, e a estimativa do vetor de medidas ativas através de (3.1):

$$H_a^t [z_a - H_a \hat{\theta}] = 0 \quad (3.2)$$

$$\hat{\theta} = (H_a^t H_a)^{-1} H_a^t z_a = G_a^{-1} H_a^t z_a \quad (3.3)$$

$$\hat{z}_a = H_a \hat{\theta} \quad (3.4)$$

onde $G_a = H_a^t H_a$ é conhecida como matriz de Ganho.

A verificação da observabilidade do sistema realiza-se através da condição de inversibilidade da matriz de ganho G_a definida em (3.3).

Como a criticalidade de medidas, isoladamente ou em pares, pode-se avaliada numericamente através da análise de resíduos da EE, a seguir estes serão determinados.

O vetor resíduo de estimação (parte ativa), obtido usando-se as equações anteriores, é calculado por:

$$r_a = z_a - \hat{z}_a = z_a - H_a \hat{\theta} = z_a - H_a (H_a^t H_a)^{-1} H_a^t z_a = [\mathfrak{I} - H_a (H_a^t H_a)^{-1} H_a^t] z_a \quad (3.5)$$

Usando a matriz de covariância dos resíduos das medidas ativas da estimação E_a em (3.5) vem:

$$E_a = [\mathfrak{S} - H_a(H_a^t H_a)^{-1} H_a^t] \quad (3.6)$$

$$r_a = E_a z_a \quad (3.7)$$

Para a normalização do i -ésimo elemento do vetor r_a , encontra-se:

$$r_{a_N}(i) = \frac{|r_a(i)|}{\sqrt{E_a(i,i)}} \quad (3.8)$$

Usando a definição de coeficiente de correlação entre resíduos encontrada em [Mont99], para as medidas ativas i e j , vem:

$$\gamma_{ij} = \frac{|cov[r_{a_N}(i), r_{a_N}(j)]|}{\sqrt{var[r_{a_N}(i)]} \sqrt{var[r_{a_N}(j)]}} = \frac{|E_a(i,j)|}{\sqrt{E_a(i,i)} \sqrt{E_a(j,j)}} \quad (3.9)$$

Obviamente, $\gamma_{ii} = 1$. Admite-se então que tais coeficientes sejam armazenados em uma matriz de coeficientes de correlação, denominada Γ_a .

3.4. Criticalidades

Na operação corrente de um sistema de potência, medidas poderão se tornar indisponíveis, colocando a rede sob supervisão em condições críticas de observabilidade, por vezes comprometendo a rotina de processamento de EGs, trazendo a perda de confiabilidade dos resultados alcançados pelo processo de estimação. Em uma situação extrema de deficiência de medidas, i.e., naquela em que cada medida a ser processada não possui redundância – tornando-se imprescindível ou crítica para a observabilidade completa do sistema – a função EE torna-se desnecessária pela total incapacidade de redução do grau de incerteza das medidas. Assim sendo, medidas individualmente ou formando grupos podem apresentar limites inferiores de redundância. Tais medidas são denominadas medidas críticas (Cmeds), se ocorrerem isoladamente, ou elementos de conjuntos críticos (Cconjs), formados a partir de pares críticos de medidas, ou, genericamente, de grupos críticos de k medidas ($C_{k\text{-tuplas}}$).

Se por um lado medidas indisponíveis podem trazer criticalidades, por outro estas podem advir de alterações na configuração da rede elétrica, o que aumenta a complexidade do problema em análise.

Nas seções que se seguem, serão abordadas as criticalidades mais importantes, estabelecendo-se suas definições e respectivos algoritmos numéricos de identificação.

Aqui, deve-se mencionar que não constitui objetivo desta Tese propor algoritmos para identificar criticalidades, mas sim utilizá-los, para a partir dos seus resultados, construir indicadores que quantifiquem as diversas criticalidades que podem por em risco o sucesso do processo de EE.

3.5. Medidas e Conjuntos Críticos

Usualmente, entende-se por redundância crítica de medidas as situações caracterizadas pela presença de medidas críticas (Cmeds) e conjuntos críticos (Cconjs), assim definidos:

- Cmed é aquela cuja ausência do conjunto de medidas recebidas para processamento leva a rede supervisionada à perda de observabilidade.
- Cconj é aquele formado por um grupo de duas ou mais medidas em que a remoção de qualquer uma dentre tais medidas torna todas as remanescentes do grupo Cmeds.

Cconjs são também conhecidos como conjuntos minimamente dependentes [Korr91] e grupos de erros grosseiros [Ayre86].

O processo de identificação de Cmeds e Cconjs aqui utilizado [Cout07] baseia-se nas propriedades numéricas dos resíduos da estimação, a saber:

- Cmeds apresentam sempre resíduos nulos e sua matriz de covariância é nula. Em outras palavras, Cmeds não se beneficiam do processo de EE, por serem totalmente não correlacionadas a qualquer medida (observação) deste processo. Portanto, nestas condições, tais medidas saem do processo de EE tão “cruas” (até mesmo podendo conter EGs) como nele ingressaram. EGs em Cmeds não são detectáveis, pela análise de resíduos.
- Medidas pertencentes a Cconjs apresentam sempre resíduos normalizados idênticos e de máxima correlação entre si (coeficientes de correlação unitários). EGs em medidas pertencentes a Cconjs são detectáveis, mas não identificáveis. Caso o resíduo normalizado de uma medida de um Cconj viole o limite para a detecção de EGs, todos os demais resíduos das medidas deste conjunto igualmente violarão (com o mesmo grau de intensidade). Neste caso então, todas as medidas que integram o Cconj serão declaradas como medidas suspeitas. Como os respectivos resíduos normalizados são numericamente iguais, admita que se escolha ao acaso uma das medidas suspeitas para ser eliminada (desta forma buscando-se identificar o EG). Daí resulta que as

medidas suspeitas remanescentes no Cconj tornar-se-ão críticas (resíduos nulos), impossibilitando a identificação do EG.

3.5.1. Identificação

Da impossibilidade de detecção/identificação de EGs em Cmeds/Cconjs através dos resíduos da estimação, fica clara a importância de se conhecer *a priori* tais condições de criticalidade.

A seguir, apresenta-se um algoritmo numérico [Cout07] com base nas propriedades dos resíduos da estimação (descritas no Apêndice A), para a identificação de Cmeds e Cconjs. Alternativamente, encontram-se em [Lond07] e [Alme09] outros algoritmos que exploram as características das matrizes Jacobiano e Gram, respectivamente, para revelar tais criticalidades.

Para a identificação de Cmeds e Cconjs, implementa-se o seguinte algoritmo, descrito sucintamente pelas seguintes etapas e ilustrado pelo fluxograma simplificado da Fig. 3.1:

Etapla Inicial:

Construir a matriz Jacobiano H_a , para a configuração da rede de interesse. Definir valores para o vetor das medidas ativas z_a .

Etapla 1:

Para cada medida ativa $z_a(i)$, calcular $E_a(i, i)$ e $r_a(i)$. Em seguida, verificar se tais valores são nulos. Em caso afirmativo, declarar $z_a(i)$ como Cmed.

Etapla 2:

Para cada medida ativa não declarada como Cmed, calcular o correspondente resíduo normalizado. Formar uma lista ordenada com os elementos de r_{a_n} . Comparando sequencialmente os elementos desta lista, formar grupos de medidas para as quais os resíduos normalizados correspondentes sejam iguais. Declarar tais grupos como candidatos a Cconjs. Em seguida, calcular a matriz Γ_a e verificar se as medidas integrantes de cada conjunto-candidato a Cconj apresentam correlação unitária. Em caso afirmativo, declarar cada conjunto-candidato como Cconj de fato. Caso contrário, retirar de cada conjunto-candidato às medidas associadas a coeficientes $\gamma_{ij} \neq 1$. O conjunto-candidato que tiver pelo menos um par de medidas com correlação unitária será declarado como Cconj.

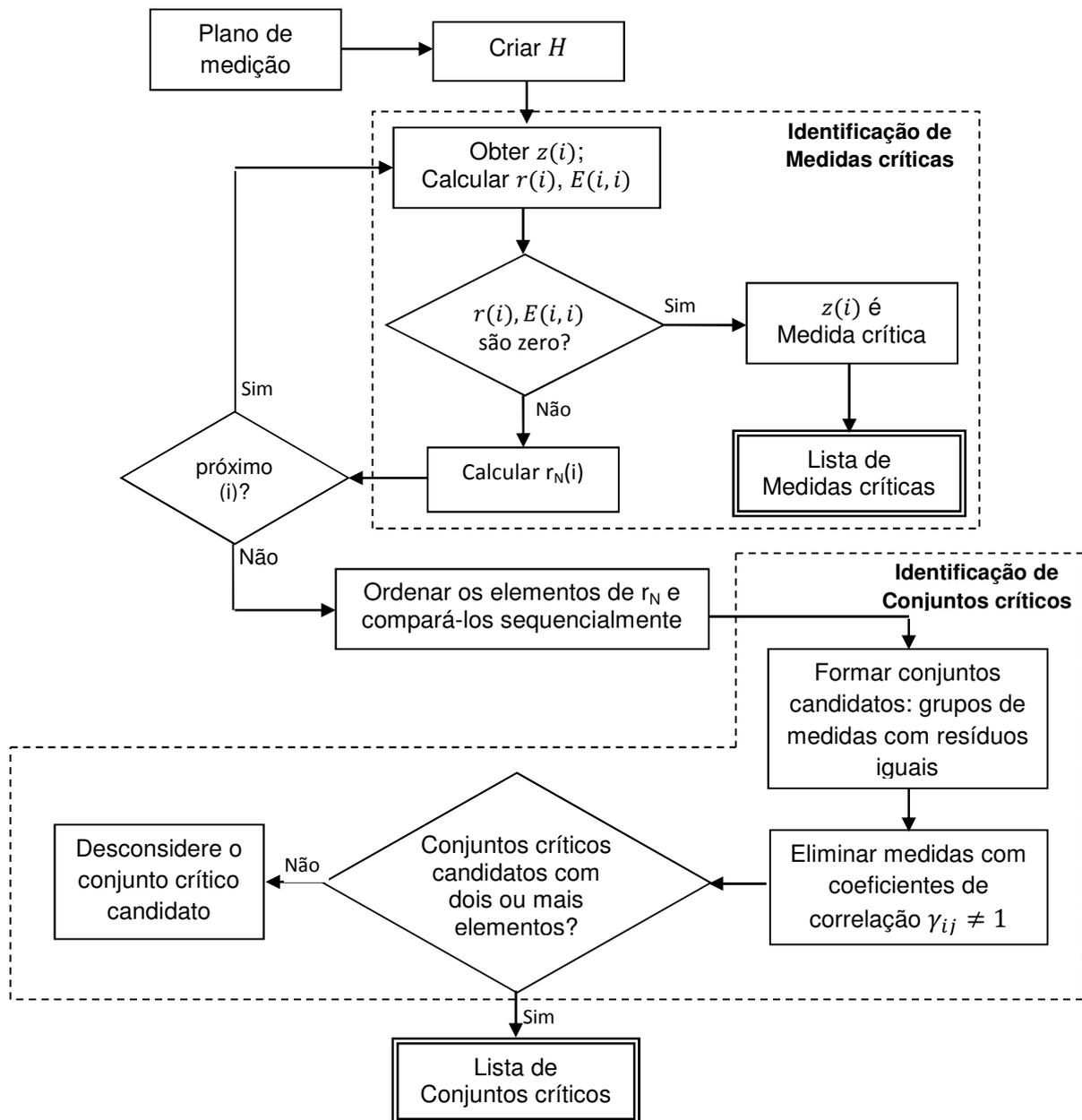


Figura 3.1. Fluxograma simplificado do algoritmo para identificação de Cmeds e Cconjs

Seguem alguns comentários sobre o algoritmo descrito na presente seção:

- No tratamento convencional da análise numérica da observabilidade, adota-se o modelo linear estabelecido em (3.1) para a equação das medidas, com o desacoplamento potência ativa-ângulo ($P - \theta$);
- Na representação da rede elétrica, apenas as reatâncias dos ramos-série são consideradas e com valores arbitrariamente escolhidos como unitários;

- c) A matriz Jacobiano H - em que cada linha representa uma medida de fluxo, injeção de potência ativa ou parte real de grandezas fasoriais (ângulos e correntes) - é constituída por valores inteiros (não nulos), situados em cada coluna associada ao ângulo de fase da tensão correspondente a cada barra, cujo índice se relacione à conexão física entre barras da rede. Portanto, a matriz H realiza o mapeamento entre medidas e componentes do estado;
- d) As ponderações individuais das medidas são desconsideradas, tomando-se a matriz identidade \mathcal{I} em substituição à matriz R (covariância dos erros de medição);
- e) Com a fatoração triangular da matriz Ganho ($H^t.H$) usada em (3.3), verifica-se se existem pivôs nulos. No caso de se incluir apenas uma medida de ângulo (o que equivale a adotar uma referência angular), a inexistência de pivôs nulos garante a observabilidade da rede supervisionada. O interesse aqui se volta para a identificação de criticalidades em sistemas que apresentem observabilidade completa.
- f) Ainda na etapa de análise de observabilidade-criticalidade, de modo a explorar as propriedades numéricas dos resíduos da estimação, adotam-se valores arbitrários para as medidas que integram o vetor z . Como tais valores devem buscar o favorecimento da avaliação numérica pretendida, propõe-se por exemplo a utilização de valores inteiros em sequência (i.e., 1, 2, 3, etc.). Tal procedimento se distingue de todos os métodos numéricos usualmente propostos para a análise de criticalidades que se voltam para o processamento das matrizes Jacobiano, Ganho e de Gram. Analisar os valores dos resíduos permite estabelecer uma clara conexão entre os limites da observabilidade e capacidade de identificação de erros grosseiros.
- g) Verificada a observabilidade da rede, calculam-se a matriz de covariância dos resíduos E e o vetor dos resíduos das medidas r_a , através de (3.6) e (3.7). A partir disto, pode-se realizar a avaliação de criticalidades individuais referentes às medidas disponíveis, i.e., verificar se Cmeds estão presentes: apresentam sempre resíduos nulos, sem qualquer correlação com os demais. Note que, esta condição dupla deve ser satisfeita, pois há casos de medidas com resíduos nulos que apresentam correlação com outras medidas. Forma-se então uma lista de Cmeds.
- h) Apenas para as medidas não classificadas como Cmeds, passa-se ao cálculo dos resíduos normalizados, usando-se (3.8), que são ordenados para facilitar a identificação de valores numericamente idênticos. Grupam-se as medidas com resíduos normalizados iguais (dentro de tolerância especificada), grupos estes que passam a ser considerados como candidatos a Cconjs. Ainda não é possível garantir a existência de

Cconjs, pois há casos em que medidas com resíduos normalizados numericamente iguais não apresentam máxima correlação.

- i) Finalmente, verifica-se dentre os Cconjs-candidatos aqueles que sejam formados por medidas (pelo menos um par) que apresentem coeficientes de correlação unitários, sendo então confirmados como Cconjs.

3.5.2. Atualização

Realizada uma avaliação de criticalidades como a descrita anteriormente, esta só será atualizada caso surjam indisponibilidades de medidas e/ou alterações na configuração da rede. Tome, por exemplo, a situação em que uma medida tenha se tornado indisponível. O procedimento de atualização irá considerar se tal medida estava classificada como:

- *Cmed* – neste caso, o sistema se torna inobservável;
- *Pertencente a Cconj* – as medidas remanescentes deste Cconj tornam-se críticas e passam a integrar, com as anteriormente apontadas, a lista de Cmeds. Demais Cconjs existentes poderão permanecer inalterados ou sofrer alterações, tais como: crescer com a introdução de medidas não pertencentes a outros Cconjs; crescer pela união com outro(s) Cconj(s). Novos Cconjs poderão se formar;
- *Outra* – nenhuma nova Cmed surgirá, já que a medida que se tornou indisponível é no mínimo duplamente redundante. Quanto aos Cconjs, alterações entre os existentes poderão ocorrer, assim como novos poderão se formar.

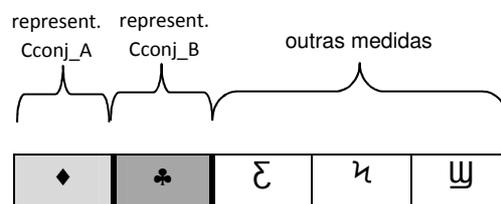
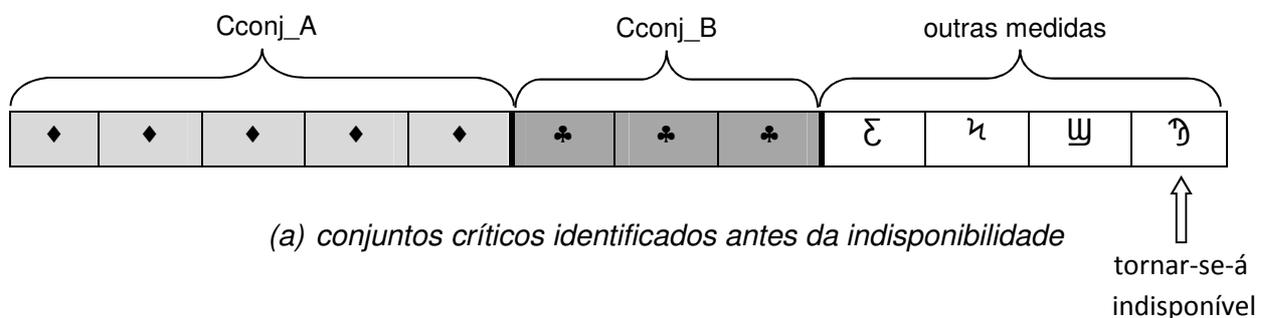
Como o algoritmo de identificação de Cmeds e Cconjs depende basicamente do cálculo da matriz E , torna-se vantajoso computacionalmente evitar que tal matriz seja recalculada inteiramente através de (3.6), toda vez que novas medidas se tornarem indisponíveis, alterando dimensionalmente a matriz H . Assim sendo, pode-se na indisponibilidade de uma medida i , alterar a matriz anterior E para E' da seguinte forma (Redução de Kron):

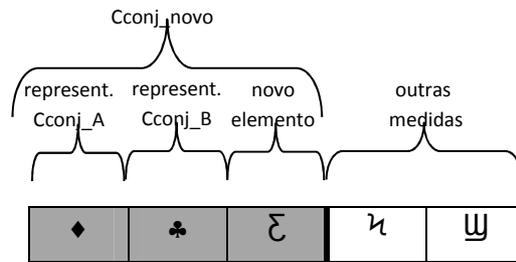
$$E'(k, j) = E(k, j) - E(k, i)E(i, i)^{-1}E(i, j) \quad \forall k, j=1, \dots, m(k, j \neq i) \quad (3.10)$$

Quando ocorre a indisponibilidade de medidas, outra possibilidade a ser explorada na atualização de criticalidades refere-se ao aproveitamento dos Cconjs já identificados. Considere a etapa do algoritmo em que sejam formados candidatos a Cconjs. Note que

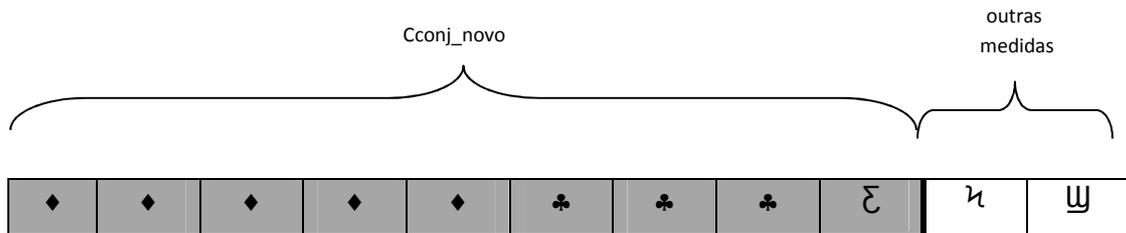
parte da tarefa de identificação já foi realizada, uma vez que medidas pertencentes a Cconj permanecem como tal, mesmo na ocorrência da referida indisponibilidade. Assim, pode-se eleger em cada Cconj uma medida qualquer para representá-lo. O resíduo desta medida será utilizado em comparações com os resíduos de outras medidas, de modo a se verificar aquelas que serão integradas ou não a Cconj.

Assim, a título de ilustração, considere a situação esquematizada na Figura 3.2a em que, de uma lista de 12 medidas, o Cconj_A (formado por 5 medidas) e o Cconj_B (composto por 3 medidas) foram identificados. Admita que das 4 medidas que não integram tais conjuntos uma tenha se tornado indisponível. A Figura 3.2b indica a nova situação, em que uma lista reduzida de medidas (com 5 de um total de 11) foi formada, com os Cconj sendo representados cada qual por apenas uma medida. A Figura 3.2c mostra o resultado do reprocessamento que indica a formação de um Cconj com 3 medidas: uma representante do Cconj_A; uma representante do Cconj_B; e uma outra medida que não figurava em nenhum Cconj anterior. Na Figura 3.2d, apresenta-se o resultado final da atualização pretendida, em que restou apenas um Cconj constituído por 9 elementos, fruto da união do Cconj_A e Cconj_B, com a adição de outra medida.





(c) reprocessamento para identificação de conjuntos críticos



(d) reprocessamento para identificação de conjuntos críticos

Figura 3.2. Exemplo ilustrativo da atualização de conjuntos críticos

Algoritmo para Reprocessamento de Cmeds e Cconjs:

O algoritmo principal para a identificação de criticalidades pode ser complementado para incorporar de forma eficiente o reprocessamento de Cmeds e Cconjs, conforme o que se descreve a seguir e ilustra-se na Figura 3.3.

- j) Iniciar o reprocessamento, caso uma medida qualquer i não crítica torne-se indisponível. Se tal medida for pertencente a um Cconj, então acrescente as medidas remanescentes deste conjunto, que se desfaz, à lista de Cmeds.
- k) Em cada Cconj previamente identificado, eleja uma medida qualquer para representá-lo. Separe da massa de medidas a serem processadas, aquelas que forem críticas ou representadas (as que pertençam a Cconjs, mas não tenham sido escolhidas como representantes).
- l) Recalcule a matriz E , usando (3.10). Repita as etapas (h) e (i) de formação de Cconjs-candidatos e de confirmação de Cconjs.
- m) Reintegre aos novos Cconjs formados as medidas representadas correspondentes, separadas na etapa k.

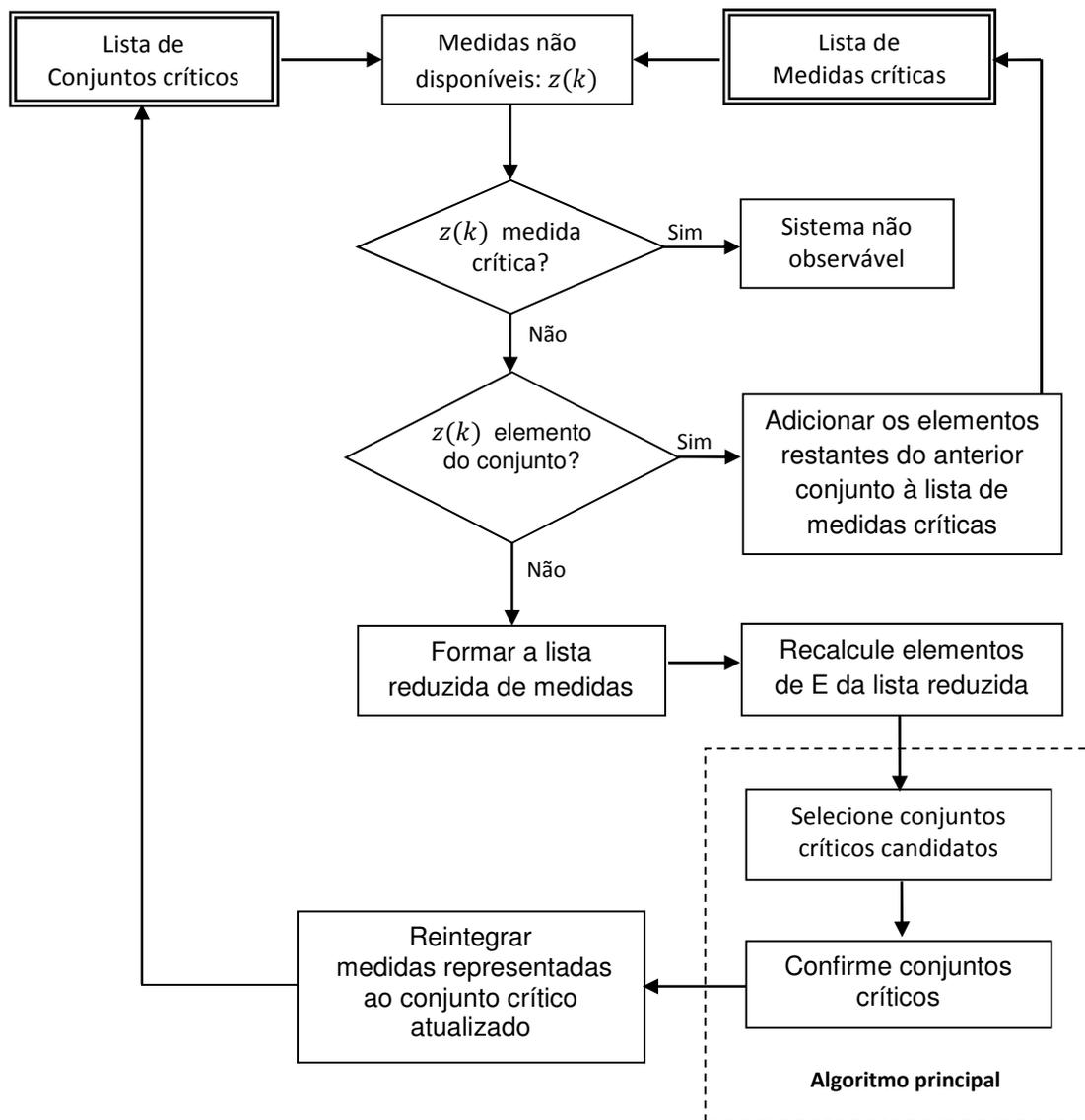


Figura 3.3. Fluxograma simplificado para identificação de criticalidades: reprocessamento

3.6. *k*-Tuplas Críticas

O conceito de criticalidade pode ser ampliado para englobar casos em que sejam formados grupos críticos de medidas cuja relação de dependência se dê, além das duplas (pares), em triplas (trincas, trios, tríades), quádruplas, quántuplas, sêxtuplas, etc. Genericamente, na EE em sistemas de potência, estes agrupamentos de k medidas têm sido referidos como k -tuplas críticas ($C_{k\text{-tuplas}}$). Assim, uma $C_{k\text{-tupla}}$ se constitui em um determinado grupo de k medidas tal que, se todas as medidas deste grupo tornarem-se simultaneamente indisponíveis para a EE, então o sistema resulta inobservável.

Usualmente, por apresentarem maior chance de surgimento, a identificação de duplas e trincas críticas têm sido os agrupamentos de interesse nas análises de planos de medição [Lond01]. Recentemente, a procura por $C_{k\text{-tuplas}}$ de cardinalidade superior a três têm despertado atenção, em casos referidos na literatura como aqueles de segurança cibernética de sistemas de potência [Sou12]. Também encontra-se em [Cast08] estudo de planos de medição “ m - k ” robustos, i.e., aqueles em que, para um conjunto mínimo de m medidas, assegura-se a observabilidade, mesmo que quaisquer k medidas fiquem indisponíveis.

A seguir, o interesse pela identificação de $C_{k\text{-tuplas}}$ será justificado pela consideração da criticalidade de unidades de medição que possam se tornar indisponíveis e comprometer a observabilidade.

3.7. Unidades de Medição Críticas

Sistemas de medição são equipados com dispositivos eletrônicos chamados de unidades terminais remotas (UTRs), instaladas em diversas subestações da rede, responsáveis pela coleta e transmissão ao centro de controle de vários tipos de medidas. Tais dados são geralmente obtidos por medidores multifuncionais, que coletam sinais analógicos provenientes de transformadores de corrente/tensão, digitalmente os processam, e geram um conjunto de medidas usado na EE [Caro11]. Mais recentemente, com os avanços tecnológicos alcançados, os chamados dispositivos eletrônicos inteligentes (DEIs) têm substituído ou complementado UTRs existentes [Abur04], assim como ocorre com as unidades de medição fasorial (UMFs) [Phad08].

Mesmo considerando que as unidades de medição modernas sejam dotadas de esquemas de segurança (e.g., operações de *backup*) que permitam a redução de suas possíveis falhas, não raro no sistema de comunicação podem ocorrer problemas que levem à indisponibilidade tais unidades. Em projetos de sistemas de medição, por vezes atribui-se como requisito de robustez a capacidade de se proceder à EE, mesmo na indisponibilidade de uma unidade de medição. Isto implica em que o sistema permaneça observável, quando um evento desta natureza ocorra.

Assim, define-se como unidade de medição crítica (e.g., C_{UTR} , C_{DEI} , C_{UMF}) aquela cuja indisponibilidade torna o sistema inobservável. Por exemplo, uma UTR crítica (C_{UTR}) será aquela que contiver uma k -tupla crítica, i.e., se a ela pertencer uma C_{med} , ou C_{dupla} , ou C_{tripla} , e assim por diante.

De modo a sintetizar o que foi exposto, apresentam-se a seguir regras para a construção de um algoritmo computacional destinado à classificação de criticalidades: individual de medidas (C_{meds} , elementos de C_{conj} s, redundantes), de grupos de medidas (k -tuplas) e de unidades de medição (UTRs). Tal classificação levará ao cálculo dos indicadores de observabilidade propostos.

Algoritmo para Criticalidades:

- **Início** (algoritmo da Seção 3.5.1)
Procede-se à classificação das medidas como C_{meds} ou não;
Identificam-se os C_{conj} s.
- **Regra 1**
SE a UTR contiver:
uma ou mais C_{meds} ; e/ou
duas ou mais medidas pertencentes a um mesmo C_{conj} ;
ENTÃO será C_{UTR} .
- **Regra 2**
SE a UTR
pertencer a barra adjacente a uma barra terminal, esta sem UTR,
ENTÃO será C_{UTR} , independentemente do nº de medidas disponíveis.
- **Regra 3**
UTR com apenas uma medida disponível (não crítica) não será C_{UTR} ; tal medida poderá pertencer ou não a um C_{conj} (associado ou não a uma C_{UTR}).
- **Regra 4**
UTR com duas medidas disponíveis (não críticas e não pertencentes ao mesmo C_{conj}) não será C_{UTR} ; uma destas medidas poderá pertencer a um C_{conj} ou cada uma delas a C_{conj} s distintos ou ambas serem redundantes.
- **Regra 5**
UTR com três ou mais medidas será C_{UTR} , se entre suas medidas formar-se uma k -tupla crítica ($C_{k-tupla}$) de cardinalidade 3 ou maior. Caso contrário, não será C_{UTR} .

A presença de UMFs irá alterar a condição de criticalidade do sistema em estudo, devendo mais adiante ser considerada, à semelhança da análise feita para UTRs.

Passando-se agora a comentar sobre a utilização da medição sincronizada de fasores (tensão e corrente) na EE, constata-se que tal uso vem se reafirmando através de pesquisas que revelam uma série de benefícios de se conjugar medidas tradicionais, provenientes de UTRs, com medidas fasoriais, colhidas por UMFs [Mora09], [Guim11].

Atualmente, o elevado custo de instalação de UMFs limita em termos práticos a ampla utilização tais unidades [Emam10], [Yang11a,b]. Assim sendo, serão considerados os casos de sistemas observáveis através apenas de medidas convencionais, para então se verificar a influência do uso adicional de medidas de sincrofasores nas criticalidades identificadas. No Capítulo 5, diversos casos de estudos de simulação com a participação de medidas de sincrofasores na avaliação de criticalidades serão apresentados e discutidos.

A título de ilustração, de forma a apontar as modificações que surgem nas condições de redundância crítica com a agregação de medidas de ângulos de fase oriundas de UMFs [Expo11], seguem comentários sobre a inclusão de uma, duas ou mais medidas desta natureza [Mora09].

Quando apenas uma medida de ângulo de fase de tensão nodal passa a integrar o processo de EE, tal medida torna-se C_{med} e, por não estar correlacionada às demais, não produz nenhuma alteração nos C_{conj} s existentes.

Caso duas medidas de ângulo sejam introduzidas, ambas formarão um C_{conj} e poderão causar alterações nas condições de criticalidade existentes (favorecendo o processo de EE), muitas vezes de difícil antecipação, como será ilustrado adiante no Capítulo 5, através de simulações realizadas no sistema-teste adotado.

Por fim, se três ou mais medidas de ângulo de UMFs forem agregadas, a presença de C_{med} s e C_{conj} s será reduzida e, a depender da condição de criticalidade pré-existente, poderá ser eliminada.

3.8. Ramos Críticos

A natureza estrutural do problema de análise de observabilidade é trazida pela disposição dos medidores em determinada configuração da rede elétrica. Portanto, a exemplo da análise de criticalidades em medidas, ramos da rede também podem ser submetidos a tal análise: a indisponibilidade de um ou mais ramos da rede pode causar

inobservabilidade (mesmo que não haja medidas associadas a tais ramos). Além disto, erros de configuração da rede podem não ser detectados/ identificados através dos resíduos das medidas, caso ocorram em determinados ramos, como mostram os trabalhos pioneiros de [Clem88] e [Wu89], bem como recentemente o estudo desenvolvido em [Chen08].

As seguintes definições dizem respeito a criticalidade de ramos em uma rede observável [Clem88]:

- ramo crítico (C_{ramo}) – aquele que, caso se torne indisponível, acarreta inobservabilidade;
- par crítico de ramos ($C_{\text{dupla-ramos}}$) – dupla que, se ambos os seus ramos se tornarem simultaneamente indisponíveis, causa inobservabilidade;
- k -tupla crítica de ramos ($C_{k\text{-tupla-ramos}}$) – conjunto de k ramos tal que, se removidos todos estes k ramos, a rede se torna inobservável; se $(k-1)$ ramos forem removidos, a rede permanece observável.
- ramo irrelevante – aquele no qual não incide nenhuma medida.

Assim, um erro de configuração em um ramo irrelevante ou C_{ramo} ou naquele que incida apenas em C_{meds} não será detectável; se tal erro ocorrer em qualquer um dos ramos de uma $C_{\text{dupla-ramos}}$ não será identificável [Clem88].

Além da metodologia apresentada nas referências aqui citadas, usando-se a identificação de C_{meds} e C_{conj} descrita na Seção 3.5.1, pode-se também apontar a criticalidade de ramos da rede. Considerando, por exemplo, medidas de fluxo de potência: se forem C_{meds} , então os ramos associados a tais medidas serão C_{ramos} ; se duas destas medidas integrarem um mesmo C_{conj} , então os respectivos ramos formarão uma $C_{\text{dupla-ramos}}$. Outras regras poderão ser formuladas para completar a lista de ramos críticos e duplas críticas de ramos da rede.

3.9 Comentários Finais

Ao se adotar um processo de EE, espera-se alcançar uma capacidade de detectar, identificar e eliminar dados espúrios, em especial, erros grosseiros de medição. Processos considerados como estatisticamente robustos são aqueles em que a estimativa do estado produzida não se contamina pela presença de EGs em um certo número limitado de medidas redundantes. Não obstante, há circunstâncias (numéricas e estruturais) em que determinadas medidas exercem forte (indevida) influência na EE, sendo conhecidas como pontos de alavancamento [Mili96].

Na EE em sistemas de potência, entre outros fatores, a ocorrência de pontos de alavancamento está relacionada à baixa redundância do sistema de medição. Resíduos de medidas que correspondam a tais pontos comportam-se de forma semelhante àqueles de Cmeds: sempre apresentam baixas magnitudes/covariâncias, independentemente de estarem ou não associados a medidas portadoras de EGs. Assim sendo, Cmeds e pontos de alavancamento podem ser confundidos entre si. A diferença está em que a eliminação de um ponto de alavancamento não causa inobservabilidade. Portanto, deve-se buscar uma identificação eficaz de Cmeds, para que os indicadores a serem propostos retratem de fato em que condições de observabilidade determinado sistema se encontra. Nesta Tese, não será abordada a identificação de medidas que representem pontos de alavancamento.

De forma diversa dos métodos numéricos encontrados na literatura para a identificação de criticalidades (baseados no processamento das matrizes Jacobiano, Ganho e Gram), aqui foi proposta a utilização de um algoritmo que explora as propriedades numéricas dos resíduos (normalizados) da estimação. O esforço computacional associado a tal algoritmo está na obtenção da matriz E de covariância dos resíduos usada na normalização destes e na determinação de coeficientes de correlação. Assim sendo, deve-se buscar a computação eficiente dos elementos da matriz E necessários à identificação de criticalidades, explorando a esparsidade da matriz Jacobiano H , simetria de E , entre outros aspectos. No Capítulo 5 e Apêndice B da referência [Abur04], encontram-se comentários a este respeito.

Com base na análise de condições de observabilidade realizada no presente capítulo, indicadores numéricos de risco de inobservabilidade, entre outros, serão a seguir propostos.

Indicadores de Observabilidade

4.1. Introdução

Na EE em sistemas de potência, a análise de observabilidade clássica ocupa-se da verificação da condição mínima (em termos da capacidade de cobertura das medidas colhidas em determinada varredura) para a obtenção de uma estimativa para o estado completo da rede. Usualmente, nenhuma informação sobre os riscos da perda iminente de observabilidade e da incapacidade de processar EGs, decorrentes da presença de dados críticos, é fornecida. Tais riscos são dependentes da redundância de medidas, cujos atributos são não apenas a quantidade, mas também tipo e localização das medidas.

Além da detecção da condição binária (sim ou não), a análise de observabilidade é capaz de indicar, no caso de inobservabilidade, partes da rede (ilhas) que se mantêm observáveis e que pseudomedidas restauram minimamente a condição perdida. Neste caso, as pseudomedidas introduzidas são críticas e muito embora esta ação restaure a observabilidade da rede sem contaminar os estados observáveis, do ponto de vista da filtragem de erros, não é satisfatória. Persistindo a condição de fraca observabilidade, o processo de EE será ineficaz para validar essas pseudomedidas críticas. Uma situação semelhante pode ocorrer, mesmo antes da rede se tornar não observável, quando houver Cmeds no conjunto de medidas. Assim, tal análise é por natureza corretiva.

Para o caso da rede observável, quando então o processo de EE seguirá adiante normalmente, ações preventivas não costumam ser sugeridas. Por exemplo, considere situações de redundância, comparativamente um pouco melhores do que aquelas em que não ocorram Cmeds, que levem à formação de Cconjs. Esta condição de observabilidade crítica, trazida por grupos de medidas, poderá por em risco o processo de EE, já que as rotinas de análise de resíduos não serão capazes de identificar EGs em medidas pertencentes a Cconjs.

Do exposto, depreende-se que a análise de criticalidade está na sua essência relacionada à observabilidade, devendo ser realizada logo no início do processo de EE. Assim sendo, quantificar a condição de observabilidade através de indicadores torna-se útil, sob os seguintes aspectos:

- permite uma avaliação mais precisa do impacto da configuração da rede e localização de medidores na observabilidade do sistema;
- permite uma avaliação de risco (segurança), até então não alcançada, em situações trazidas por criticalidades, normalmente vistas como um problema qualitativo;
- facilita comparações da situação corrente de diferentes sistemas de medição, em termos de sua capacidade de cobertura;
- auxilia no planejamento/reforço de sistemas de medição, de modo a que níveis adequados de redundância sejam atendidos.

Indicadores de observabilidade serão propostos nesta Tese, levando-se em conta o desenvolvimento anteriormente alcançado pela presente pesquisa, retratado em [Tafu08], [Cout09]. A formulação destes indicadores representam uma nova visão sobre a integração das análises de observabilidade e criticalidade, considerando sistemas de medição que forneçam medidas por meio de UTRs e UMFs, constituindo-se em original contribuição da Tese.

Condições que caracterizem a exposição do sistema à inobservabilidade, associadas a diferentes níveis de criticalidade de medidas, tratadas separadamente ou em grupos, serão consideradas. Pela falta de dados estatísticos que indiquem as probabilidades de ocorrência de eventos que exponham o sistema ao risco de inobservabilidade, todos estes serão considerados como equiprováveis.

Nas seções que se seguem, indicadores de observabilidade serão definidos, abordando-se inicialmente sistemas de medição que forneçam apenas medidas oriundas de UTRs, para sem seguida tratar-se da participação de UMFs.

4.2. Perda Iminente de Observabilidade

Quando Cmeds surgem entre as medidas que serão tratadas por um processo de EE, a perda da observabilidade da rede elétrica torna-se iminente: a indisponibilidade de qualquer medida classificada como Cmed resultará em inobservabilidade. Portanto, o risco que se corre em condições como esta vincula-se à quantidade de Cmeds.

Considerando que uma medida qualquer (entre as m medidas disponíveis) seja selecionada aleatoriamente (cada medida apresenta a mesma chance de ser selecionada) para ser tomada como indisponível (evento E_1) e que o número de medidas críticas seja N_{Cmeds} , então encontra-se a seguinte probabilidade de inobservabilidade condicionada a E_1 :

$$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid E_1) = \mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} \times 100\% \quad (4.1)$$

A probabilidade \mathcal{P}_1 está associada à robustez do sistema de medição para a condição de observabilidade “ $m-1$ ”, ou seja, aquela em que, ainda que uma medida qualquer (de um total de m medidas) se torne indisponível, o sistema se mantém observável.

Ainda nesta condição de robustez “ $m-1$ ”, pode-se avaliar a tendência de crescimento de \mathcal{P}_1 , considerando que, no caso de ocorrer a indisponibilidade de uma medida não crítica, a chance de surgirem Cmeds adicionais entre as medidas existentes está relacionada ao número total de medidas contidas em Cconjs, aqui representado por M_{Cconjs} . Assim sendo, obtém-se a seguinte probabilidade:

$$\mathcal{P}(\text{aumento de } N_{Cmeds} \mid E_1) = \mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} \times 100\% \quad (4.2)$$

Em outras palavras, \mathcal{P}_2 representa a probabilidade de ocorrência de Cmeds em um sistema de medição “ $m-1$ ” robusto, i.e., a probabilidade de exposição à inobservabilidade (avaliada em \mathcal{P}_1) se agravar. Os valores de tal indicador irão variar de 0% (situação em que nenhuma Cmed e nenhum Cconj estão presentes) a 100% (quando é formado um único, amplo Cconj contendo todas as medidas disponíveis).

4.3. Graus de Observabilidade

Definindo-se observabilidade como aptidão para estimar o estado do sistema inteiramente, torna-se natural avaliar esta capacidade, estabelecendo-se graus ou níveis de observabilidade, expressos por indicadores numéricos. Na seção anterior, caracterizou-se o grau ou nível de robustez “ $m-1$ ” de sistemas de medição. A seguir, analisa-se o nível “ $m-2$ ” e generaliza-se para “ $m-k$ ”.

A indisponibilidade de medidas pode ocorrer de forma individual, como tratado na Seção 4.2, ou em grupos, conhecidos muitas vezes por ênuplas, n-uplas ou n-tuplas. Agrupamentos de baixa cardinalidade, mais corriqueiros, são as duplas (pares) e triplas (trincas, trios, tríades), mas também podem-se formar quádruplas, quántuplas, sêxtuplas, etc. Genericamente, na EE em sistemas de potência, estes agrupamentos de k medidas têm sido referidos como k -tuplas.

Um sistema de medição “ $m-k$ ” robusto corresponde àquele que suporta a indisponibilidade de k medidas, de um total de m , sem se tornar inobservável. Assim, pode-se generalizar o conceito de medida crítica (Cmed), definindo-se uma k -tupla crítica ($C_{k\text{-tupla}}$), como sendo o grupo de k medidas que, caso tal grupo se torne indisponível (*in totum*), acarrete inobservabilidade.

Para k -tuplas de cardinalidade dois, considere que a indisponibilidade simultânea de duas medidas quaisquer (entre N_{duplas} , i.e., número de duplas que se podem formar aleatoriamente no conjunto de m medidas disponíveis) seja um evento \mathcal{E}_2 e que o número de duplas críticas seja $N_{C_{\text{duplas}}}$. Então, encontra-se a seguinte probabilidade condicionada a \mathcal{E}_2 :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid \mathcal{E}_2) &= \mathcal{P}_s = \frac{N_{C_{\text{duplas}}} + N'_{\text{duplas}}}{N_{\text{duplas}}} = \\ &= \frac{2N_{C_{\text{duplas}}} + N_{C_{\text{meds}}} (2m - N_{C_{\text{meds}}} - 1)}{m(m-1)} \times 100\% \end{aligned} \quad (4.3)$$

sendo:

$$N_{\text{duplas}} = \binom{m}{2} = \frac{m!}{(m-2)!2!} = \frac{m \times (m-1)}{2}$$

N'_{duplas} – número de todas as duplas formadas com a participação de C_{meds} , calculado como segue:

$$\begin{aligned} N'_{\text{duplas}} &= N_{C_{\text{meds}}} \times (m-1) - \binom{N_{C_{\text{meds}}}}{2} = N_{C_{\text{meds}}} \times (m-1) - \frac{N_{C_{\text{meds}}}!}{(N_{C_{\text{meds}}} - 2)!2!} = \\ &= N_{C_{\text{meds}}} \times (m-1) - \frac{N_{C_{\text{meds}}} \times (N_{C_{\text{meds}}} - 1)}{2} = \frac{N_{C_{\text{meds}}} \times (2m - N_{C_{\text{meds}}} - 1)}{2} \end{aligned}$$

As duplas críticas de medidas (C_{duplas}) são contabilizadas a partir dos C_{conjs} existentes. Assim, quanto mais elementos estiverem presentes em um determinado C_{conj} , mais C_{duplas} serão formadas, portanto, maior a probabilidade \mathcal{P}_s de inobservabilidade. O mesmo ocorrerá com as duplas formadas com a participação de C_{meds} , ou seja, tanto maior $N_{C_{\text{meds}}}$, maior \mathcal{P}_s .

No diz respeito à formação de Cconjs, muitos conjuntos compostos por poucas medidas torna-se preferível do que a situação oposta, ou seja, poucos conjuntos com muitas medidas cada um.

Um indicador que revele o grau de concentração de medidas em Cconjs pode ser proposto como:

$$\gamma = \frac{M_{\text{Cconjs}}}{m \times N_{\text{Cconjs}}} \times 100\% \quad (4.4)$$

sendo N_{Cconjs} o número de Cconjs.

Cconjs que reúnam muitas medidas são de difícil desmanche, como, por exemplo, pela introdução de pseudomedidas. Além disso, o efeito de espalhamento de erros, causado pela ocorrência de EGs entre os elementos de um Cconj concentrado, apresenta-se demasiadamente intenso. A pior situação possível (plena concentração) caracteriza-se pela existência de apenas um Cconj, ao qual todas as medidas disponíveis pertencem. Assim, o indicador γ foi normalizado, de modo a ser obtido em relação ao seu valor máximo (ou seja, o número m de medidas). O limite inferior de γ normalizado ($\frac{2}{m} \times 100\%$) está relacionado aos casos em que são formados um ou mais Cconjs, compostos por apenas duas medições.

Para sistemas de medição “ $m-2$ ” robustos, as probabilidades \mathcal{P}_1 , \mathcal{P}_2 e \mathcal{P}_3 são nulas, uma vez que inexitem Cmeds e Cconjs, não sendo portanto necessário computar γ .

Agora de forma mais geral, considerando que a indisponibilidade simultânea de k medidas quaisquer (entre $N_{k\text{-tuplas}}$, i.e., número de k -tuplas que se podem formar aleatoriamente no conjunto de m medidas disponíveis) seja um evento \bar{E}_3 e que o número de k -tuplas críticas seja $N_{Ck\text{-tuplas}}$, então encontra-se a seguinte probabilidade condicionada à ocorrência de E_3 :

$$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid \bar{E}_3) = \mathcal{P}_4 = \frac{N_{Ck\text{-tuplas}} + N'_{k\text{-tuplas}}}{N_{k\text{-tuplas}}} \times 100\% \quad (4.5)$$

sendo:

$$N_{k\text{-tuplas}} = \binom{m}{k} = \frac{m!}{(m-k)!k!}$$

$N'_{k-tuplas}$ – quantidade de k -tuplas formadas com a participação de Cmeds, Cduplas, Ctriplas, até C($k-1$)-tuplas.

As k -tuplas críticas ($C_{k-tuplas}$) de medidas podem ser determinadas através de métodos numéricos ou topológicos, como, por exemplo, aqueles apresentados em [Lond07], [Cast08] e [Sou12], sendo mais frequentemente estudadas aquelas de baixa cardinalidade (até tríades de medidas).

Uma outra forma de se caracterizar lotes de medidas está em se fazer a associação destes lotes aos dispositivos de medição (e.g., UTRs, IEDs, UMFs) usados em cada barra da rede para obtê-los. Assim, para que estejam disponíveis medidas (lote) em determinada barra uma unidade de medição, UTR e/ou uma UMF estará operando. Desta forma, do ponto de vista da observabilidade, pode-se avaliar também o impacto da indisponibilidade de UTRs e UMFs. Para simplificar tal avaliação, nesta seção serão consideradas apenas UTRs.

Estendendo-se o conceito de criticalidade a UTRs, define-se como UTR crítica (C_{UTR}) aquela que contiver uma k -tupla crítica. Portanto, uma UTR será crítica se a ela pertencer uma C_{med} , ou C_{dupla} , ou C_{tripla} , etc.

Analogamente ao que se estabeleceu em (4.5), pode-se considerar que a indisponibilidade de uma UTR qualquer (selecionada aleatoriamente entre N_{UTRs} disponíveis) seja um evento E_4 e que o número de UTRs críticas seja N_{CUTRs} . Então, encontra-se a seguinte probabilidade condicionada à ocorrência de E_4 :

$$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid E_4) = \mathcal{P}_4 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} \times 100\% \quad (4.6)$$

Por fim, considerando indisponibilidade de ramos da rede, pode ser definido um indicador que retrate a probabilidade de inobservabilidade pela presença de ramos críticos (C_{ramos}). Assim, considere que a indisponibilidade de um ramo qualquer (selecionado aleatoriamente entre N_{ramos} em serviço) seja um evento E_5 e que o número de ramos críticos seja N_{Cramos} . Assim, encontra-se então a seguinte probabilidade condicionada a E_5 :

$$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid E_5) = \mathcal{P}_5 = \frac{N_{Cramos}}{N_{ramos}} \times 100\% \quad (4.7)$$

O mesmo raciocínio pode ser estendido para duplas críticas de ramos. Considere que a indisponibilidade simultânea de dois ramos quaisquer (selecionados aleatoriamente

entre N_{ramos} em serviço) seja um evento \mathcal{E}_6 e que o número de duplas críticas de ramos seja $N_{Cduplas-ramos}$. Desta forma, encontra-se a seguinte probabilidade condicionada a \mathcal{E}_6 :

$$\begin{aligned} \mathcal{P}(\text{inobserv.} \mid \mathcal{E}_6) &= \mathcal{P}_7 = \frac{N_{Cduplas-ramos} + N'_{duplas-ramos}}{N_{duplas}} \times 100\% \\ &= \frac{2N_{Cduplas-ramos} + N_{Cramos}(2N_{ramos} - N_{Cramos} - 1)}{N_{ramos}(N_{ramos} - 1)} \times 100\% \end{aligned} \quad (4.8)$$

sendo:

$$N_{duplas-ramos} = \binom{N_{ramos}}{2} = \frac{N_{ramos}!}{(N_{ramos} - 2)!2!} = \frac{N_{ramos} \times (N_{ramos} - 1)}{2}$$

$N'_{duplas-ramos}$ – número de todas as duplas formadas com a participação de C_{ramos} , calculado como segue:

$$\begin{aligned} N'_{duplas-ramos} &= N_{Cramos} \times (N_{ramos} - 1) - \binom{N_{Cramos}}{2} = N_{Cramos} \times (N_{ramos} - 1) - \frac{N_{Cramos}!}{(N_{Cramos} - 2)!2!} = \\ &= N_{Cramos} \times (N_{ramos} - 1) - \frac{N_{Cramos} \times (N_{Cramos} - 1)}{2} = \frac{N_{Cramos} \times (2N_{ramos} - N_{Cramos} - 1)}{2} \end{aligned}$$

4.4. Redundância Global

Na EE, entende-se por redundância (global) o excedente de medidas disponíveis no sistema com relação a um número mínimo necessário para estimar todas as variáveis de estado. A redundância de medidas é avaliada levando-se em conta não apenas a quantidade, mas também o tipo e posicionamento da medição na rede elétrica, visando atender requisitos do processo de EE estabelecido.

Embora a redundância global não seja um bom indicador para refletir gradações da capacidade de observação do estado por meio de um sistema de medição, esta é amplamente utilizada para se comparar superficialmente planos de medição.

Nesta Tese, será proposta uma forma normalizada de expressar (em termos percentuais) a redundância global de um sistema de medição ($\eta\%$). Para tal, considere que a redundância máxima do sistema (composto apenas por medidas oriundas de UTRs) seja η_{max} e que η_g seja a redundância global como é classicamente conhecida (a relação entre o

número de medidas disponíveis m e o número de variáveis de estado n), levando ao seguinte indicador:

$$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{\max} - 1} \times 100\% \quad (4.9)$$

$$\eta_g = \frac{m}{n} \quad (4.10)$$

$$\eta_{\max} = \frac{N_b + 2N_\ell}{N_b - 1} = \frac{m_{\max}}{n} \quad (4.11)$$

sendo:

N_b – número de barras da rede; N_ℓ – número de ramos da rede; n – número de variáveis de estado; m_{\max} – número máximo de medidas (oriundas de UTRs) que se podem obter em uma rede.

Substituindo-se (4.10) e (4.11) em (4.9), obtém-se:

$$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{\max} - 1} = \frac{m - n}{m_{\max} - n} \times 100\% \quad (4.12)$$

Construído para redes observáveis, este indicador avalia a redundância como o excedente de medidas em relação ao número de variáveis de estado a estimar ($m-n$). Assim, para um sistema de medição que apresente η_g de valor unitário (i.e, o número de medidas iguala-se ao de variáveis de estado), não será considerado haver redundância de medidas, sendo portanto nulo o valor de $\eta_{\%}$.

Caso seja considerada a presença de UMFs no sistema de medição, não se propõe que a redundância máxima estabelecida em (4.11) seja alterada. Isto porque a presença de tais unidades será adotada de forma suplementar, em sistemas que já sejam observáveis.

Por fim, lembra-se que os valores a serem obtidos para o indicador estabelecido em (4.12) referem-se à parte angular da EE (modelo $P - \theta$), habitualmente tratada na análise de observabilidade.

4.5 Comentários

As informações sobre níveis críticos de redundância, representadas pelos indicadores propostos neste capítulo, desempenham um papel importante para a integração das análises de observabilidade e criticalidade. Por exemplo, tais informações podem ser utilizadas para se decidir sobre quando se deve adicionar pseudomedidas para reduzir o risco iminente da perda de observabilidade e/ou evitar a vulnerabilidade de rotinas para validação de dados.

Diversas condições de criticalidade foram tratadas, fundamentalmente, aquelas relacionadas à ocorrência de C_{meds} e C_{conj} . Entretanto, outras criticalidades de medidas poderão ser identificadas, se forem encontradas justificativas para tal. A título de ilustração, pode ser citado o interesse em se estudar meios de se proteger as redes elétricas inteligentes de ataques maliciosos de intrusos [Kosu11], que deliberadamente tornam indisponíveis uma série dados de medição, infligindo EGs em k -tuplas críticas de cardinalidade superiores a três [Sou12].

A proposição de indicadores de observabilidade não se esgota com os que aqui foram definidos. Outros podem ser enunciados, entendendo-se que devam refletir, em termos numéricos, a condição, nível ou grau de observabilidade da rede elétrica, trazidos ao processo de EE por um sistema de medição para o qual se deseja avaliar a capacidade de suportar indisponibilidades de medidas, mantendo-se observabilidade.

A influência da incorporação de medidas obtidas por (UMFs) na análise de observabilidade-criticalidade, capturada pelos indicadores propostos, se fará sentir no aumento da redundância de medidas, com reflexos na diminuição da criticalidade expressa por C_{meds} , C_{conj} , C_{UTRs} , etc.

Na presente pesquisa foi desenvolvido um aplicativo computacional que permite a identificação de criticalidades, a saber: C_{meds} , C_{conj} , C_{UTRs} . Os resultados ilustrativos apresentados no próximo capítulo foram obtidos com o referido aplicativo.

4.6 Resumo

Neste capítulo foram propostos vários indicadores relativos à observabilidade de uma rede elétrica de potência, submetida ao processo de EE. A seguir, para facilitar a consulta, apresenta-se um resumo que reúne tais indicadores nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1 – Indicadores de Observabilidade

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor
E_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} \times 100\%$
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} E_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} \times 100\%$
E_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m - 1)} \times 100\%$
E_3	k medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_3)$	$\mathcal{P}_4 = \frac{N_{Ck-tuplas} + N'_{k-tuplas}}{N_{k-tuplas}} \times 100\%$
E_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_4)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} \times 100\%$
E_5	um ramo	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_5)$	$\mathcal{P}_6 = \frac{N_{Cramos}}{N_{ramos}} \times 100\%$
E_6	dois ramos	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_6)$	$\mathcal{P}_7 = \frac{2N_{Cduplas-ramos} + N_{Cramos}(2N_{ramos} - N_{Cramos} - 1)}{N_{ramos}(N_{ramos} - 1)} \times 100\%$

Tabela 4.2 – Outros Indicadores de Observabilidade

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} \times 100\%$
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{m - n}{m_{max} - n} \times 100\%$ $\eta_g = \frac{m}{n}$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{m_{max}}{n}$

5.1. Introdução

Este capítulo apresenta testes e respectivos resultados numéricos obtidos com o sistema IEEE-14 barras, frequentemente adotado em estudos que envolvem a EE em sistemas de potência [Gou00], [Cast08]. Tais testes objetivam ilustrar o cálculo de indicadores de observabilidade propostos nesta Tese, revelando sua utilidade na comparação de diversas condições de indisponibilidade de medidas em sistemas observáveis.

Um aplicativo computacional, descrito no Apêndice B, capaz de avaliar as condições de observabilidade de um sistema de medição, foi desenvolvido para atender aos propósitos desta Tese. O referido aplicativo, aqui denominado **ObservApp**, obtém os limites de criticalidade usuais de medidas, quando consideradas individualmente (C_{meds}), em conjunto (C_{conj}) ou pertencentes a unidades de medição (C_{UTRs}). Através da interface gráfica deste aplicativo, encontram-se facilidades para se executar as tarefas de: representar a configuração inicial da rede; escolher os medidores disponíveis no sistema de medição em análise; reconfigurar a rede; alterar o sistema de medição; exibir os resultados da identificação de criticalidades nas simulações realizadas.

5.2. Sistema IEEE-14 barras

A seguir, apresentam-se casos em que sistemas de medição com diversos graus de observabilidade foram construídos na rede do sistema IEEE-14 barras e 20 ramos.

Inicia-se com um caso correspondente aos limites mais severos de criticalidade, i.e., todas as medidas disponíveis integram um único C_{conj} . Em seguida, modifica-se o caso, através da indisponibilidade de apenas uma medida, fazendo as remanescentes C_{meds} .

Caso 1: C_{conj} hiperconcentrado

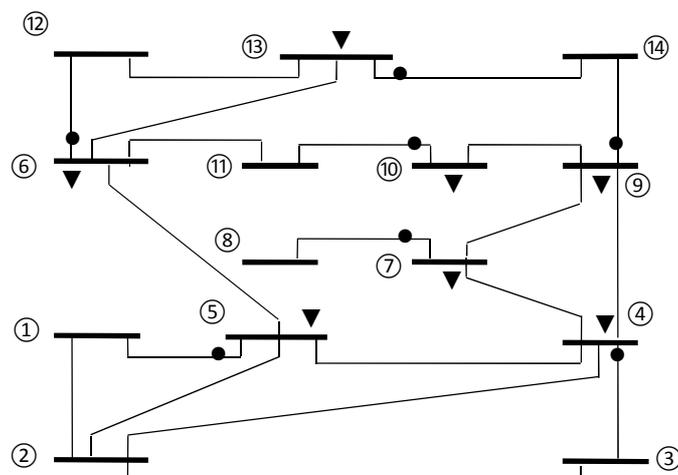
Considere um sistema de medição de baixíssima redundância composto por 14 medidas, sendo 7 fluxos (P_{4-3} , P_{5-1} , P_{6-12} , P_{7-8} , P_{9-14} , P_{10-11} , P_{13-14}) e 7 de injeções de potência (P_4 , P_5 , P_6 , P_7 , P_9 , P_{10} , P_{13}), contidas em 7 UTRs, como ilustra a Figura 5.1.

A análise de observabilidade numérica efetuada com o aplicativo **ObservApp**, conforme mostra a Tabela 5.1, indica que não há Cmeds, um único Cconj foi identificado (formado pelas 14 medidas disponíveis em certo momento) e todas as 7 UTRs são críticas. Esta tabela, como outras semelhantes apresentadas mais adiante neste capítulo, foi construída fazendo-se a associação das medidas às respectivas unidades de medição (UTRs).

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os indicadores de observabilidade calculados para o presente caso. Assim, verifica-se que o sistema suporta a indisponibilidade de uma medida, dentre as 14 disponíveis ($\mathcal{P}_1=0$), já que não há Cmeds. Entretanto, apesar de ser $(m-1)$ robusto, a observabilidade da rede encontra-se em risco total: o crescimento de \mathcal{P}_1 será para $\mathcal{P}_2=100\%$, caso haja a indisponibilidade de apenas uma medida. Além disto, a probabilidade de inobservabilidade, caso ocorra a indisponibilidade de qualquer par de medidas ou uma UTR, situa-se também em 100%, observando-se as probabilidades \mathcal{P}_3 e \mathcal{P}_s .

O indicador γ complementa a análise, apontando o nível de concentração de medidas em Cconjs, que no presente caso encontra-se no seu valor máximo (100%). A redundância global normalizada, no valor tão baixo como o de 2,5%, indica uma grande proximidade do sistema à inobservabilidade.

Por fim, vale ressaltar que um teste adicional pode ser feito a partir do *Caso 1*, modificando-o com a exclusão de uma medida qualquer do conjunto inicialmente descrito. Assim, o *Caso 1 modificado* corresponde àquele em que todas as medidas são Cmeds e, conseqüentemente, não se forma nenhum Cconj, bem como todas as UTRs permanecem críticas. Os indicadores calculados anteriormente se modificam, conforme constam nas Tabelas 5.4 e 5.5.



● medida de fluxo de potência; ▼ medida de injeção de potência

Figura 5.1. Sistema IEEE-14 barras: *Caso 1*

Tabela 5.1. Avaliação de Criticalidades – *Caso 1*

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①										
②										
③										
④	P ₄₋₃ P ₄			X					●	
⑤	P ₅₋₁ P ₅			X					●	
⑥	P ₆₋₁₂ P ₆			X					●	
⑦	P ₇₋₈ P ₇			X					●	
⑧										
⑨	P ₉₋₁₄ P ₉			X					●	
⑩	P ₁₀₋₁₁ P ₁₀			X					●	
⑪										
⑫										
⑬	P ₁₃₋₁₄ P ₁₃			X					●	
⑭										

Tabela 5.2. Indicadores de Observabilidade – Caso 1

Evento	Indisponi-bilidade	Probabilidade	Valor
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{14}$
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{14}{14}$
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{14 \times 13 + 0 \times (2 \times 14 - 0 - 1)}{14 \times 13}$
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{7}{7}$

Tabela 5.3. Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 1

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{14}{14 \times 1}$
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,08 - 1}{4,15 - 1} = 0,025$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{14}{13} = 1,08$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$

Tabela 5.4. Indicadores de Observabilidade – *Caso 1 modificado*

Evento	Indisponi- bilidade	Probabilidade	Valor
E_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{13}{13}$ 100%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} E_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{0}{13}$ 0%
E_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{2 \times 0 + 13 \times (2 \times 13 - 13 - 1)}{13 \times 12} = 100\%$
E_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_4)$	$\mathcal{P}_4 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{7}{7}$ 100%

Tabela 5.5. Outros Indicadores de Observabilidade – *Caso 1 modificado*

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}}$ ----
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1 - 1}{4,15 - 1}$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{13}{13} = 1$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$

Caso 2: Vários Cconjs

Neste caso, o sistema de medição compõe-se de um total de 20 medidas, assim distribuídas em 11 unidades de medição convencionais (UTRs) e 1 unidade fasorial (UMF): 15 de fluxos de potência (P_{1-2} , P_{1-5} , P_{2-3} , P_{4-7} , P_{4-9} , P_{5-2} , P_{6-11} , P_{6-12} , P_{6-13} , P_{7-8} , P_{8-7} , P_{9-10} , P_{9-14} , P_{12-13}); 5 injeções de potência (P_3 , P_6 , P_9 , P_{10} , P_{12}); 1 medida de ângulo (θ_{13}). A Figura 5.2 ilustra tal sistema de medição.

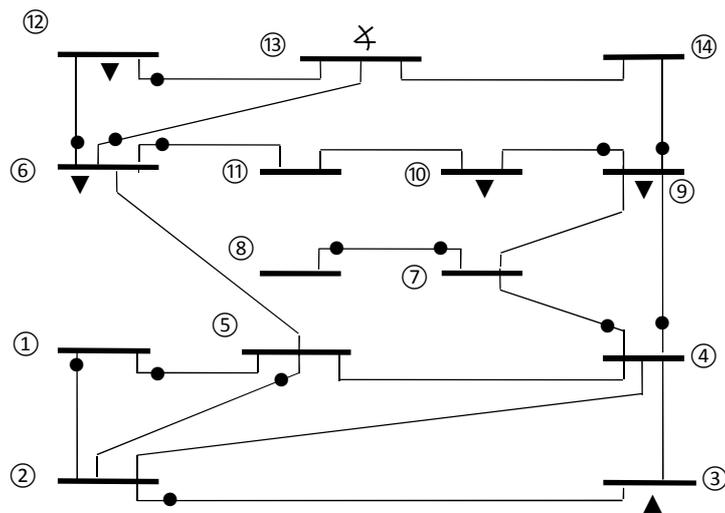
A medida de ângulo foi incluída apenas como preparação para as análises que serão feitas mais adiante com a participação de medidas de UMFs. Desta forma, esta não será considerada no presente caso entre as criticalidades apontadas pelo programa **ObservApp** (θ_{13} é Cmed), sendo tratada apenas como necessária à observabilidade do sistema.

ObservApp apresenta seus resultados através de uma interface gráfica, como pode ser visto na Figura 5.3, que contém a imagem da tela em que se obtém tais resultados. Nela são exibidas em cores distintas as medidas que são: Cmeds; integrantes de Cconjs; redundantes (nem Cmeds, nem membros de Cconjs). As unidades de medição críticas (C_{UTRs}) são indicadas por cor diferenciada da barra rede onde estão instaladas tais unidades.

Na Tabela 5.6, encontram-se os resultados da análise de observabilidade efetuada com o aplicativo **ObservApp**, onde se vê para o *Caso 2* que: não há Cmeds ($N_{Cmeds} = 0$), 4 Cconjs foram identificados ($N_{Cconjs} = 4$), 7 medidas são redundantes e 3 UTRs são críticas ($N_{CUTRs} = 3$). O total de medidas em Cconjs foi de $M_{Cconjs} = 12$ e o número de duplas críticas de medidas ($N_{Cduplas}$) obtém-se a partir dos Cconjs identificados, combinando-se em cada um destes seus elementos, tomados dois-a-dois:

$$N_{Cduplas} = \binom{2}{2} + \binom{5}{2} + \binom{3}{2} + \binom{2}{2} = 15$$

Tomando-se os valores contabilizados anteriormente, nas Tabelas 5.7 e 5.8, encontram-se os indicadores de observabilidade para esta nova disposição de medidores na rede, referida como *Caso 2*. Observa-se que o sistema de medição, ainda que ($m-1$) robusto, i.e., suporta a perda de uma medida sem se tornar inobservável, tende a não permanecer nesta condição, com uma probabilidade de cerca de 63%. Não sendo ($m-2$) robusto, apresenta quase 40% de chance de se tornar inobservável, na ocorrência da indisponibilidade de 2 medidas quaisquer. E, se acaso ficar indisponível uma UTR, tem 27% de chance de inobservabilidade.



● medida de fluxo de potência; ▲ medida de injeção de potência

⌘ medida de ângulo de tensão

Figura 5.2. Sistema IEEE-14 barras: *Caso 2*

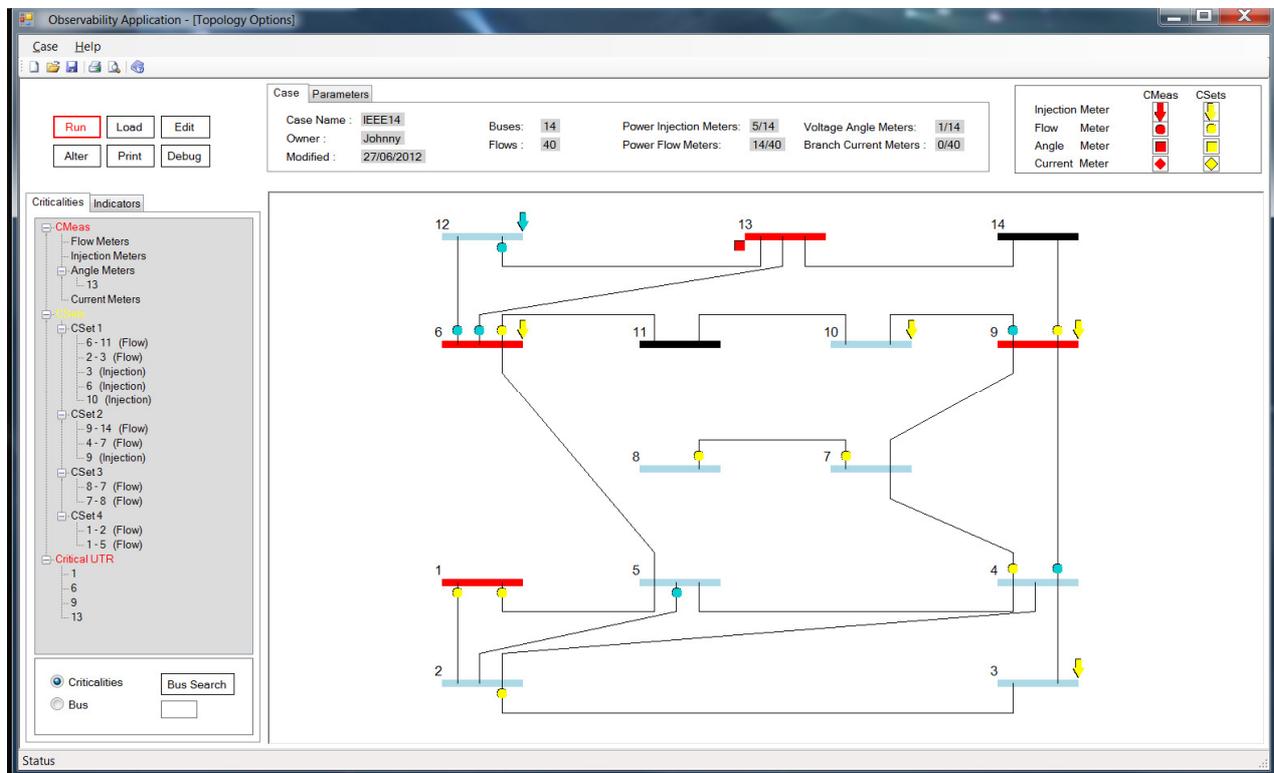


Figura 5.3. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - *Caso 2*

Tabela 5.6. Avaliação de Criticalidades – Caso 2

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P ₁₋₂ P ₁₋₅			X X					●	
②	P ₂₋₃				X					●
③	P ₃				X					●
④	P ₄₋₇ P ₄₋₉		X			X				●
⑤	P ₅₋₂		X							●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆		X X		X X				●	
⑦	P ₇₋₈						X			●
⑧	P ₈₋₇						X			●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉		X			X X			●	
⑩	P ₁₀				X					●
⑪										
⑫	P ₁₂₋₁₃ P ₁₂		X X							●
⑬	P ₁₃₋₁₄ P ₁₃									
⑭										

Tabela 5.7. Indicadores de Observabilidade – Caso 2

Evento	Indisponi- bilidade	Probabilidade	Valor
E_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{19}$ 0%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} E_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{12}{19}$ 63%
E_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{2 \times 15 + 0 \times (2 \times 19 - 0 - 1)}{19 \times 18}$ 9%
E_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_4)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{3}{11}$ 27%

Tabela 5.8. Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 2

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{12}{19 \times 4}$ 16%
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,46 - 1}{4,15 - 1} = 0,146$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{19}{13} = 1,46$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$ 15%

Na Figura 5.4, de modo a permitir uma melhor visualização das criticalidades obtidas, foram construídos diagramas de Venn, em que são representadas as medidas classificadas como: Cmeds (inexistentes no Caso 2), pertencentes a Cconjs, elementos de C_{UTRs} e redundantes. Agora considerando as UTRs a que pertencem as medidas envolvidas em criticalidades, foram obtidos os diagramas de Venn da Figura 5.5. Tais diagramas facilitam a visualização da formação de UTRs críticas.

Por fim, para a concentração de medidas em Cconjs encontra-se um valor pequeno (~16%) e a redundância global de medidas (~15%) também considera-se baixa, confirmando as criticalidades encontradas.

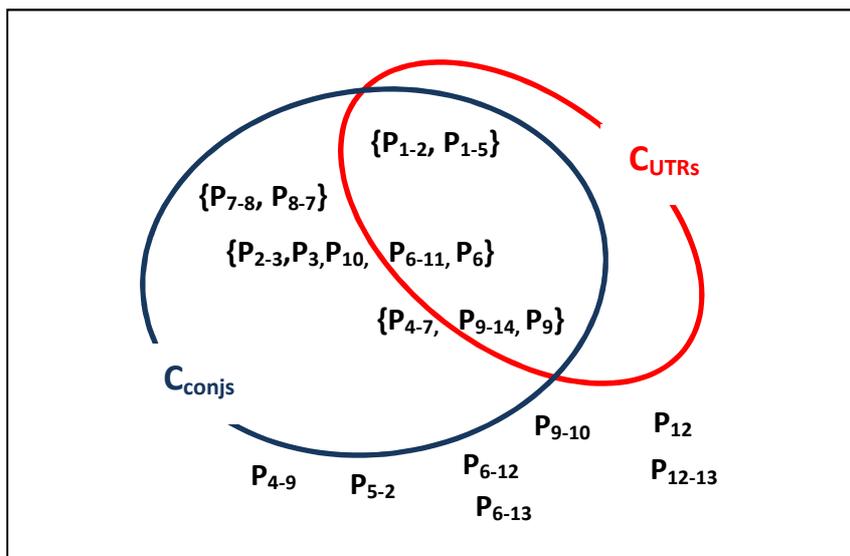
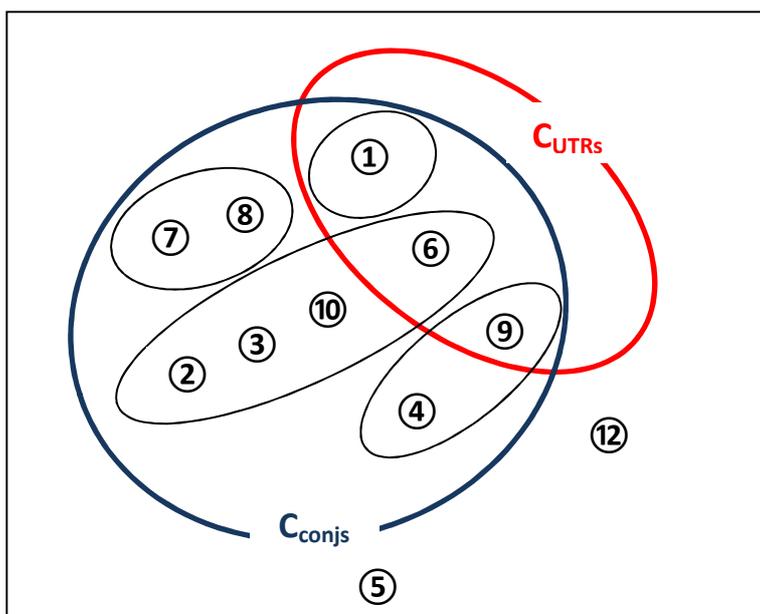


Figura 5.4. Diagrama de criticalidade de medidas – IEEE-14 barras – *Caso 2*



Ⓝ UTR da barra N

Figura 5.5. Diagrama de criticalidade de medidas, representadas por UTRs – IEEE-14 barras – *Caso 2*

Caso 3: Comparação entre dois sistemas de medição de mesma redundância global

Embora muito usado como referência em estudos de observabilidade, o indicador redundância global apresenta capacidade limitada para revelar adequadamente em que condição determinado sistema de medição se encontra.

Para ilustrar tal fato, considere que se deseja comparar a condição de observabilidade de um sistema de medição, por exemplo, aquele descrito no *Caso 2*, em duas situações distintas, correspondentes à indisponibilidade do mesmo número de medidas, estando portanto este sistema em ambas as situações com a mesma redundância global. Então, suponha que na **situação (a)** o sistema do *Caso 2* tenha sofrido a indisponibilidade da UTR da barra 4 e **na situação (b)** a UTR da barra 12 tenha se tornado indisponível. As Figuras 5.6 e 5.7 ilustram os resultados obtidos por **ObservApp** nas duas situações descritas, sintetizados nas Tabelas 5.9 a 5.14. Os diagramas de Venn correspondentes são apresentados nas Figuras 5.9 a 5.11. Para facilitar a comparação pretendida, os resultados obtidos foram extraídos para a Tabela 5.15, sendo nesta também incluídos (como referência) os índices do *Caso 2*.

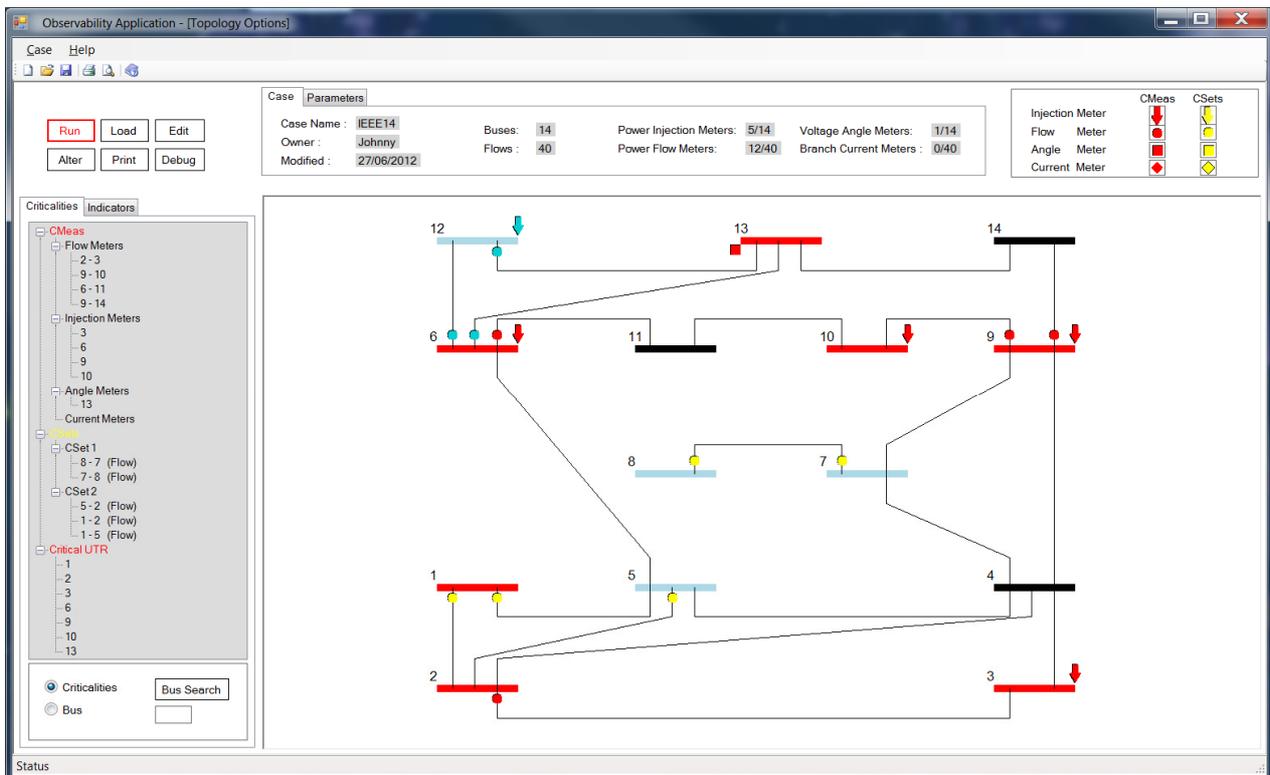


Figura 5.6. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - *Caso 3 – Situação (a)*

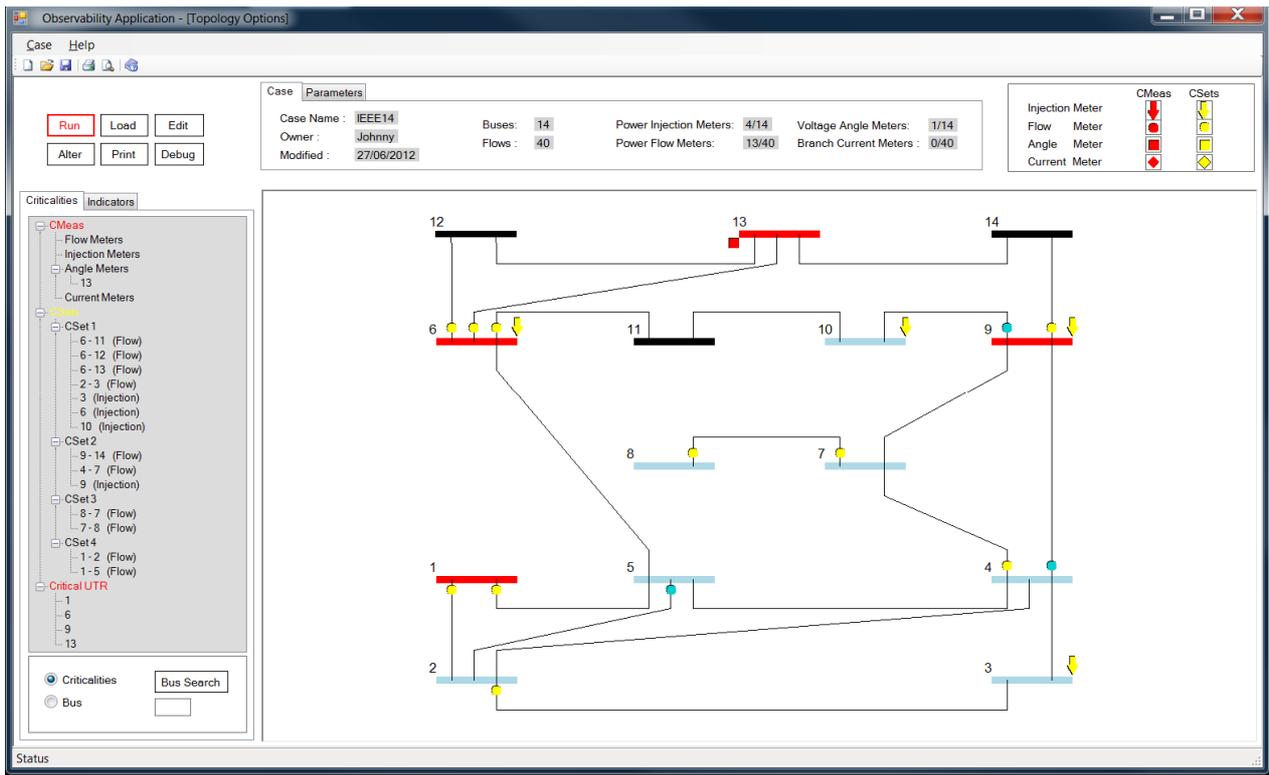


Figura 5.7. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - *Caso 3 – Situação (b)*

Tabela 5.9. Avaliação de Criticalidades – *Caso 3 – Situação (a)*

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P ₁₋₂ P ₁₋₅			x					●	
②	P ₂₋₃	x							●	
③	P ₃	x							●	
④	P ₄₋₇ P ₄₋₉									
⑤	P ₅₋₂			x						●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆	x	x x						●	
⑦	P ₇₋₈						x			●
⑧	P ₈₋₇						x			●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉	x x x							●	
⑩	P ₁₀	x							●	
⑪										
⑫	P ₁₂₋₁₃ P ₁₂		x x							●
⑬	P ₁₃₋₁₄ P ₁₃									
⑭										

Tabela 5.10. Indicadores de Observabilidade – Caso 3 - Situação (a)

Evento	Indisponi- bilidade	Probabilidade	Valor
E_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{8}{17}$ 47%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} E_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{5}{17}$ 29%
E_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{2 \times 4 + 8 \times (2 \times 17 - 8 - 1)}{17 \times 16} = 76\%$
E_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_4)$	$\mathcal{P}_4 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{6}{10}$ 60%

Tabela 5.11. Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 3 – Situação (a)

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{5}{17 \times 2}$ 15%
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,31 - 1}{4,15 - 1} = 0,098$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{17}{13} = 1,31$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$ 10%

Tabela 5.12. Avaliação de Criticalidades – Caso 3 – Situação (b)

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P ₁₋₂ P ₁₋₅			X					●	
②	P ₂₋₃				X					●
③	P ₃				X					●
④	P ₄₋₇ P ₄₋₉		X			X				●
⑤	P ₅₋₂		X							●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆				X				●	
⑦	P ₇₋₈						X			●
⑧	P ₈₋₇						X			●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉		X			X			●	
⑩	P ₁₀				X					●
⑪										
⑫	P ₁₂₋₁₃ P ₁₂									
⑬	P ₁₃₋₁₄ P ₁₃									
⑭										

Tabela 5.13. Indicadores de Observabilidade – Caso 3 - Situação (b)

Evento	Indisponi-bilidade	Probabilidade	Valor
E_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{17}$
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} E_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{14}{17}$
E_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{2 \times 20 + 0 \times (2 \times 17 - 0 - 1)}{17 \times 16}$
E_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} E_4)$	$\mathcal{P}_4 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{3}{10}$

Tabela 5.14. Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 3 – Situação (b)

Descrição	Valor
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{14}{17 \times 4}$
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,31 - 1}{4,15 - 1} = 0,146$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{17}{13} = 1,31$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$

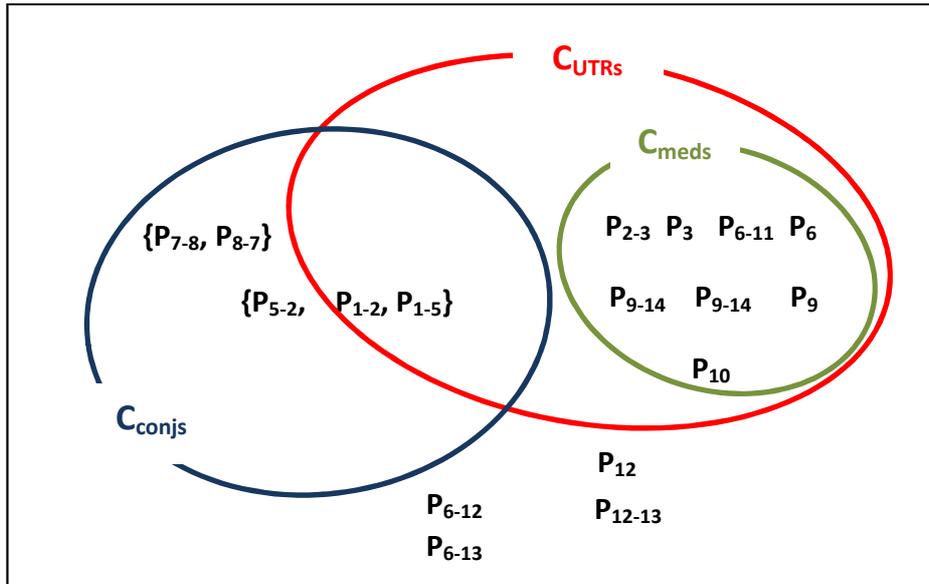
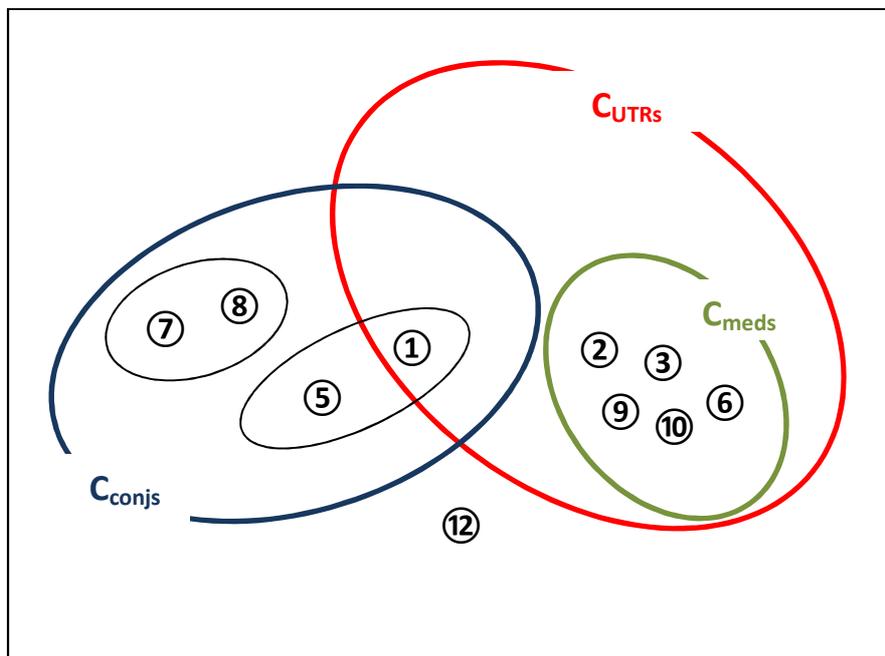


Figura 5.8. Diagrama de criticidade de medidas – IEEE-14 barras –
Caso 3 – Situação (a)



Ⓝ UTR da barra N

Figura 5.9. Diagrama de criticidade de medidas, representadas por UTRs –
IEEE-14 barras – Caso 3 – Situação (a)

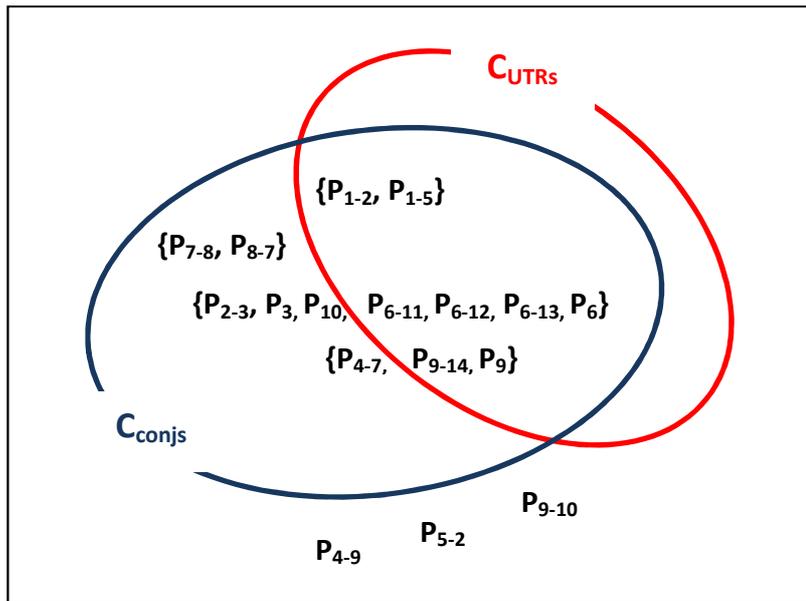
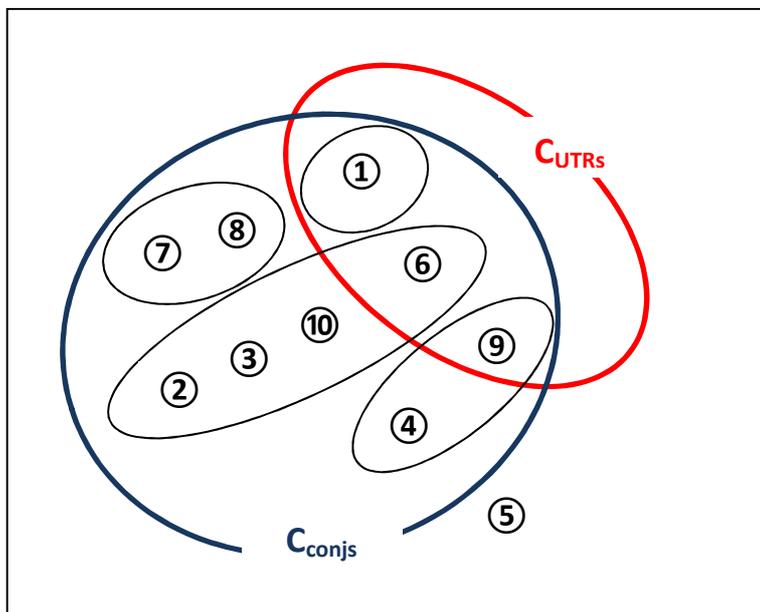


Figura 5.10. Diagrama de criticalidade de medidas – IEEE-14 barras –
Caso 3 – Situação (b)



Ⓝ UTR da barra N

Figura 5.11. Diagrama de criticalidade de medidas, representadas por UTRs –
 IEEE-14 barras – *Caso 3 – Situação (b)*

Tabela 5.15. Comparação de Indicadores – Sistema IEEE-14 barras – Caso 3 – Situações (a) e (b)

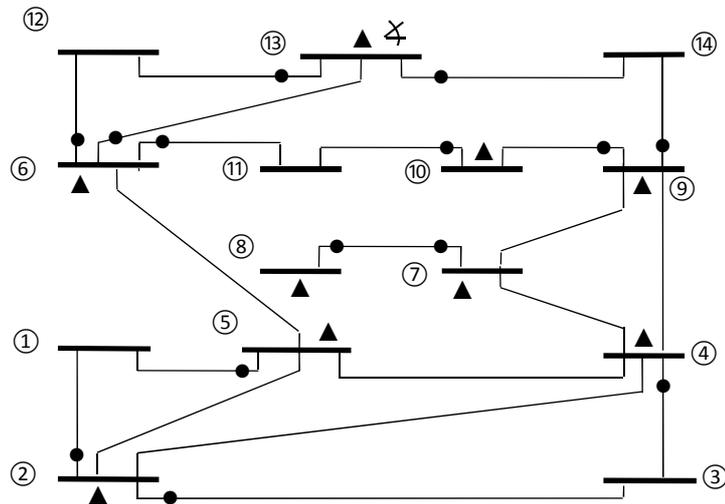
Indisponibilidades	Indicadores	Valores		
		Caso 2	Caso 3	
			Situação (a)	Situação (b)
uma medida	\mathcal{P}_1	0%	47%	0%
	\mathcal{P}_2	63%	29%	82%
duas medidas	\mathcal{P}_3	9%	76%	15%
uma UTR	\mathcal{P}_5	27%	60%	30%
	γ	16%	15%	21%
	$\eta_{\%}$	15%	10%	10%

Diante dos indicadores apurados no *Caso3*, percebe-se que de fato a redundância global quantifica apenas em que nível situa-se a utilização das possíveis medidas de um sistema, sem revelar a condição de observabilidade deste. Assim, por exemplo, a redundância de 10% revela apenas que poucas medidas estão disponíveis para se observar a rede como um todo. Já os demais indicadores mostram as diferentes vulnerabilidades de cada situação, como se comenta adiante:

- Na **situação (a)**, o sistema não é $(m-1)$ robusto, apresentando uma probabilidade de 47% de tornar-se inobservável, caso uma medida qualquer fique indisponível. Já na **situação (b)**, embora haja robustez para a perda de uma medida, o sistema apresenta uma grande chance (~82%) de deixar tal condição.
- Se for considerada a perda simultânea de duas medidas, a **situação (b)** é mais favorável, pois apresenta 15% de chance de ocorrer inobservabilidade, contra 76% da **situação (a)**.
- Para a indisponibilidade de uma UTR, em **(b)** a probabilidade de inobservabilidade é a metade da correspondente em **(a)**.
- Como era esperado, da comparação entre os Casos 2 e 3, verifica-se que a **situação (b)** de perda da UTR 12 (com medidas redundantes) apresentou menor impacto na observabilidade do sistema estudado, fato este revelado pelos indicadores propostos.

Caso 4: Avaliação de um sistema medição otimizado

Suponha agora que se deseja avaliar a condição de observabilidade do sistema representado na Figura 5.12, em que há 23 medidores, sendo 14 medidores de fluxo de potência (P_{2-1} , P_{2-3} , P_{4-3} , P_{5-1} , P_{6-11} , P_{6-12} , P_{6-13} , P_{7-8} , P_{8-7} , P_{9-10} , P_{9-14} , P_{10-11} , P_{13-12} , P_{13-14}), 9 de injeção de potência (P_2 , P_4 , P_5 , P_6 , P_7 , P_8 , P_9 , P_{10} , P_{13}), distribuídos em 9 UTRs [Roch10].



- medida de fluxo de potência; ▲ medida de injeção de potência
- ∠ medida de ângulo de tensão

Figura 5.12. Sistema IEEE-14 barras: *Caso 4*

A análise de observabilidade numérica efetuada com o aplicativo **ObservApp**, conforme mostra a Figura 5.13 e Tabela 5.16, indica que não há C_{meds} , nem C_{conjs} , nem C_{UTRs} , sendo todas as medidas redundantes.

As Tabelas 5.17 e 5.18 apresentam os indicadores de observabilidade calculados para o presente caso. Assim, verifica-se que o sistema suporta a indisponibilidade de uma medida, dentre as 23 disponíveis ($\mathcal{P}_1 = 0$), já que não há C_{meds} e não há risco de crescimento de \mathcal{P}_1 ($\mathcal{P}_2 = 0\%$). Além disto, a probabilidade de inobservabilidade, caso ocorra a indisponibilidade de qualquer par de medidas ou uma UTR, também é nula, observando-se as probabilidades \mathcal{P}_2 e \mathcal{P}_3 . A redundância global normalizada é de 24% e indica que o sistema de fato foi otimizado [Roch10], pois com relativamente poucos medidores/UTRs alcançou-se robustez ($m-2$) para perda de medidas e ($N_{UTRs} - 1$) para perda de UTRs.

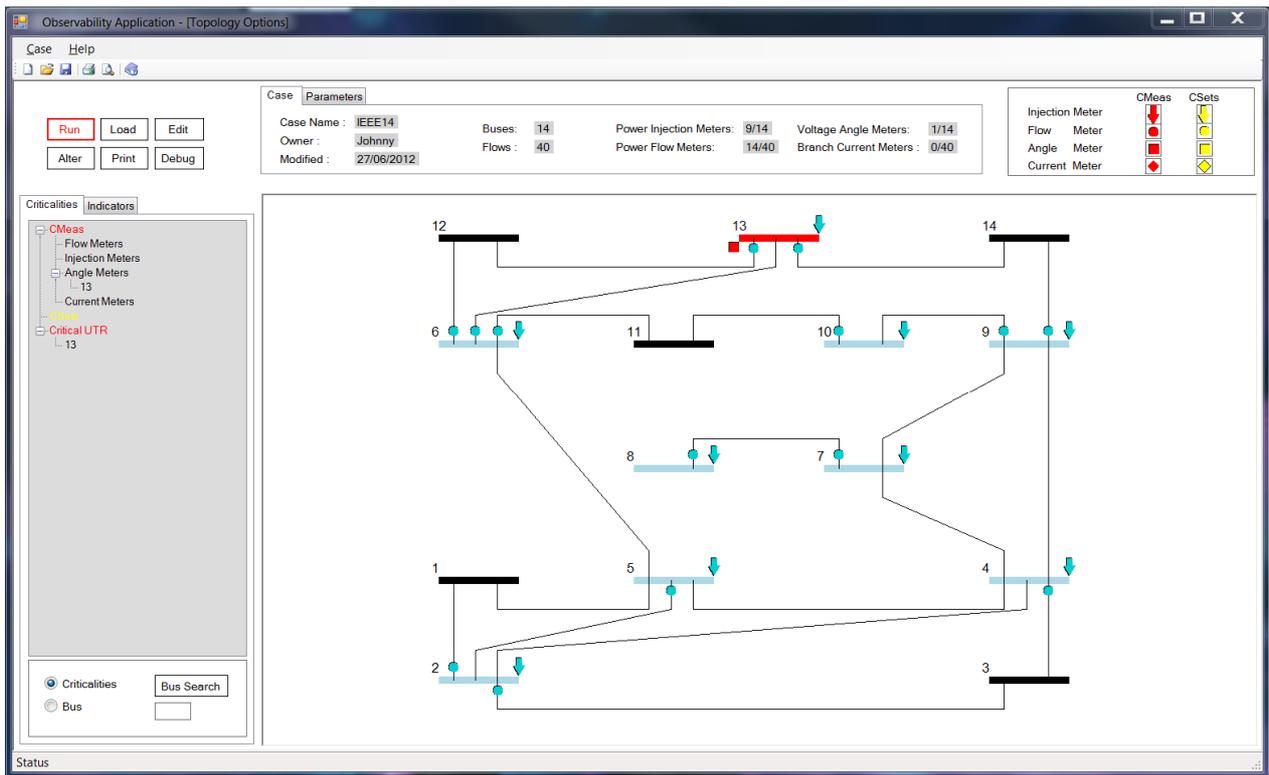


Figura 5.13. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - *Caso 4*

Tabela 5.16. Avaliação de Criticalidades – Caso 4

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①										
②	P ₂₋₁ P ₂₋₃ P ₂		x x x							●
③										
④	P ₄₋₃ P ₄		x x							●
⑤	P ₅₋₂ P ₅		x x							●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆		x x x x							●
⑦	P ₇₋₈ P ₇		x x							●
⑧	P ₈₋₇ P ₈		x x							●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉		x x x							●
⑩	P ₁₀₋₁₁ P ₁₀		x x							●
⑪										
⑫										
⑬	P ₁₃₋₁₂ P ₁₃₋₁₄ P ₁₃		x x x							●
⑭										

Tabela 5.17. Indicadores de Observabilidade – Caso 4

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor	
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{23}$	0%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{0}{23}$	0%
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)} = \frac{2 \times 0 + 0 \times (2 \times 23 - 0 - 1)}{23 \times 22}$	0%
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{0}{9}$	0%

Tabela 5.18. Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 4

Descrição	Valor	
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}}$	-----
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,77 - 1}{4,15 - 1} = 0,146$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{23}{13} = 1,77$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$	24%

O caso apresentado mostra-se interessante, como afirmado anteriormente, pois apresenta boa robustez com um pequeno número de medidores/UTRs. De modo a confirmar tal apreciação, pode-se desdobrar este caso modificando o sistema de medição pela retirada da UTR da barra 6 e confirmando a referida robustez. Os resultados obtidos para o *Caso 4 modificado* encontram-se na Figura 5.14 e nas Tabelas 5.19 a 5.21.

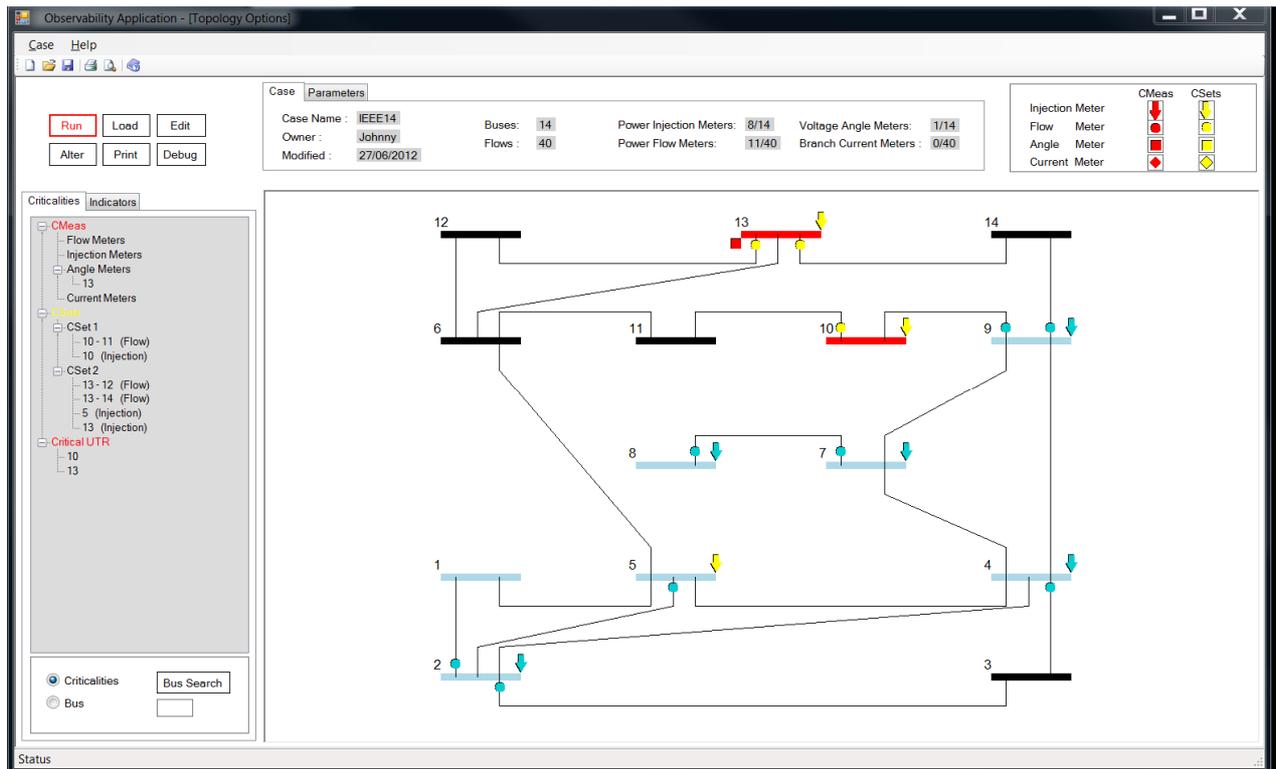


Figura 5.14. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras -
Caso 4 modificado

Tabela 5.19. Avaliação de Criticalidades – Caso 4 modificado

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①										
②	P ₂₋₁ P ₂₋₃ P ₂		x x x							●
③										
④	P ₄₋₃ P ₄		x x							●
⑤	P ₅₋₂ P ₅		x		x					●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆									
⑦	P ₇₋₈ P ₇		x x							●
⑧	P ₈₋₇ P ₈		x x							●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉		x x x							●
⑩	P ₁₀₋₁₁ P ₁₀			x x					●	
⑪										
⑫										
⑬	P ₁₃₋₁₂ P ₁₃₋₁₄ P ₁₃				x x x				●	
⑭										

Tabela 5.20. Indicadores de Observabilidade – *Caso 4 modificado*

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor	
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{19}$	0%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{6}{19}$	32%
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m - 1)} =$ $= \frac{2 \times 7 + 0 \times (2 \times 19 - 0 - 1)}{19 \times 18}$	4%
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{2}{8}$	25%

Tabela 5.21. Outros Indicadores de Observabilidade – *Caso 4 modificado*

Descrição	Valor	
<i>Concentração de medidas em Cconjs</i>	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{6}{19 \times 2}$	16%
<i>Redundância global</i>	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{max} - 1} = \frac{1,46 - 1}{4,15 - 1} = 0,146$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{19}{13} = 1,46$ $\eta_{max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 20}{14 - 1} = 4,15$	15%

Os resultados alcançados com a modificação do Caso 4 confirmam a análise feita anteriormente, pois com a remoção da UTR da barra 6 (4 medidas ficam indisponíveis) o sistema manteve-se observável. Novamente, os indicadores propostos mostram-se aptos para revelar a situação de observabilidade do sistema medição. Se forem comparados *Caso 2* e *Caso 4 modificado*, que apresentam mesma redundância global mas configuração de

medidores distinta, se vê que o sistema do *Caso 4 modificado* é mais robusto. A Tabela 5.22 facilita o entendimento da referida comparação.

Tabela 5.22. Comparação de Indicadores – Sistema IEEE-14 barras –
Caso 2 e Caso 4

Indisponibilidades	Indicadores	Valores		
		<i>Caso 2</i>	<i>Caso 4</i>	<i>Caso 4 modificado</i>
uma medida	\mathcal{P}_1	0%	0%	0%
	\mathcal{P}_2	63%	0%	32%
duas medidas	\mathcal{P}_s	9%	0%	4%
uma UTR	\mathcal{P}_s	27%	0%	25%
	γ	16%	-----	16%
	$\eta_{\%}$	15%	24%	15%

Caso 5: Robustez ($m-k$)

Avaliar sistemas de medição quanto a sua robustez frente à indisponibilidade genérica de k -tuplas de medidas, salvo levantamento estatístico que mostre a relevância de avaliação deste tipo, não parece ser necessário [Crai90]. Embora se possa imaginar a perda simultânea de várias medidas isoladamente, a indisponibilidade de uma unidade de medição (UTR) por completo (perda de um bloco de medidas), pode ser considerada como um evento de ocorrência mais provável.

Ao se verificar a robustez de um sistema de medição em relação a perda de uma unidade de medição (robustez $N_{UTRs}-1$), também se está avaliando uma robustez equivalente ($m-k$), sendo $1 \leq k \leq M_{UTR}$, onde M_{UTR} representa o maior número de medidas que estejam disponíveis em uma UTR.

Neste sentido, tome por exemplo uma rede elétrica genérica de n barras, coberta por um sistema de medição que colete m medidas fornecidas por um certo número de unidades

de medição, representado por N_{UTRs} . De uma forma otimista, admita que tenha sido instalada em cada barra uma UTR, o que leva a um valor médio de número de medidas por UTRs dado por:

$$\overline{M}_{UTR} = \frac{m}{n} \cong \frac{m}{n-1} = \eta_g \quad (5.1)$$

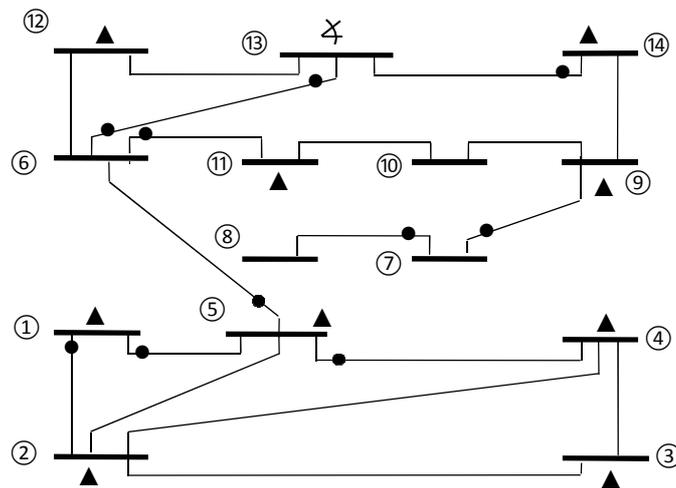
Um sistema supostamente com redundância $\eta_g = 2,5$ (valor mediano para o sistema IEEE-14 barras em estudo) resulta em UTRs contendo com duas ou três medidas, o que em média correspondem a cerca 2,5 medidas por unidade de medição. Assim, o que se poderia esperar na avaliação da observabilidade deste sistema seria uma robustez $(m-3)$, equivalente a perda, sem risco de inobservabilidade, de uma UTR.

Do exposto, conclui-se então que, para a avaliação do risco de inobservabilidade, torna-se razoável considerar a robustez de sistemas de medição com relação à perda de uma UTR (i.e., sistemas $N_{UTRs}-1$ robustos), não sendo necessário buscar por k -tuplas críticas de cardinalidade elevada, formadas por medidas oriundas de diversas UTRs. A título de ilustração, considerando o Caso 4, avaliou-se o sistema como $N_{UTRs}-1$ robusto ($P_5=0$), o que equivale também a dizer que este é $(m-4)$ robusto (a UTR da barra 6 contém 4 medidas, número maior que todas as demais).

Caso 6: Indisponibilidade de ramos da rede

Suponha agora que sejam avaliadas criticalidades decorrentes de alterações na configuração da rede elétrica. Considere então a rede da Figura 5.15, que sofreu uma pequena alteração pela indisponibilidade dos ramos 4-7 e 4-9, ficando assim com 18 ramos. O sistema de medição para esta rede [Chen08] encontra-se representado na Figura 5.15, compondo-se de um total de 19 medidas, distribuídas da seguinte maneira: 10 fluxos de potência (P_{1-2} , P_{1-5} , P_{5-4} , P_{5-6} , P_{6-11} , P_{6-13} , P_{7-8} , P_{7-9} , P_{13-6} , P_{14-13}) e 9 injeções de potência (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 , P_5 , P_9 , P_{11} , P_{12} , P_{14}).

Através do aplicativo **ObservApp**, encontram-se os resultados exibidos na Figura 5.16, que são transportados para a Tabela 5.23. Observa-se que há: 2 Cmeds, P_{7-8} e P_{12} ; 2 Cconjs, $\{P_{5-6}, P_5\}$ e $\{P_{6-11}, P_{7-9}, P_9, P_{11}, P_{14-13}, P_{14}\}$; 4 C_{UTRs} , situadas nas barras 5, 7, 12 e 14. Verifica-se também que 3 ramos são críticos: 7-8, 7-9 e 5-6. Além disto, os ramos 6-12 e 12-13 incidem apenas em P_{12} (Cmed), fazendo com que possíveis erros na configuração de tais ramos não sejam detectáveis.



● medida de fluxo de potência; ▲ medida de injeção de potência

⌘ medida de ângulo de tensão

Figura 5.15. Sistema IEEE-14 barras: Caso 6

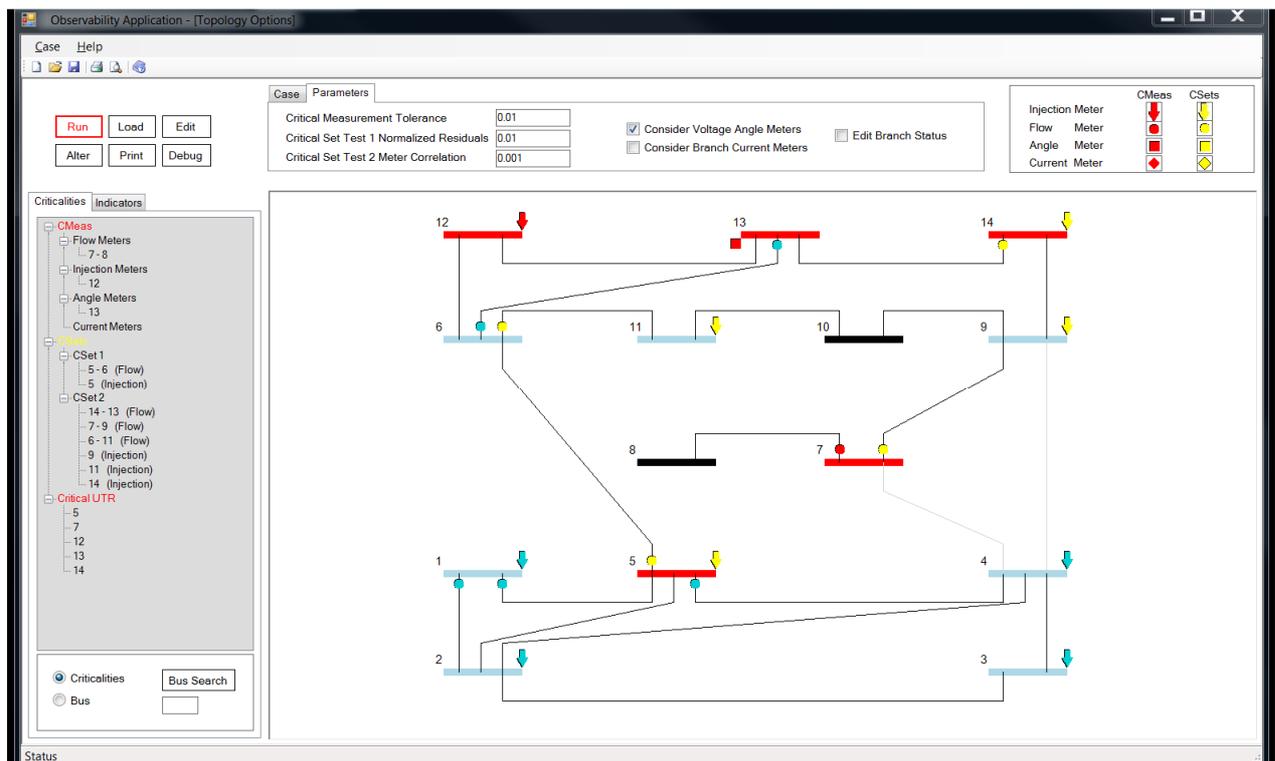


Figura 5.16. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - Caso 6

As Tabelas 5.24 e 5.25 apresentam os indicadores de observabilidade para o presente caso. Assim, verifica-se que o sistema apresenta 11% de probabilidade (\mathcal{P}_i) para

se tornar inobservável, caso perca uma medida dentre as 19 disponíveis. O risco de crescimento de \mathcal{P}_i é de 42%. A probabilidade de inobservabilidade, caso ocorra a indisponibilidade de qualquer par de medidas é de 30% e de qualquer UTR, 33%. Em relação à criticalidade de ramos, perde-se a observabilidade com probabilidade de 17%, se um ramo tornar-se indisponível e se for um par de ramos, com 36%. As 7 duplas críticas de ramos identificadas foram: (1-2 e 1-5), (2-3 e 3-4), (6-11 e 9-10), (6-11 e 10-11), (6-12 e 12-13), (9-10 e 10-11), (9-14 e 13-14). A redundância global normalizada é de 16%.

Tabela 5.23. Avaliação de Criticalidades – Caso 6

UTRs/ medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P_{1-2}		x							
	P_{1-5}		x							●
	P_1		x							
②	P_2		x							●
③	P_3		x							●
④	P_4		x							●
⑤	P_{5-4}		x							
	P_{5-6}			x					●	
	P_5			x						
⑥	P_{6-11}				x					●
	P_{6-13}		x							
⑦	P_{7-8}	x							●	
	P_{7-9}				x					
⑧										
⑨	P_9				x					●
⑩										
⑪	P_{11}				x					●
⑫	P_{12}	x							●	
⑬	P_{13-6}		x							●
⑭	P_{14-13}				x				●	
	P_{14}				x					

Tabela 5.24. – Indicadores de Observabilidade – Caso 6

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor	
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_i = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{2}{19}$	11%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_s = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{8}{19}$	42%
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_s = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m-1)}$ $= \frac{2 \times 16 + 2 \times (2 \times 19 - 2 - 1)}{19 \times 18}$	30%
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_s = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{4}{12}$	33%
\mathcal{E}_5	um ramo	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_5)$	$\mathcal{P}_s = \frac{N_{Cramos}}{N_{ramos}} = \frac{3}{18}$	17%
\mathcal{E}_6	dois ramos	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_6)$	$\mathcal{P}_s = \frac{2N_{Cduplas-ramos} + N_{Cramos}(2N_{ramos} - N_{Cramos} - 1)}{N_{ramos}(N_{ramos} - 1)}$ $= \frac{2 \times 7 + 3 \times (2 \times 18 - 3 - 1)}{18 \times 17}$	36%

Tabela 5.25. – Outros Indicadores de Observabilidade – Caso 6

Descrição	Valor	
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{Cconjs}}{m \times N_{Cconjs}} = \frac{8}{19 \times 2}$	21%
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{\max} - 1} = \frac{1,46 - 1}{3,85 - 1}$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{19}{13} = 1,46$ $\eta_{\max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 18}{13} = 3,85$	16%

Ainda explorando este caso, pode-se modificar o sistema de medição de modo a não mais existirem C_{ramos} . Para alcançar isto de forma ótima [Chen08], basta agregar duas medidas correspondentes a: injeção na barra 13 e ângulo de fase da tensão da barra 8 (fornecida por UMF). Assim, através do **ObservApp**, encontram-se os resultados da Tabela 5.26 e os indicadores de criticalidade das Tabelas 5.27 e 5.28. Um total de 9 duplas críticas de ramos foi identificado, sendo estas: (2-3 e 3-4), (5-6 e 7-8), (5-6 e 7-9), (6-11 e 9-10), (6-11 e 10-11), (6-12 e 12-13), (7-8 e 7-9), (9-10 e 10-11), (9-14 e 13-14).

Os indicadores de observabilidade calculados retratam adequadamente o benefício trazido pela adição otimizada de apenas duas medidas (P_{13} e θ_8), que se traduz na significativa redução desses indicadores, alcançada com um pequeno acréscimo (cerca de 4%) de redundância global.

Tabela 5.26. Avaliação de Criticalidades – Caso 6 modificado

UTRs/UMFs medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P_{1-2}		X							●
	P_{1-5}		X							
	P_1		X							
	θ_1			X						
②	P_2		X							●
③	P_3		X							●
④	P_4		X							●
⑤	P_{5-4}		X							●
	P_{5-6}		X							
	P_5		X							
⑥	P_{6-11}				X					●
	P_{6-13}		X							
⑦	P_{7-8}			X						●
	P_{7-9}		X							
⑧	θ_8			X						
⑨	P_9				X					●
⑩										
⑪	P_{11}				X					●
⑫	P_{12}					X				●
⑬	P_{13-6}		X							●
	P_{13}					X				
⑭	P_{14-13}		X							●
	P_{14}		X							

Tabela 5.27. – Indicadores de Observabilidade – *Caso 6 modificado*

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor	
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_1 = \frac{N_{\text{Cmeds}}}{m} = \frac{0}{22}$	0%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{\text{Cmeds}} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_2 = \frac{M_{\text{Cconjs}}}{m} = \frac{8}{22}$	36%
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_3 = \frac{2N_{\text{Cduplas}} + N_{\text{Cmeds}}(2m - N_{\text{Cmeds}} - 1)}{m(m-1)}$ $= \frac{2 \times 7 + 0 \times (2 \times 21 - 0 - 1)}{22 \times 21}$	4%
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_4 = \frac{N_{\text{CUTRs}}}{N_{\text{UTRs}}} = \frac{0}{10}$	0%
\mathcal{E}_5	um ramo	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_5)$	$\mathcal{P}_5 = \frac{N_{\text{Cramos}}}{N_{\text{ramos}}} = \frac{0}{18}$	0%
\mathcal{E}_6	dois ramos	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_6)$	$\mathcal{P}_6 = \frac{2N_{\text{Cduplas-ramos}} + N_{\text{Cramos}}(2N_{\text{ramos}} - N_{\text{Cramos}} - 1)}{N_{\text{ramos}}(N_{\text{ramos}} - 1)}$ $= \frac{2 \times 9 + 0 \times (2 \times 18 - 0 - 1)}{18 \times 17}$	6%

Tabela 5.28. – Outros Indicadores de Observabilidade – *Caso 6 modificado*

Descrição	Valor	
Concentração de medidas em Cconjs	$\gamma = \frac{M_{\text{Cconjs}}}{m \times N_{\text{Cconjs}}} = \frac{8}{22 \times 3}$	12%
Redundância global	$\eta_{\%} = \frac{\eta_g - 1}{\eta_{\max} - 1} = \frac{1,57 - 1}{3,85 - 1}$ $\eta_g = \frac{m}{n} = \frac{22}{14} = 1,57$ $\eta_{\max} = \frac{N_b + 2N_{\ell}}{N_b - 1} = \frac{14 + 2 \times 18}{13} = 3,85$	20%

Caso 7: Disponibilidade de unidades de medição fasorial (UMF)

Através do Caso 6 modificado, foi possível mostrar em parte a utilização de medidas oriundas de UMFs em benefício da observabilidade de redes elétricas de potência. Ainda, pode-se neste caso expandir o uso de medidas angulares providas por UMFs, com o objetivo de eliminar todas as duplas críticas de ramos (tornando nula a probabilidade \mathcal{P}_r), acrescentando-se as medidas de $\theta_3, \theta_7, \theta_{10}, \theta_{11}, \theta_{12}$ e θ_{14} [Chen08]. Destaca-se, considerando-se o valor do indicador \mathcal{P}_r anterior (6%), a necessidade de um número significativo de medidas complementares (total de seis) para atingir a (pequena) redução proposta.

De modo a prosseguir na ilustração do uso de medidas de UMFs em benefício da observabilidade, reconsidere o Caso 2, em que medidas de ângulo de fase das tensões nodais adquiridas por UMFs estarão disponíveis. Se duas medidas quaisquer de ângulo forem agregadas (θ_i e θ_j), haverá alterações (diminuições) nas criticalidades anteriormente apontadas, estando sempre presente a formação de um Cconj contendo as referidas medidas de UMFs.

Vários exemplos de utilização de medidas angulares e avaliação de criticalidades encontram-se em [Mora09]. Aqui, será simulado no Caso 7a o sistema de medição representado na Figura 5.17, para o qual foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 5.29 e 5.30.

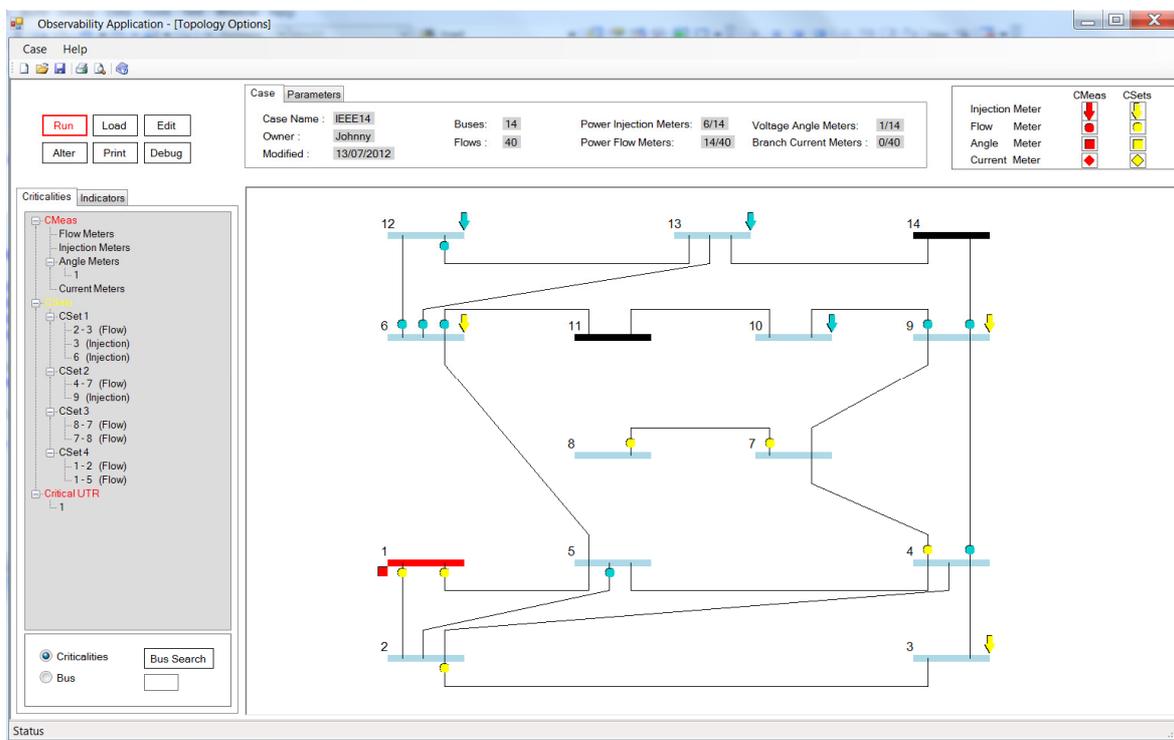


Figura 5.17. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - Caso 7a

Tabela 5.29. Avaliação de Criticalidades – *Caso 7a*

UTRs/UMFs medidas		Criticalidade de Medidas							Criticalidade de UTRs	
		Individuais C_{meds}	Redun- dantes	Conjuntos C_{conjs}					C_{UTR}	Não Crítica
				1	2	3	4	5		
①	P ₁₋₂ P ₁₋₅						X		●	
②	P ₂₋₃				X					●
③	P ₃				X					●
④	P ₄₋₇ P ₄₋₉		X	X						●
⑤	P ₅₋₂		X							●
⑥	P ₆₋₁₁ P ₆₋₁₂ P ₆₋₁₃ P ₆		X X X		X					●
⑦	P ₇₋₈					X				●
⑧	P ₈₋₇					X				●
⑨	P ₉₋₁₀ P ₉₋₁₄ P ₉		X X	X						●
⑩	P ₁₀		X							●
⑪										
⑫	P ₁₂₋₁₃ P ₁₂		X X							●
⑬	P ₁₃		X							●
⑭										

Tabela 5.30. Indicadores de Observabilidade – Caso 7a

Evento	Indisponibilidade	Probabilidade	Valor	
\mathcal{E}_1	uma medida	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_i = \frac{N_{Cmeds}}{m} = \frac{0}{20}$	0%
		$\mathcal{P}(\text{aumento } N_{Cmeds} \mathcal{E}_1)$	$\mathcal{P}_s = \frac{M_{Cconjs}}{m} = \frac{9}{20}$	45%
\mathcal{E}_2	duas medidas	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_2)$	$\mathcal{P}_s = \frac{2N_{Cduplas} + N_{Cmeds}(2m - N_{Cmeds} - 1)}{m(m - 1)} =$ $= \frac{2 \times 6 + 0 \times (2 \times 20 - 0 - 1)}{20 \times 19}$	3%
\mathcal{E}_4	uma UTR	$\mathcal{P}(\text{inobserv.} \mathcal{E}_4)$	$\mathcal{P}_s = \frac{N_{CUTRs}}{N_{UTRs}} = \frac{1}{12}$	8%

Considerando agora no Caso 7b quatro medidas angulares (θ_{13} , θ_1 , θ_3 e θ_8), encontram-se com **ObservApp** os resultados apresentados na Figura 5.18. Constata-se que todas as criticalidades de medidas de cardinalidade até dois (expressas pela presença de Cmeds e Cconjs) foram eliminadas, restando apenas a criticalidade da UTR da barra 1 (pela presença de uma tripa crítica), o que evidencia o benefício trazido à observabilidade pela agregação de medidas providas por UMFs.

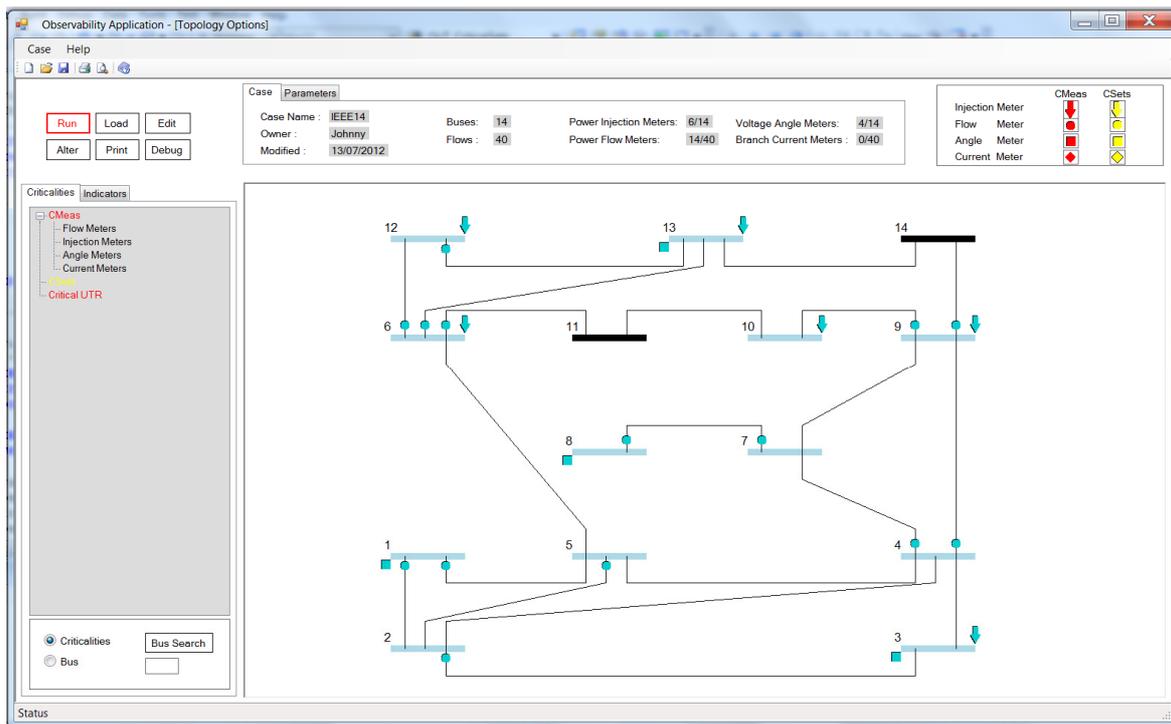


Figura 5.18. Tela de **ObservApp** – Sistema IEEE-14 barras - *Caso 7b*

5.3. Conclusão

Neste capítulo, foram simulados diversos casos referentes à avaliação quantitativa da observabilidade de redes elétricas de potência, expressa por meio de indicadores numéricos, considerando criticalidades em: medidas, tomadas individualmente; grupos de medidas (cardinalidade dois ou superior, k -tuplas); unidades de medição (UTRs); ramos, isoladamente ou em grupos (e.g., duplas). A contribuição de medidas de sincrofasores (oriundas de UMFs) para a observabilidade também foi considerada.

Resultados com outros sistemas padrão IEEE encontram-se resumidamente apresentados no Apêndice C.

Dos resultados encontrados, pôde-se concluir que os indicadores de observabilidade propostos nesta Tese mostraram-se adequados para refletir a qualidade e robustez de um sistema de medição, em termos da capacidade de observação da rede, para fins de EE.

Capítulo 6

Conclusões

A Estimação de Estado tem sido considerada uma função essencial em Sistemas de Gerenciamento de Energia, por ocupar-se com o fornecimento de dados em tempo real necessários à operação segura de redes elétricas de potência. Tais dados referem-se a grandezas físicas que caracterizam o estado operativo da rede, em regime conhecido como quase permanente, tipicamente: tensões nodais em magnitude/ângulo e outras que delas decorrem, como fluxos e injeções de potência ativa/reactiva; correntes também se encontram entre as referidas grandezas. A configuração da rede, estabelecida pelo *status* de diversos dispositivos seccionadores (chaves e disjuntores), faz parte do estado.

Tradicionalmente, no processo de estimação de estado, presume-se que o estado seja observado por medidas (adquiridas via sistema de medição remota) que: contenham erros estatisticamente normais, inerentes à medição; sejam em quantidade adequada, de diversos tipos (relacionados a nós/ramos) e distribuídas por toda a rede; venham de uma rede cuja configuração atual, com respectivos parâmetros elétricos de seus componentes, seja conhecida sem erros; tenham sido colhidas sincronizadamente (i.e., refiram-se a um intervalo de tempo suficientemente pequeno, quando comparado à constante de tempo da carga).

Na prática corrente, as citadas hipóteses não se verificam plenamente, o que tem levado a Estimação de Estado a incorporar módulos encarregados de lidar com situações adversas que envolvam a presença de erros grosseiros de medição, baixa redundância de medidas com o comprometimento da observabilidade (criticalidades), erros de configuração e de parâmetros da rede.

De modo a auxiliar o processo de estimação em seus diversos aspectos e fazer frente às citadas adversidades, recentemente, busca-se incorporar medidas de sincrofasores (observação direta do estado operativo, com referência de tempo provida por sistemas de posicionamento global - GPS) obtidas por unidades de medição fasorial.

A partir da descrição geral apresentada acima, no que concerne aos diferentes aspectos que envolvem a função Estimação de Estado, aborda-se nesta Tese o problema da observabilidade de redes elétricas de potência, supervisionadas por meio da referida

função. No sentido clássico, entende-se por observabilidade a aptidão para estimar o estado do sistema em sua intereza.

Aqui, lidando-se com redes observáveis, indicadores numéricos que pudessem estabelecer graus de aptidão de sistemas de medição para observá-las ou riscos de inobservabilidade foram propostos. Por meio de casos que simulassem condições distintas de observabilidade, tais indicadores foram calculados e demonstraram ser adequados aos propósitos a que se destinam.

A seguir, as principais conclusões alcançadas na presente Tese são descritas.

- A análise de observabilidade adotada para a identificação de criticalidades, com base nas propriedades numéricas de resíduos da estimação, mostrou-se adequada em razão de ser simples e utilizar rotinas de cálculos habitualmente presentes em estimadores de estado construídos através do método dos Mínimos Quadrados Ponderados.
- As criticalidades de baixa cardinalidade (até dois, as de ocorrência mais provável) caracterizam a condição de fraca observabilidade, o que leva a função Estimação de Estado a enfrentar dificuldades para a detecção/identificação de erros nos dados por esta processados. Assim sendo, além de identificá-las, reconheceu-se a utilidade de retratá-las em termos quantitativos, para uma avaliação mais objetiva da condição de observabilidade de uma rede, para a qual se deseja obter uma estimativa confiável do seu estado de operação. Desta forma, foram propostos indicadores numéricos correspondentes ao risco de se perder a observabilidade, na ocorrência de eventos de indisponibilidade de medidas.
- Embora não tenha sido foco da Tese propor algoritmos para identificação de criticalidades, foi possível estabelecer regras classificatórias para unidades de medição (críticas e não críticas), sem ter que necessariamente se lançar mão de processos de eliminação uma-a-uma, comumente adotados para se verificar a condição de observabilidade associada a cada uma destas unidades.
- Diversos eventos que pudessem levar corriqueiramente uma rede elétrica à inobservabilidade –pela indisponibilidade de medidas, unidades de medição ou ramos– foram caracterizados. Na falta de dados estatísticos que pudessem fornecer as probabilidades de ocorrência desses eventos, sem perda de generalidade, assumiu-se que fossem independentes e equiprováveis. Tais dados estando disponíveis, podem ser usados para compor as probabilidades de inobservabilidade estabelecidas nos indicadores propostos.

- A utilização de Diagramas de Venn para representar como se compõem as criticalidades identificadas (notadamente as de unidades de medição) foi proposta, mostrando-se bastante esclarecedora: *medidas críticas* formam sempre um conjunto disjunto daquela que reúne *conjuntos críticos de medidas*; o conjunto formado por medidas críticas está contido no conjunto de *unidades de medição críticas*; pode haver interseção entre o conjunto de *conjuntos críticos de medidas* e conjunto de *unidades de medição críticas*, estando fora da interseção os elementos deste último conjunto que contenham uma *k-tupla crítica de medidas* de cardinalidade superior a dois.
- Nos inúmeros casos testados referentes a diversos planos de medição, alcançou-se plena confiabilidade na identificação de medidas críticas e conjuntos críticos, não tendo sido registrada nenhuma falha.
- Com base na análise de criticalidade de medidas (para uma dada configuração de rede elétrica), indicadores de observabilidade foram propostos. Tais indicadores correspondem à probabilidade de inobservabilidade, frente à indisponibilidade de: uma medida; duas medidas; *k* medidas; uma unidade de medição; um ramo; dois ramos. Complementarmente, considerou-se a probabilidade de aumento do risco de inobservabilidade referente à perda de uma medida. Outros indicadores propostos foram a concentração de medidas em conjuntos críticos (contribui para o aumento da probabilidade de inobservabilidade na ocorrência da perda de duas medidas) e a redundância global normalizada (de mais fácil interpretação do que sua forma usualmente conhecida).
- Os indicadores propostos mostraram-se conformes aos diferentes graus de observabilidade dos sistemas de medição analisados, permitindo uma comparação mais simples e objetiva da real condição em que se encontram para ser submetidos ao processo de estimação de estado. Assim sendo, pode-se bem avaliar riscos *versus* investimentos, desejando-se passar de uma certa condição de observabilidade para outra mais favorável.
- Para a análise das criticalidades estudadas e cálculo dos indicadores de observabilidade propostos foi desenvolvido um programa computacional, denominado **ObservApp**, com o qual foram realizados inúmeros testes utilizando-se os sistemas padrão IEEE. O aplicativo mostrou-se extremamente útil, dada a sua facilidade de uso, notadamente pela interface gráfica disponível.

Por fim, como propostas divisadas para a continuação da pesquisa desenvolvida nesta Tese, citam-se alguns tópicos:

- A avaliação da criticalidade de unidades de medição pode ser revista, estabelecendo-se para as unidades não críticas certas classes, tais como: conjuntos críticos; fraca observabilidade, i.e., caso um elemento desta classe torne-se indisponível, não fará surgir uma unidade de medição crítica; redundantes. Indicadores de observabilidade correspondentes a estas novas classes também poderão ser definidos.
- Outros indicadores dentro da mesma linha de se estabelecer graus de observabilidade poderão ser propostos, como por exemplo, os que envolvam k -tuplas críticas de medidas de cardinalidade elevada. Estas são estudadas nos problemas de construção de sistemas robustos de medição, resistentes a ataques cibernéticos que se direcionem à contaminação de dados colhidos para a operação de sistemas estratégicos (redes elétricas de potência).
- Um estudo sobre o desempenho computacional da avaliação de criticalidades através de propriedades numéricas de resíduos em contraposição a outros métodos, como os que fazem uso das matrizes Jacobiano e de Gram, poderá ser conduzido.
- Ampliar a utilização dos indicadores propostos calculando-os em áreas de sistemas que resultem da perda de observabilidade global (ilhamentos).
- Para a quantificação da observabilidade proposta aplicada a sistemas de grande porte, estudar a adoção de processamento paralelo combinado à subdivisão de tais sistemas em áreas de interesse.
- Utilizar os indicadores propostos na avaliação da observabilidade de redes de distribuição de energia elétrica.

Apêndice A

Medidas e Conjuntos Críticos

Este apêndice apresenta as propriedades numéricas dos resíduos de estimação verificadas em condições de redundância crítica de medidas [Cout07], tais como aquelas encontradas quando estão presentes criticalidades individuais (ocorrência de Cmeds) e em conjuntos de medidas (formação de Cconjs).

A.1 Medidas Críticas (Cmeds)

Suponha que, para um determinado vetor de medidas z , nenhuma de suas componentes seja redundante, i.e. seja composto apenas por Cmeds. Neste caso, o número de medidas se iguala ao número de variáveis de estado, o que significa que as matrizes H e R tornam-se quadradas, e da mesma forma, o resultado do produto $H^t R^{-1}$ para o qual se pode calcular a matriz inversa.

Considere a eq. do modelo de EE linear apresentado no Capítulo 2, aqui transcrita:

$$H^t R^{-1} [z - H\hat{x}] = 0$$

Pre-multiplicando esta equação por $(H^t R^{-1})^{-1}$ e considerando que $\hat{z} = H\hat{x}$, a solução para o problema de EE é alcançada através de:

$$(H^t W^{-1})^{-1} H^t W^{-1} [z - H\hat{x}] = 0 \rightarrow [z - H\hat{x}] = 0 \rightarrow r = z - \hat{z} = 0 \quad (\text{A.1})$$

Assim, da equação anterior verifica-se que os resíduos de Cmeds são sempre nulos.

Da mesma forma, a matriz inversa de G calculada através de (A.2) pode ser usada na eq. (2.6) para se obter matriz de covariância dos resíduos associados a Cmeds, conforme a seguir indicado:

$$G^{-1} = [(H^t R^{-1})H]^{-1} = H^{-1}(H^t R^{-1})^{-1} = H^{-1}R(H^t)^{-1} \quad (\text{A.2})$$

$$E = R - HH^{-1}R(H^t)^{-1}H^t = 0 \quad (\text{A.3})$$

Portanto, a matriz de covariância dos resíduos da estimação de Cmeds é nula.

A.2 Conjuntos Críticos (Cconjs)

O vetor resíduo da estimação r é obtido a partir do seguinte desenvolvimento:

$$\begin{aligned} r &= z - \hat{z} = z - H\hat{x} = z - HG^{-1}H^tR^{-1}z = z - H(H^tR^{-1}H)^{-1}H^tR^{-1}z = \\ &= [R - H(H^tR^{-1}H)^{-1}H^t]R^{-1}z \end{aligned}$$

Usando a matriz E , dada pela eq. (2.6), na equação anterior, vem:

$$r = ER^{-1}z \quad (\text{A.4})$$

Escolha um par qualquer de componentes de r (e.g., aqueles associados às medidas de índices k e j):

$$r(k) = \sum_{s=1}^m E(k,s)R(s,s)^{-1}z(s) \quad (\text{A.5})$$

$$r(j) = \sum_{s=1}^m E(j,s)R(s,s)^{-1}z(s)$$

Admita agora que todos os elementos do vetor z pertençam a um único Cconj. Note que neste caso, se qualquer das medidas pertencentes a z tornar-se indisponível, por exemplo, $z(i)$, então todas as remanescentes passarão a ser Cmeds. Consequentemente, com tal indisponibilidade, a nova matriz de covariância dos resíduos E' apresentará elementos $E'(k,j)$ nulos. Sabe-se também que a matriz E' pode ser obtida através da Redução de Kron pela seguinte expressão:

$$E'(k,j) = E(k,j) - E(k,i)E(i,i)^{-1}E(i,j) \quad (\text{A.6})$$

Como $E'(k,j) = 0$, usando-se (A.6) vem:

$$E(k,j) = E(k,i)E(i,i)^{-1}E(i,j) \quad (\text{A.7})$$

Dado que a matriz E é simétrica, para seus elementos da diagonal, fazendo $k = j$ em (A.7), encontram-se:

$$E(j,j) = E(j,i)E(i,i)^{-1}E(i,j) \Rightarrow E(j,j) = E(j,i)^2 E(i,i)^{-1} \quad (\text{A.8})$$

$$E(k,k) = E(k,i)E(i,i)^{-1}E(i,k) \Rightarrow E(k,k) = E(k,i)^2 E(i,i)^{-1} \quad (\text{A.9})$$

Substituindo-se $E(k, s)$ e $E(j, s)$ em (A.5) usando (A.7):

$$r(k) = E(k, i)E(i, i)^{-1} \sum_{s=1}^m E(i, s)R(s, s)^{-1}z(s) \quad (\text{A.10})$$

$$r(j) = E(j, i)E(i, i)^{-1} \sum_{s=1}^m E(i, s)R(s, s)^{-1}z(s)$$

Normalizando os resíduos em (A.10) de acordo com a eq. (2.5) e estabelecendo a relação ρ_{kj} entre estes:

$$\rho_{kj} = \frac{r_N(k)}{r_N(j)} = \frac{|r(k)|/\sqrt{E(k,k)}}{|r(j)|/\sqrt{E(j,j)}} = \frac{|E(k,i)|\sqrt{E(j,j)}}{|E(j,i)|\sqrt{E(k,k)}} \quad (\text{A.11})$$

Substituindo (A.8) e (A.9) em (A.11), vem:

$$\rho_{kj} = \frac{r_N(k)}{r_N(j)} = 1 \quad (\text{A.12})$$

De acordo com (A.7), (A.8) e (A.9), para qualquer par de medidas (k, j) pertencentes a um Cconj, a seguinte relação entre os elementos da matriz E é válida:

$$E(k, k) E(j, j) = E(k, j)^2 \quad (\text{A.13})$$

Definindo o coeficiente de correlação entre resíduos normalizados [Mont99], vem:

$$\gamma_{kj} = \frac{|cov[r_N(k), r_N(j)]|}{\sqrt{var[r_N(k)]}\sqrt{var[r_N(j)]}} = \frac{|E(k, j)|}{\sqrt{E(k, k)}\sqrt{E(j, j)}} \quad (\text{A.14})$$

Usando (A.13) em (A.14), obtém-se:

$$\gamma_{kj} = 1 \quad (\text{A.15})$$

Conclui-se por fim que resíduos normalizados de medidas pertencentes à Cconjs são sempre iguais e apresentam máximo coeficiente de correlação.

Apêndice B

ObservApp

Este apêndice descreve as principais características do aplicativo computacional desenvolvido nesta Tese para a avaliação de criticalidades de redes elétricas de potência observáveis, denominado **ObservApp** (*Observability Analysis Application*).

B.1. Descrição Geral

De modo a se avaliar a observabilidade de sistemas de medição foi desenvolvido nesta Tese um aplicativo computacional que permite ao usuário através de interfaces amigáveis para entrada de dados, definir planos de medição para diversas configurações da rede elétrica em estudo.

Ao longo deste Apêndice serão descritas a estrutura do aplicativo e suas principais funcionalidades do aplicativo **ObservApp**, sendo as seguintes funcionalidades , a saber:

- Opções de Topologia;
- Criação de novos cenários topológicos;
- Definição do sistema de medição;
- Apresentação de criticalidades identificadas pela análise de observabilidade;
- Apresentação de índices de observabilidade;

B2. Estrutura do aplicativo

Tendo em vista a construção de um aplicativo bem estruturado e confiável para análise de observabilidade, se foram consideradas algumas funcionalidades trazidas do aplicativo PlanMed desenvolvido em [Tafu06].

O aplicativo **ObservApp** foi desenvolvido nas Linguagens de Programação Visual Basic .Net 2008 e Intel Visual Fortran 11.1 com IMSL Library, tendo sido projetado para trabalhar em sistemas operacionais da Microsoft a partir da versão “Windows Vista” com Framework .Net 2.0 ou superior.

Para facilitar a manipulação de dados utiliza-se um banco de dados Microsoft Access, que permite o armazenamento de configurações da rede usadas pelo aplicativo, assim como o armazenamento de diversos casos de interesse de maneira simples.

A estrutura modular do aplicativo é apresentada na Figura B.1. A interface gráfica do aplicativo permitirá a definição da configuração da topologia e sistema de medição, sendo processados utilizando funções matemáticas desenvolvidas em um módulo dll (Dynamic Link Library) em Fortran para a análise de observabilidade. As informações de criticalidades e indicadores obtidas do processamento serão armazenados em um banco de dados e apresentados na interface gráfica do aplicativo.

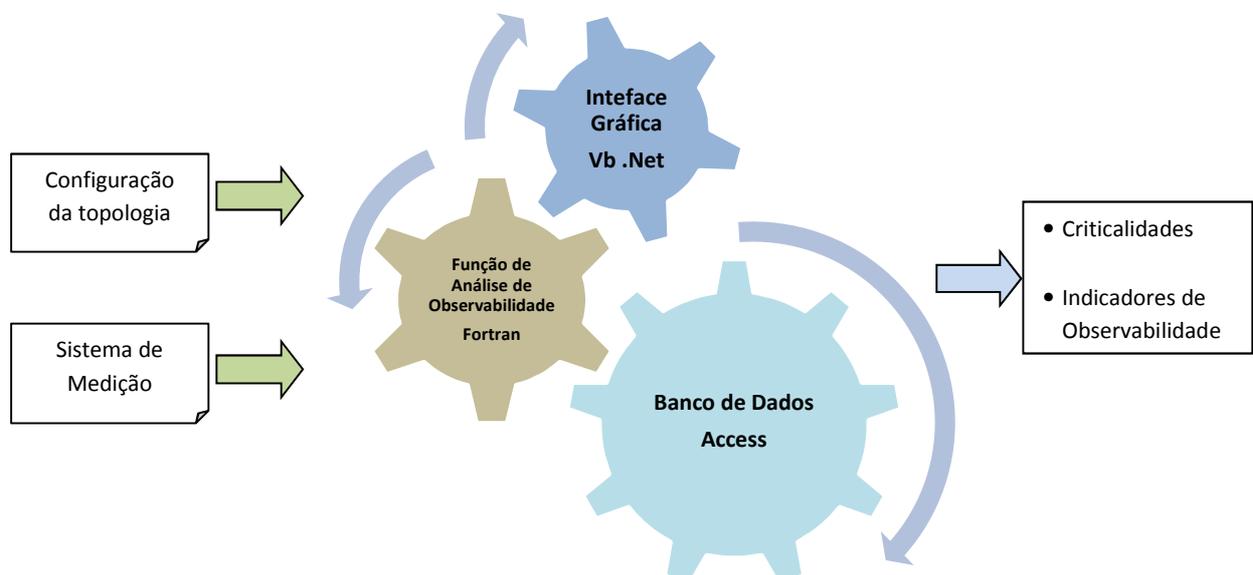


Figura B.1. Estrutura de Componentes do aplicativo **ObservApp**

B.3. Diagrama de Classes

O aplicativo **ObservApp** foi construído com base na metodologia de orientação a objetos, que permite sua estruturação modular em classes e objetos. As principais classes são: Barra, Linha, Medidor, Caso topológico e Indicadores (contém a configuração da rede e o plano de medição a ser analisado). A Figura B.2. apresenta a estrutura de classes que compõe o sistema.

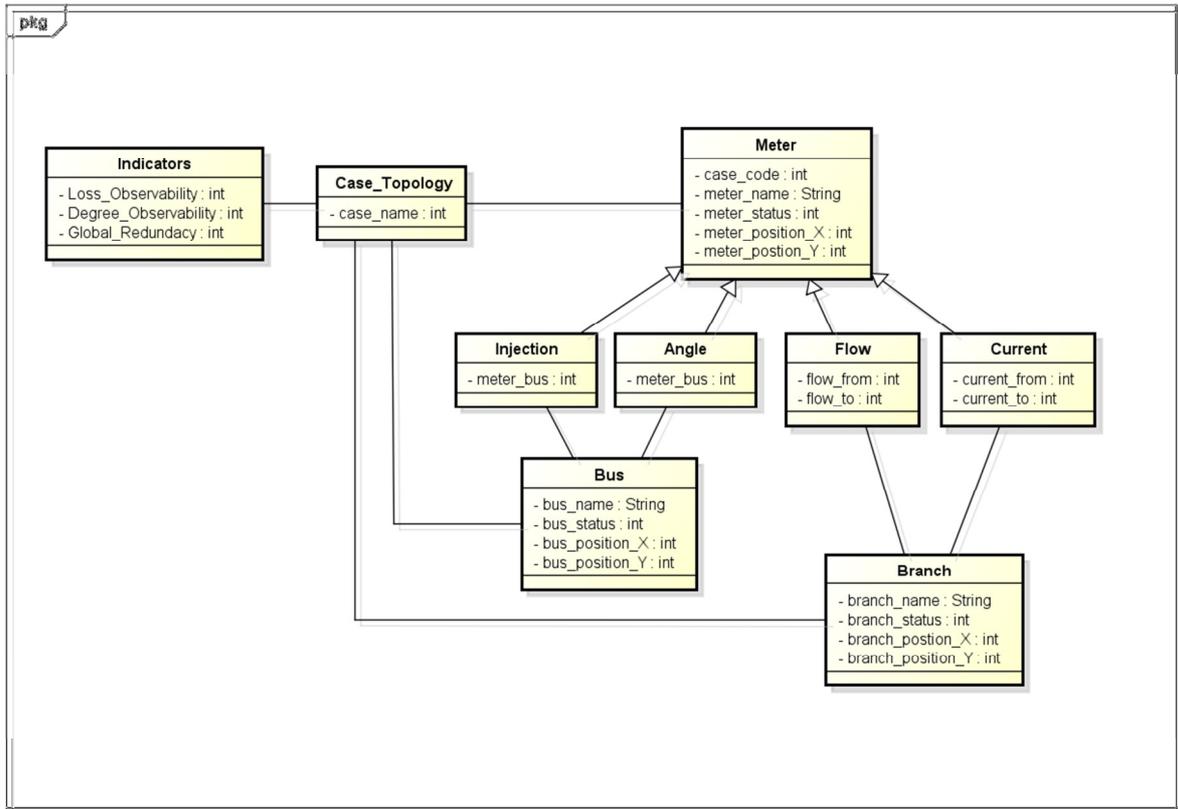


Figura B.2. Diagrama de Classes do aplicativo **ObservApp**

B.4. Funcionalidades

B.4.1. Opções Iniciais

Quando o aplicativo é carregado a tela inicial apresenta opções de casos-teste que poderão ser usados, bem como permite, criar um novo caso de interesse ou importar um caso previamente armazenado.

- **Carregar um caso armazenado no Banco de Dados** - possibilita ao usuário escolher casos aqueles que previamente foram armazenados, tais como os que se baseiam nos sistemas IEEE 14, 30, 57 e 118 barras.
- **Criar um novo cenário topológico** - permite que o usuário defina a configuração da rede em estudo (barras e ramos). A ferramenta permitirá desenhar uma topologia de acordo com o interesse e preferência do usuário.
- **Importar**, facilita a importação de configurações de rede anteriormente criados.

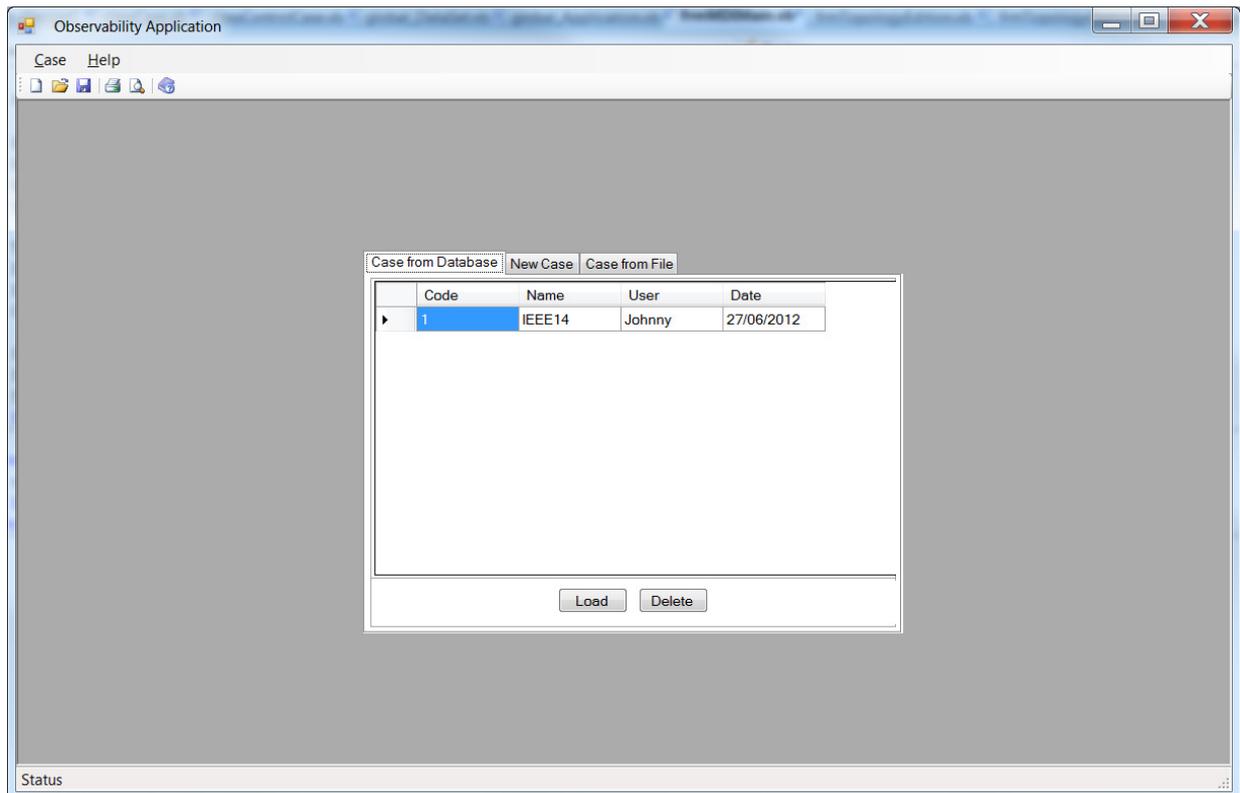


Figura B.3. Tela Inicial.

B.4.2. Criação de casos novos

Para a criação de casos novos deve-se inicialmente definir um código e nome para o caso, assim como opcionalmente preencher o nome do usuário que o criará.

No menu de criação de novas topologias, mostrado na Figura B.4., o usuário poderá: adicionar, mover, apagar, rotacionar e alinhar a barra inserida, assim como poderá acrescentar ramos entre as barras com seu respectivo alinhamento. O aplicativo atualiza o número de linhas e barras adicionadas na topologia, na aba "Case". Após a criação da topologia o usuário deverá salvá-la usando o botão "Save Topology", para que esteja pronta para utilizá-la.

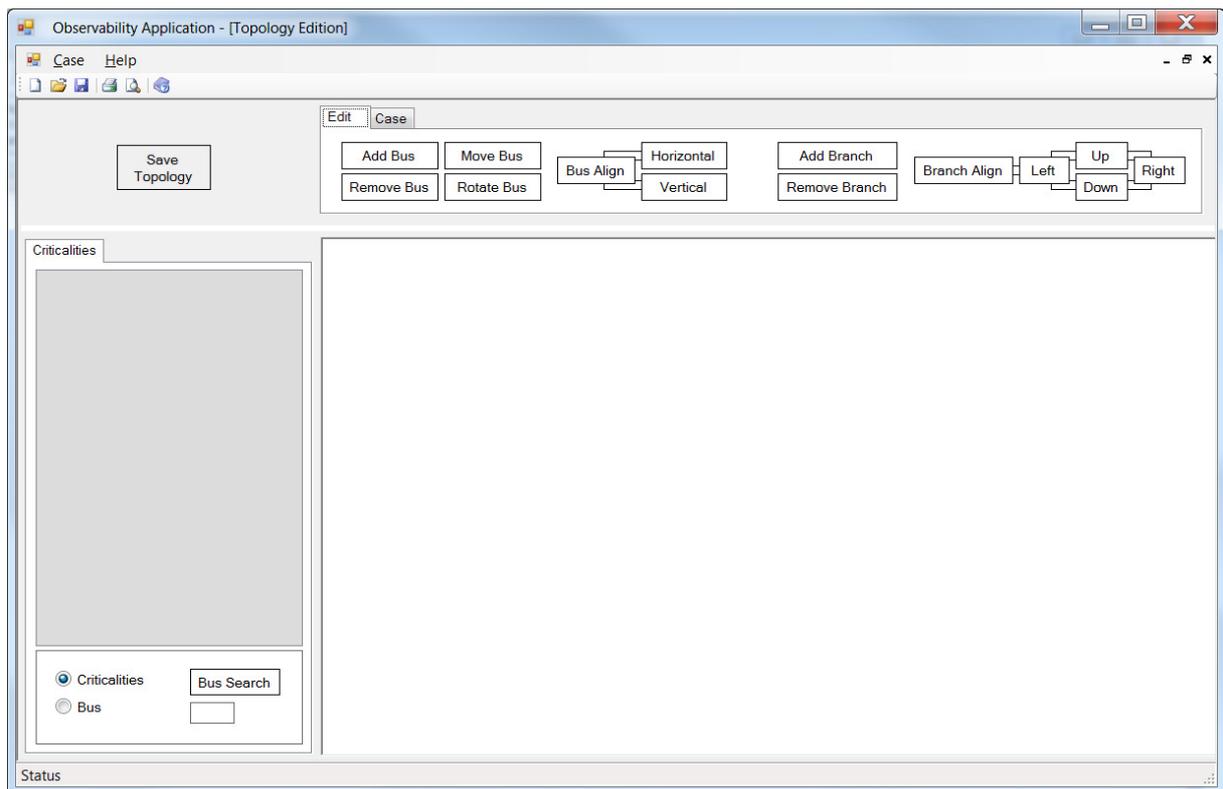


Figura B.4. Janela de opções para criação de novo caso.

Adição de barras: permite que o usuário adicione barras tanto nas direções horizontal e vertical, clicando-se com o botão direito na posição desejada da tela. Para trocar a orientação da barra deverá pressionar o botão direito do mouse.

Adição de ramos: possibilita inserir ramos entre duas barras, sendo necessário clicar com botão esquerdo primeiramente na barra de origem e depois na barra de destino. Para confirmar a adição do ramo, deve-se clicar com botão esquerdo no indicador quadrangular preto criado no meio do ramo, como ilustra a Figura B.5.

Alinhamento de Ramos: facilita a localização dos ramos adicionados, de modo a se alcançar uma melhor visualização do diagrama construído. Para realizar o alinhamento deve-se clicar com botão esquerdo no indicador quadrangular azul posicionado nos extremos do ramo. Após selecionado, este ficará vermelho, como mostra a Figura B.6, possibilitando a utilização dos controles “Up”, “Down”, “Left” e “Right” localizados na parte superior da tela para a movimentação da extremidade do ramo. Para localizar facilmente o ramo, poderá se selecionar na árvore localizada na parte esquerda da tela os ramos associados às barras.

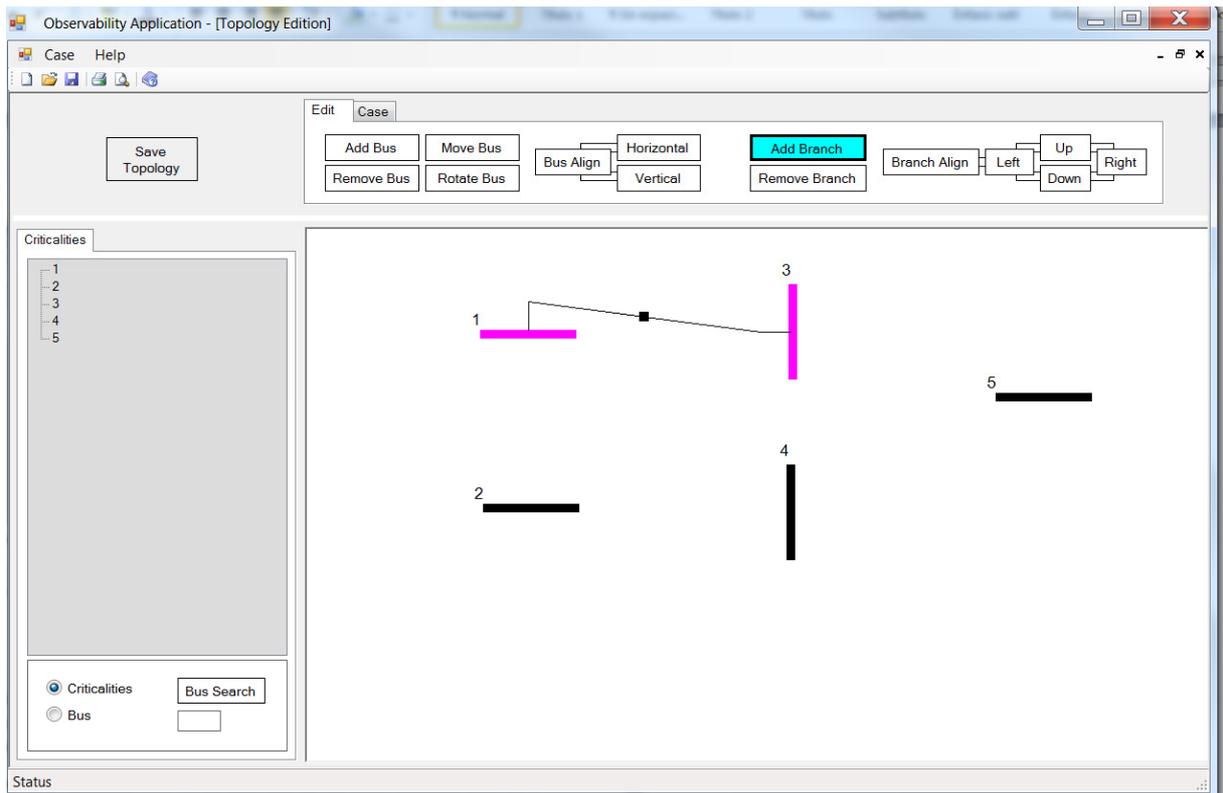


Figura B.5. Exemplo de adição de ramo entre a barra 1 e 3.

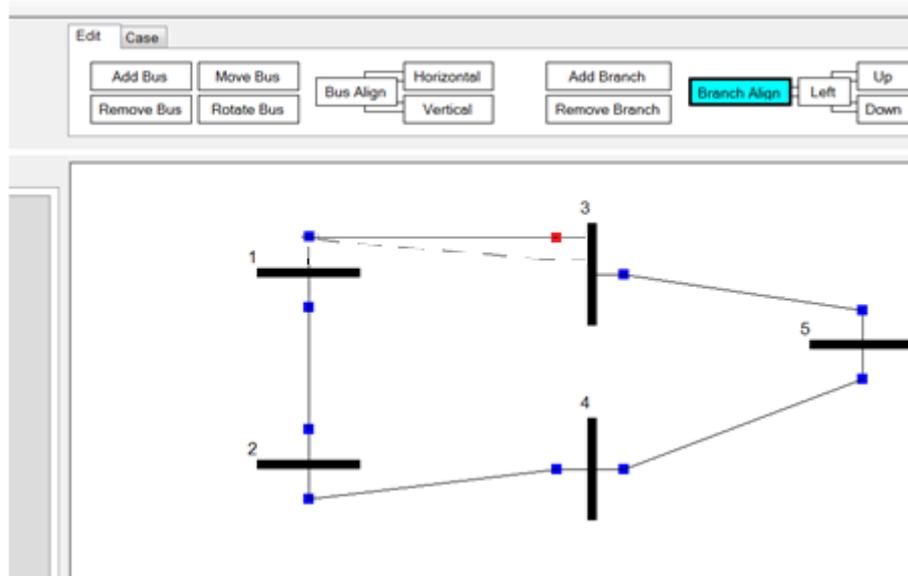


Figura B.6. Exemplo de alinhamento de ramos

B.4.3. Sistema de Medição

Para definir um sistema de medição, o usuário poderá escolher entre os seguintes tipos de medidores: Injeção de potência, Fluxo de potência, Corrente de ramo ou Ângulo da Tensão. Cada medidor é representado por um símbolo próprio: medidores de injeção corresponderão a uma seta apontando para baixo do lado direito da barra; medidores de fluxo serão representados por um círculo vazio em cada extremidade do ramo; medidores de ângulo de tensão corresponderão um quadrado vermelho vazio no lado esquerdo da barra; medidores de corrente de ramo estão representados por um losango preto perto de cada extremo do ramo. Para selecionar um medidor, basta clicar com botão esquerdo do mouse acima do medidor e a cor verde claro indicará que o medidor foi selecionado. Na Figura B.7., encontra-se uma configuração de medidores da rede do sistema IEEE 14 barras.

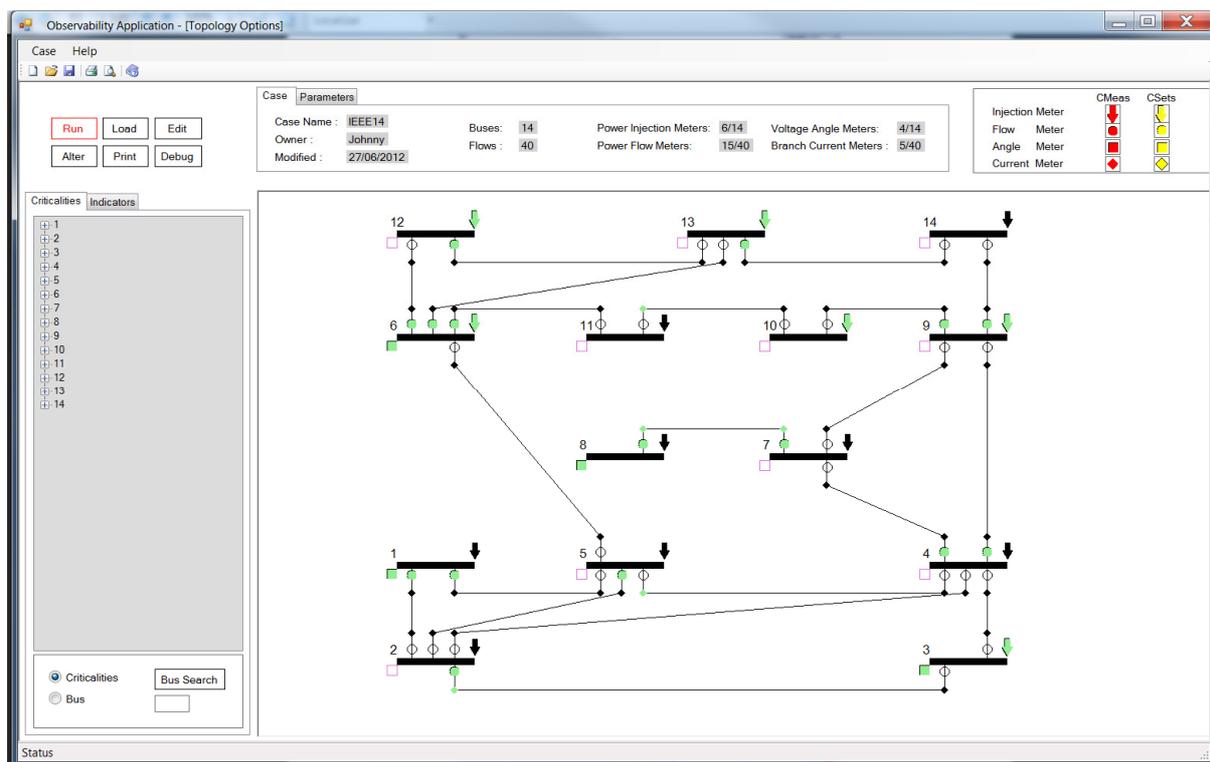


Figura B.7. Exemplo de seleção de medidores.

B.4.4 Alteração de Configuração da Rede

Para a alteração do status de um ramo clicam-se na aba “Parameters” localizada na parte superior da janela; em seguida ativa-se a opção “Edit Branch Status” que fará surgir um indicador quadrangular preto com a finalidade de remover ou incluir um ramo. Quando o ramo estiver ausente da topologia, esse apresentará uma cor cinza. Na Figura B.8 mostra-se a remoção do ramo entre as barra 4 e 9.

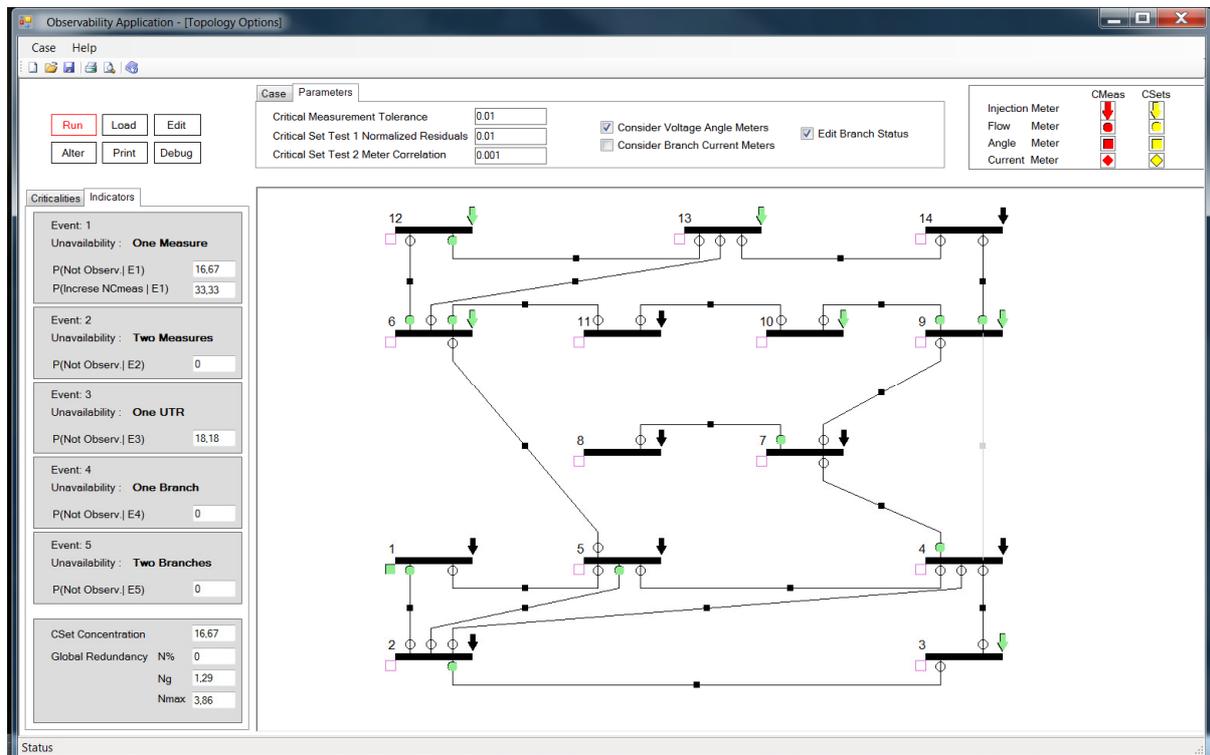


Figura B.8. Exemplo de alteração do status do ramo 4 - 9.

B.4.5 Exibição de Resultados

Para poder exibir os resultados produzidos pelo aplicativo, após escolher os medidores do plano de medição, deve-se clicar com botão direito na opção de “Run”, localizada na parte superior esquerda da janela. Se a configuração de medidores selecionada resultar em uma rede observável, o sistema apresentará o resultado gráfico das criticalidades encontradas no plano de medição escolhido. Os medidores mudarão de cor, representando a criticalidade encontrada na análise de observabilidade.

As seguintes cores foram adotadas como ilustra a Figura B.9.:

- Medidores redundantes – azul clara;
- Medidores críticos – vermelha;
- Medidores presentes em conjuntos críticos – amarela;

Para as barras, a escolha de cores será a seguinte:

- Barras sem medidores – Cor preta;
- Barras críticas – Cor vermelha;
- Barras não críticas – Cor azul clara;

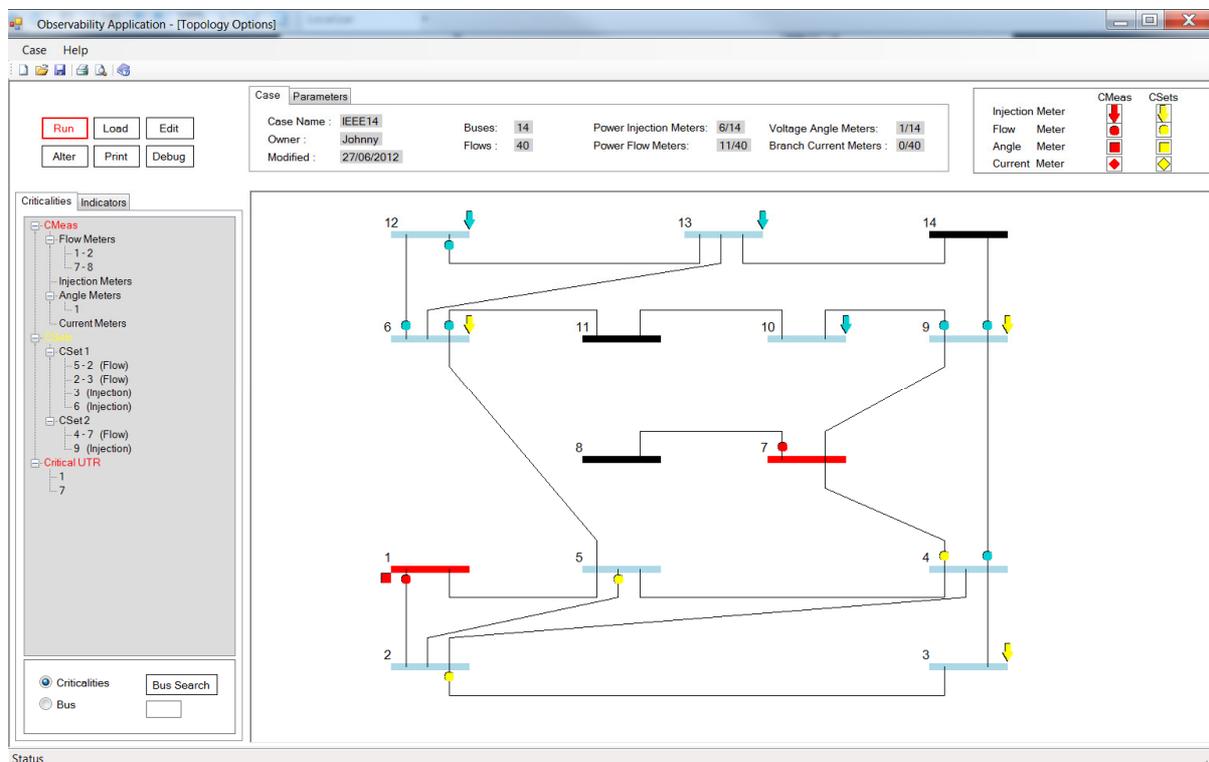


Figura B.9. Exemplo de resultados na forma gráfica

Na janela de resultados, também se pode visualizar, no lado esquerdo, uma árvore de informações agrupadas por criticalidade ou por barra, onde se mostram as medidas e as criticalidades encontradas após a análise de observabilidade (ver Figura B.10).

Na aba superior do quadro lateral esquerdo da Figura B.10, encontram-se os indicadores de observabilidade calculados pelo aplicativo.

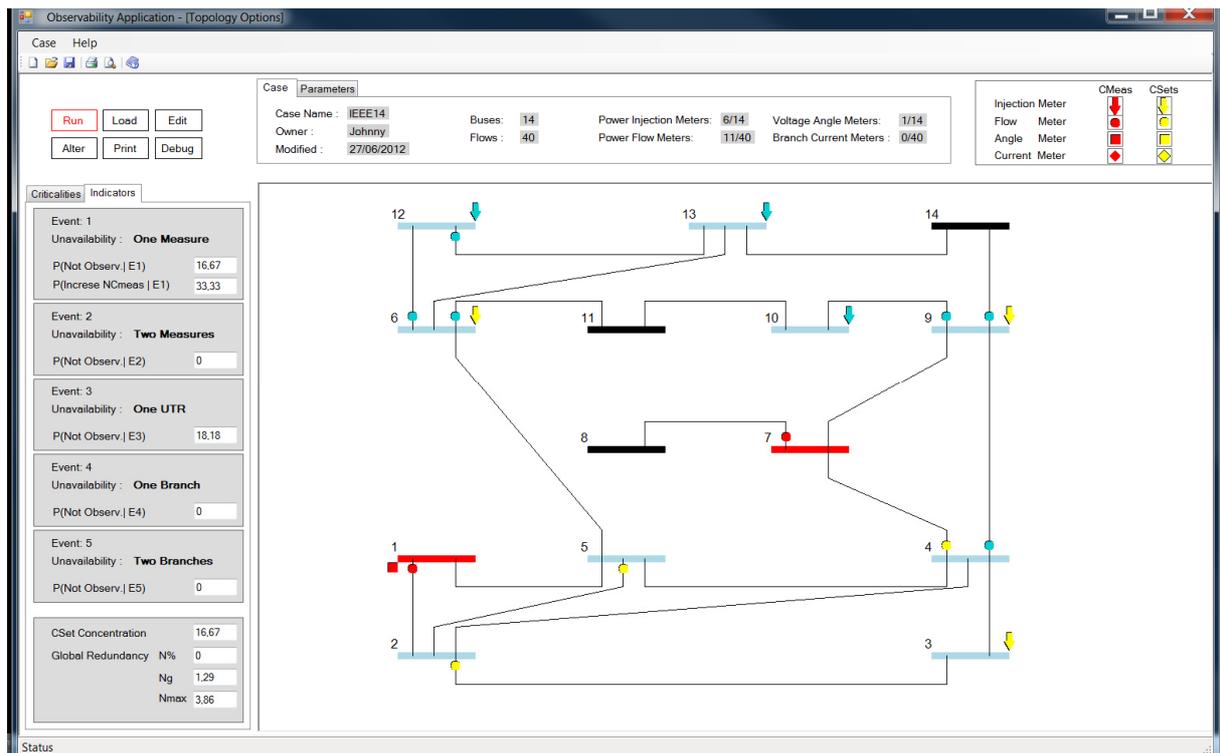


Figura B.10. Indicadores de observabilidade para sistema de medição analisado.

B.4.6 Menu de opções

O aplicativo **ObservApp** oferece opções tais como: alterar uma configuração de rede, imprimir o diagrama, salvar casos adicionais a partir de um caso presente, ver detalhes do processo de execução do cálculo de criticalidades e indicadores. Estas opções encontram-se localizadas na parte superior esquerda da janela apresentada na Figura B.10. No menu localizado na parte superior da janela também é possível: abrir, salvar, fechar e imprimir os dados da rede em estudo.

Apêndice C

Sistemas IEEE

Este apêndice apresenta, de forma sintética, os resultados obtidos com **ObservApp**, referentes aos sistemas IEEE 24, 30, 57 e 118 barras, complementarmente àqueles descritos no Capítulo 5.

C.1. Sistema IEEE 24 Barras

A Figura C.1 ilustra as criticalidades encontradas pelo aplicativo para o sistema IEEE 24 barras e 66 linhas. A Figura C.2 apresenta os indicadores correspondentes.

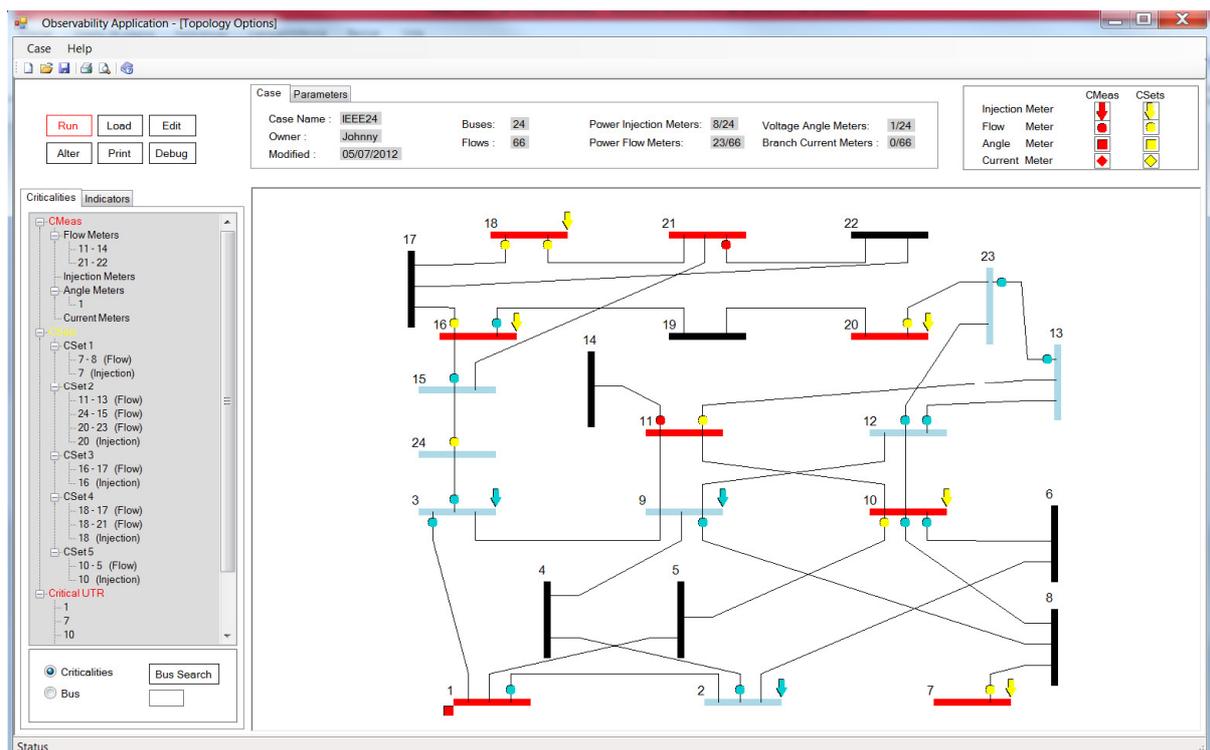


Figura C.1. Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 24 barras.

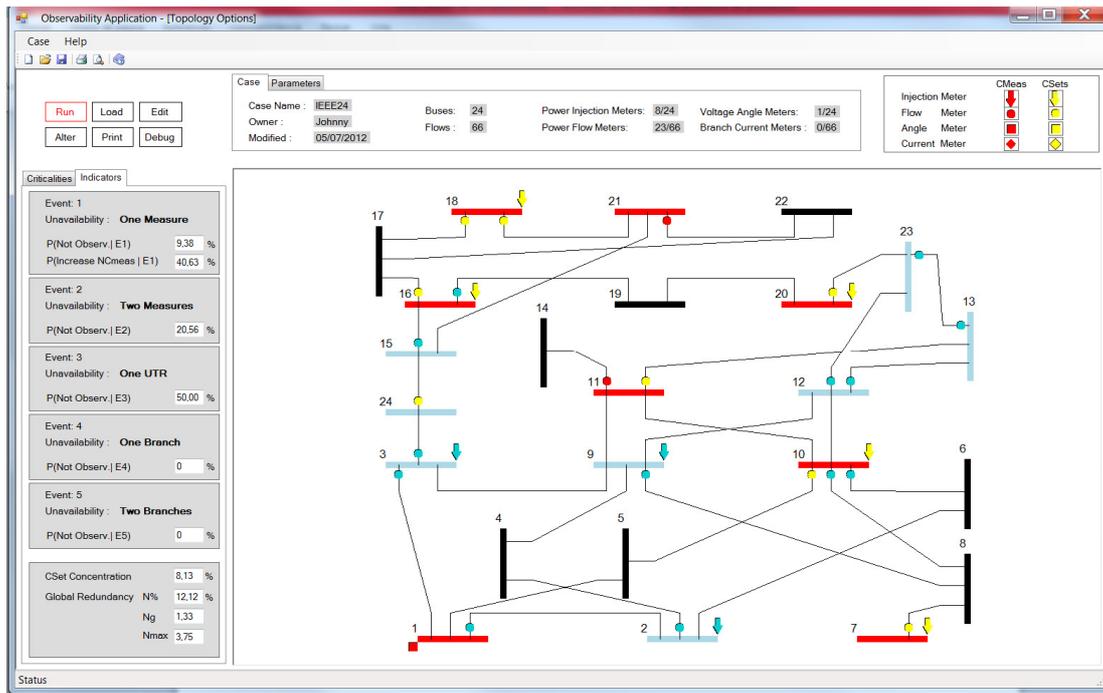


Figura C.2. Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 24 barras.

C.2. Sistema IEEE 30 Barras

A Figura C.3 ilustra as criticalidades encontradas pelo aplicativo em um sistema IEEE 30 barras e 82 linhas. A Figura C.4 apresenta os indicadores calculados.

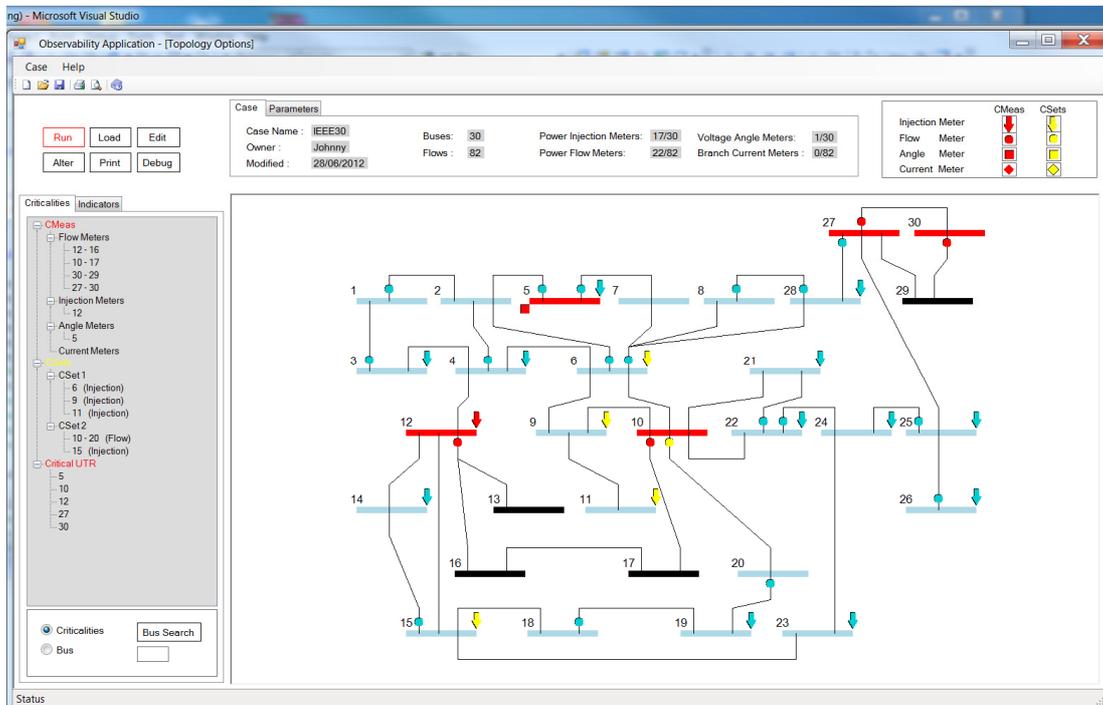


Figura C.3. Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 30 barras.

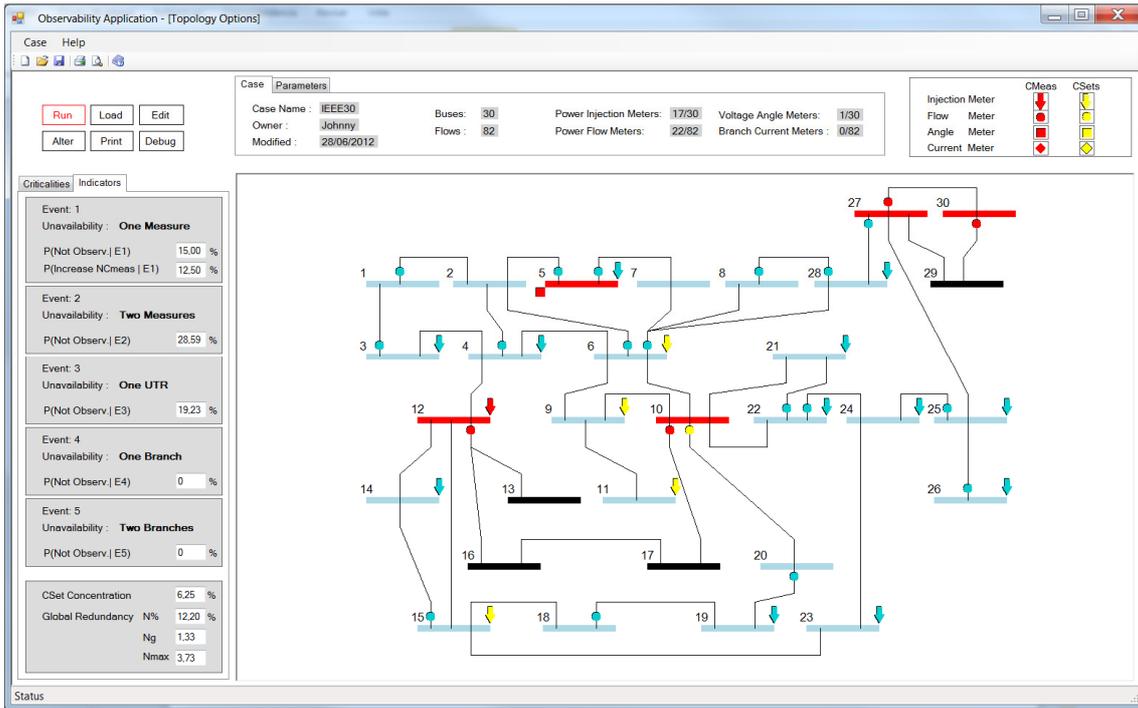


Figura C.4. Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 30 barras.

C.3 Caso Sistema 57 Barras

A Figura C.5 ilustra as criticalidades de um plano de medição em um sistema IEEE 57 barras e 156 linhas. A Figura C.6 apresenta os respectivos indicadores.

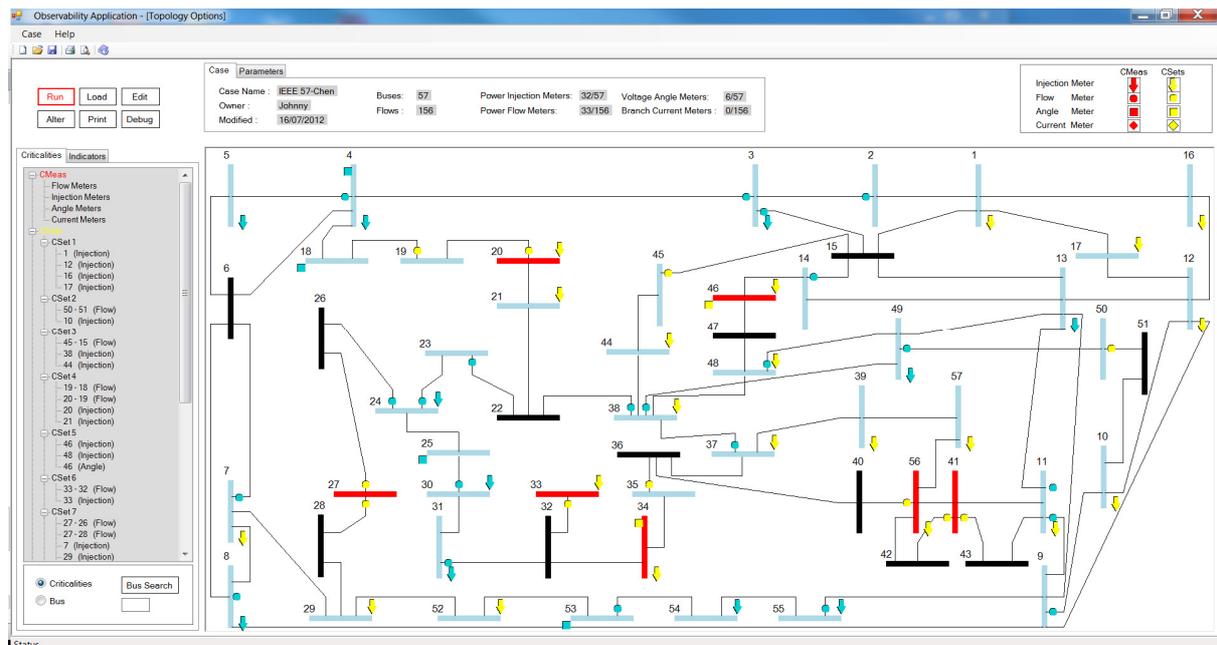


Figura C.5. Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 57 barras.

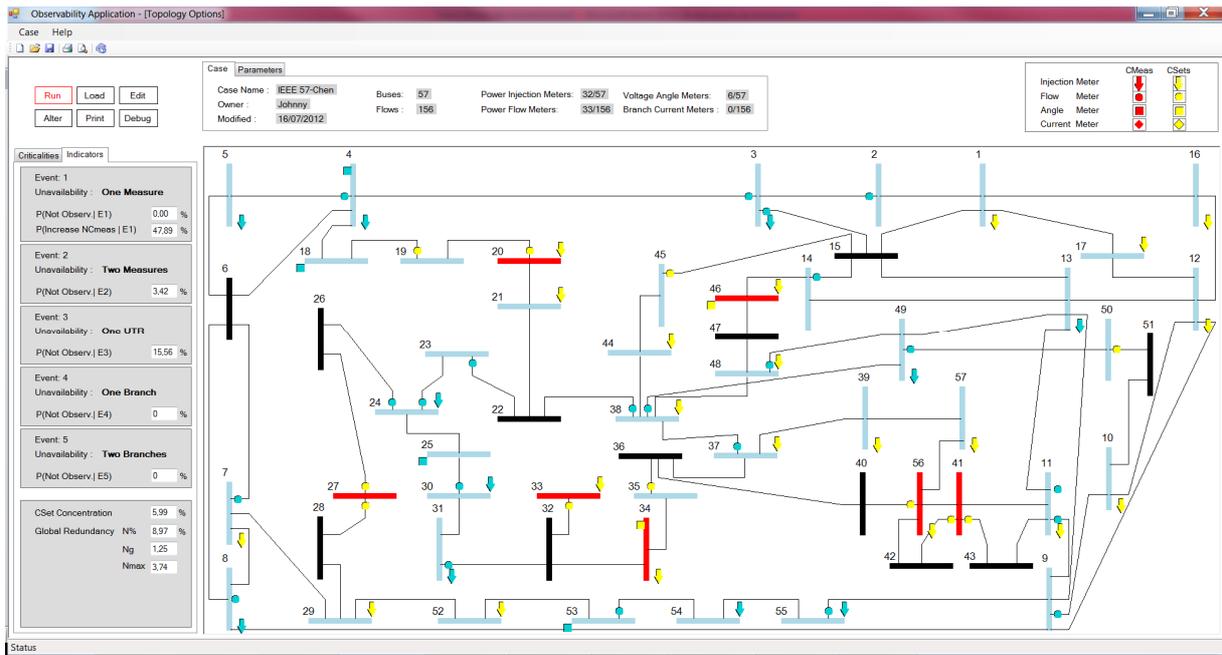


Figura C.6. Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 57 barras.

C.4. Sistema IEEE 118 Barras

A Figura C.7 ilustra as criticalidades de um plano de medição em um sistema IEEE 118 barras e 358 linhas. A Figura C.8 apresenta os respectivos indicadores.

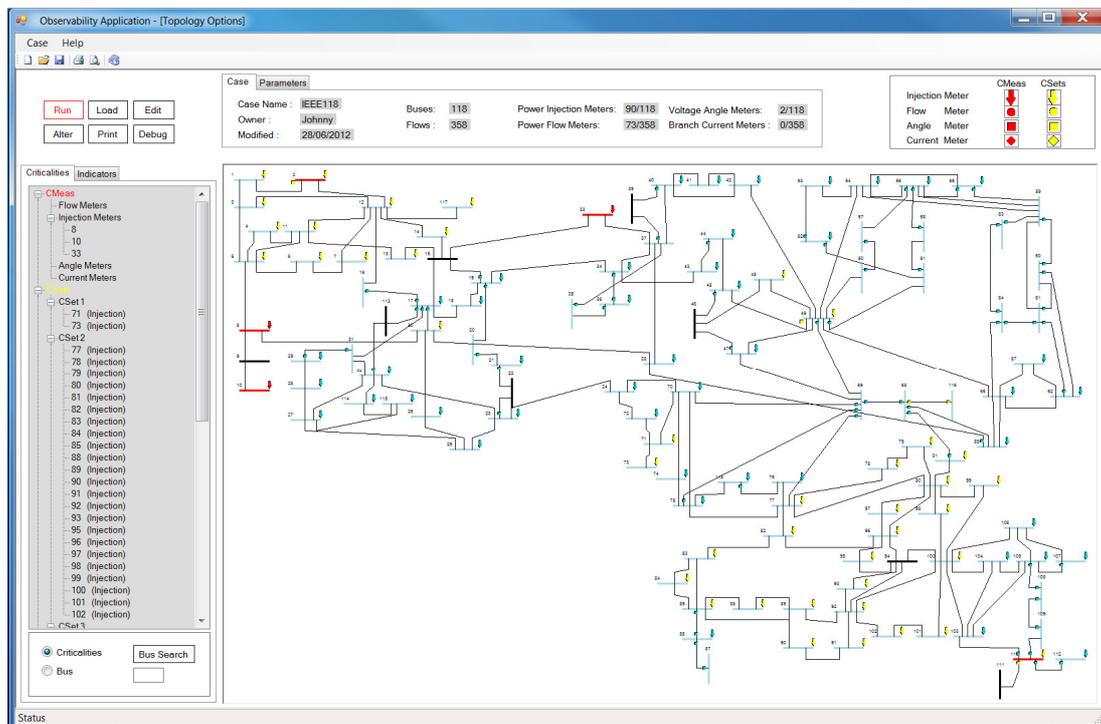


Figura C.7. Criticalidades no plano de medição do sistema IEEE 118 barras.

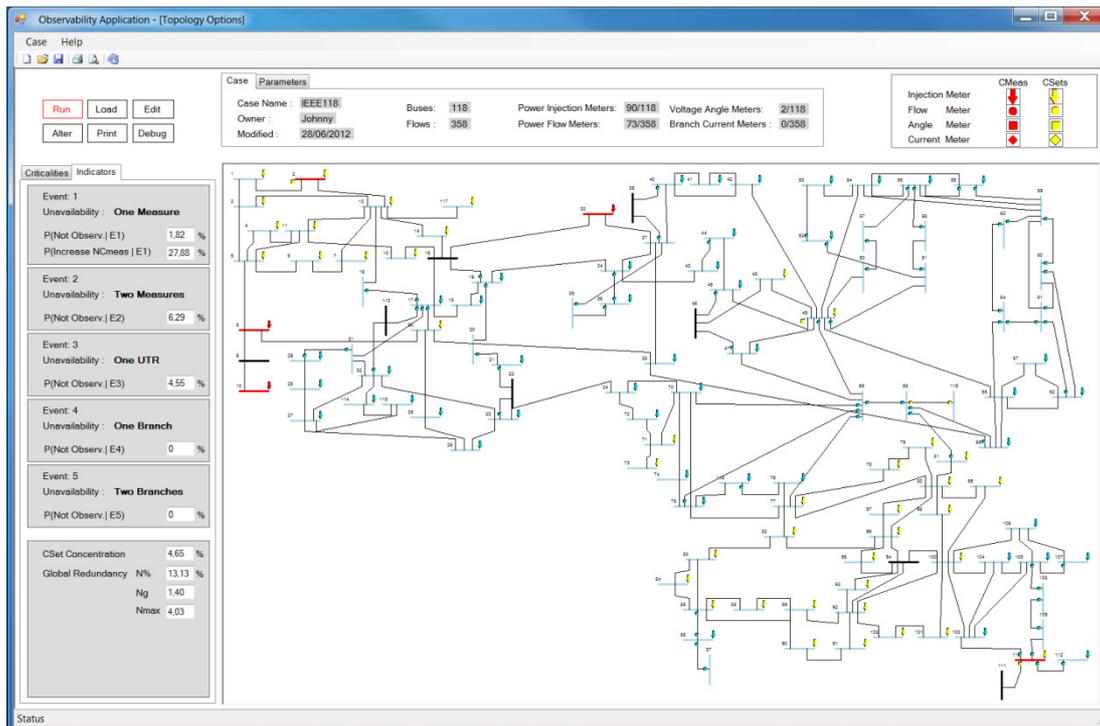


Figura C.8. Indicadores do plano de medição do sistema IEEE 118 barras.

Referências Bibliográficas

- [Abur95] A. Abur, A. G. Expósito, "Algorithm for determining phase-angle observability in the presence of line-current-magnitude measurements", Proc. IEE Gen., Trans., Distrib., vol. 142, no. 5, pp. 453–458, Sept. 1995.
- [Abur97] A. Abur, A. G. Expósito, "Detecting multiple solutions in state estimation in the presence of current magnitude measurements," IEEE Trans. Power Syst., vol. 12, no. 1, pp. 370–375, Feb. 1997.
- [Abur04] A. Abur, A. G. Expósito, "Power system state estimation—theory and implementation", New York, Marcel Dekker, 2004.
- [Alle80] J. J. Allemong, G. D. Irisarri, A. M. Sasson, "An examination of solvability for state estimation algorithms", Paper A80008-3, IEEE PES Winter Meeting, New York, NY, 1980.
- [Alme08a] M. C. de Almeida, E. N. Asada, A. V. Garcia, "On the use of Gram matrix in observability analysis", IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 1, pp. 249–251, Feb. 2008.
- [Alme08b] M. C. de Almeida, E. N. Asada, A. V. Garcia, "Power system observability analysis based on Gram matrix and minimum norm solution", IEEE Trans. Power Syst., vol. 23, no. 4, pp. 1611-1618, Nov. 2008.
- [Alme09] M. C. de Almeida, E. N. Asada, A. V. Garcia, "Identifying critical sets in state estimation using Gram matrix", IEEE Power Tech Conf., Bucharest – Romania, pp. 1-5, Jun./Jul. 2009.
- [Ayre86] M. Ayres, P. H. Haley, "Bad data groups in power system state estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. PWRS-I, Aug. 1986.
- [Bobb10] R. B. Bobba, K. M. Rogers, Q. Wang, H. Khurana, K. Nahrstedt, T. J. Overbye, "Detecting false data injection attacks on DC state estimation", 1st Workshop on Secure Control Syst. (SCS), CPSWEEK 2010, Stockholm - Sweden, pp. 1-9, Apr. 2010.

- [**Caro11**] E. Caro, A. J. Conejo, R. Mínguez, M. Zima, and G. Andersson, "Multiple bad data identification considering measurement dependencies", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 1953-1961, Nov. 2011.
- [**Cast05**] E. Castillo, A. J. Conejo, R. E. Pruneda, C. Solares, "State estimation observability based on the null space of the measurement Jacobian matrix", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 3, pp. 1656–1658, Aug. 2005.
- [**Cast06**] E. Castillo, A. J. Conejo, R. E. Pruneda, C. Solares, "Observability analysis in state estimation: A unified numerical approach", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 2, pp. 877–886, May 2006.
- [**Cast08**] E. Castillo, A. J. Conejo, R. E. Pruneda, C. Solares, J. M. Menéndez, "m - k robust observability in state estimation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 296-305, May 2008.
- [**Chen90**] R. L. Chen, "A fast integer algorithm for observability analysis using network topology", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol.5, no. 3, pp. 1001-1009, Aug. 1990.
- [**Chen06**] J. Chen, A. Abur, "Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1608-1615, Nov. 2006.
- [**Chen08**] J. Chen, A. Abur, "Enhanced topology error processing via optimal measurement design", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 845-852, Aug. 2008.
- [**Clem75**] K. A. Clements, B. F. Wollenberg, "An algorithm for observability determination in power system state estimation", in *Proc. IEEE PES Summer Meeting, San Francisco, CA*, paper A75 447-3, Jul. 1975.
- [**Clem81**] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, "Power system state estimation residual analysis: an algorithm using network topology", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 100, no. 4, pp. 1779-1787, Apr. 1981.
- [**Clem82**] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P.W. Davis, "Power system state estimation with measurement deficiency: an algorithm that determines the maximal observable network", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 101, no. 9, pp. 3044-3052, Sept. 1982.
- [**Clem83**] K. A. Clements, G. R. Krumpholz, P. W. Davis, "Power system state estimation with measurement deficiency: An observability/measurement placement

- algorithm", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-102, no. 7, pp. 2012–2020, Jul. 1983.
- [Clem86] K. A. Clements, P. W. Davis "Multiple bad data detectability and identifiability: a geometric approach", IEEE Trans. Power Deliv., vol. 1, no. 3, pp. 355–360, Jul. 1986.
- [Clem88] K. A. Clements, P. W. Davis, "Detection and identification of topology errors in electric power systems", IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 4, pp 1748-1753, Nov. 1988.
- [Cont88] G. C. Contaxis, G. N. Korres, "A reduced model for power system observability analysis and restoration", IEEE Trans. Power Syst., pp. 1411–1417, Abr. 1988.
- [Cout99] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, R. S. G. Matos, M. Th. Schilling, "Strategies for preserving data redundancy in power system state estimation", Proc. 13th Power Systems Computation Conference (PSCC), Trondheim, Norway, pp. 441-447, Jul. 1999.
- [Cout90] M. B. Do Coutto Filho, A. M. Leite da Silva, and D. M. Falcão, "Bibliography on power system state estimation (1968-1989)", IEEE Trans. Power Syst., vol.5, no. 3, pp. 950-961, Aug. 1990.
- [Cout01] M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, F. M. F. Oliveira, M. Th. Schilling, "Identifying critical measurements & sets for power system state estimation", Proc. IEEE Porto Power Tech Conf., Porto, Portugal, paper 149, Sept. 2001.
- [Cout07] M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini De Souza, M. Th. Schilling, "Handling critical data and observability", Electric Power Components and Systems, vol. 35, Issue 5, pp. 553 - 573, May 2007.
- [Cout09] M. B. Do Coutto Filho, J. C. Stacchini de Souza, Johnny E. Villavicencio Tafur, "Indicators of critical conditions for state estimation", IEEE Power & Energy Society General Meeting, Proc. IEEE PES General Meeting, vol.1, pp.1-6, Calgary, 2009.
- [Crai90] E. D. Crainic, H. P. Horisberger, X. D. Do, D. Mukhedkar, "Power network observability: the assesment of the measurement system strength", IEEE Trans. Power Syst., vol. 5, no. 4, Nov. 1990.

- [Ding07] Q. Ding, V.A. Emesih, "A simple factorization-based observability analysis and meter placement method", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, pp.731-737, Dec. 2007.
- [Emam10] R. Emami, A. Abur, "Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 38-43, Feb. 2010.
- [Expo98] A. G. Expósito, A. Abur, "Generalized observability analysis and measurement classification", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 13, no. 3, pp. 1090–1095, Aug. 1998.
- [Expo11] A. G. Expósito, A. Abur, P. Rousseaux, A. Villa Jaén, C. Gómez-Quiles, "On the use of PMUs in power systems state estimation", in *Proc 17th Power System Computation Conference. (PSCC)*, Stockholm, Sweden, Aug, 2011.
- [Falc94] D. M. Falcão, M. A. Arias, "State estimation and observability analysis based on echelon forms of the linearized measurement models", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 979–987, May 1994.
- [Gou00] B. Gou, A. Abur, "A direct numerical method for observability analysis", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 15, no. 2, pp. 625–630, May 2000.
- [Gou01] B. Gou, A. Abur, "An improved measurement placement algorithm for network observability", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 16, no. 4, pp. 819–824, Nov. 2001.
- [Gou06] B. Gou, "Jacobian matrix based observability analysis for state estimation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 348–356, Feb. 2006.
- [Guim11] M. A. R. Guimaraens, "Conjunção de Medidas Convencionais e Fasoriais para Processamento de Erros Grosseiros na Estimção de Estado em Sistemas de Potência", *Dissertação de Mestrado, IC/UFF*, Out. 2011.
- [Hort77] J. S. Horton, R. D. Masiello, "On-line decoupled observability processing", *PICA Proc.*, Toronto, Ontario, pp. 420-426, 1977.
- [IEEE79] IEEE APM Subcommittee, "IEEE reliability test system", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-99, pp. 2047-2054, Nov./Dec. 1979.
- [Kats03] P. J. Katsikas, G. N. Korres, "Unified observability analysis and measurement placement in generalized state estimation", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 1, pp. 324–333, Feb. 2003.

- [Korr91] G. N. Korres, G. C. Contaxis, "Identification and updating of minimally dependent sets of measurements in state estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 3, pp. 999–1005, Aug. 1991.
- [Korr03a] G. N. Korres, P. J. Katsikas, K. A. Clements, P. W. Davis, "Numerical observability analysis based on network graph theory", IEEE Trans. Power Syst., vol. 18, no. 3, pp. 1035–1045, Aug. 2003.
- [Korr03b] G. N. Korres, P. J. Katsikas, "A hybrid method for observability analysis using a reduced network graph theory", IEEE Trans. Power Syst. vol. 18, pp. 295–304. Jan. 2003.
- [Korr05] G. N. Korres, P. J. Katsikas, "Reduced model for numerical observability analysis in generalized state estimation", Proc. IEE Gen., Transm., Distrib., vol. 152, no. 1, pp. 99–108, Jan. 2005.
- [Kosu11] O. Kosut, L. Jia, R. J. Thomas, L. Tong, "Malicious Data Attacks on the Smart Grid", IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 4, pp. 645-658, Dec. 2011.
- [Krum80] G. R. Krumholz, K. A. Clements, P. W. Davis, "Power system observability: a practical algorithm using network topology", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1534-1542, Jul./Aug. 1980.
- [Lond01] J. B. A. London Jr, L. F. C. Alberto, N. G. Bretas, "Identificação do nível de redundância das medidas para efeito de estimação de estado em sistema de potência", Revista Controle & Automação, vol.12, no.2, Jul. 2001.
- [Lond07] J. B. A. London Jr., L. F. C. Alberto, N. G. Bretas, "Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes", IET Gener. Transm. Distrib., vol. 1, no. 1, pp. 39-45, Jan. 2007.
- [Liu09] Y. Liu, M. Reiter, P. Ning, "False data injection attacks against state estimation in electric power grids", 16th ACM Conf. on Computer and Communication Security, New York – NY, USA, pp 21-32, Nov. 2009.
- [Lond07] J. B. A. London, L. F. C. Alberto, N. G. Bretas, "Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes", IET Proc. Gen., Trans., Distrib., vol. 1, no. 1, pp. 39–45, Jan. 2007.

- [Magn00]** F.H. Magnago, A. Abur, “ A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 15, no. 3, pp. 945-949, Aug. 2000.
- [Mili96]** L. Mili, M. G. Cheniae, N. S. Vichare, P. J. Rousseeuw, “Robust State Estimation based on Projection Statistics”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 11, no. 2, pp. 1118-1127, May 1996.
- [Mont85a]** A. Monticelli, F. F. Wu, “Network observability: Theory”, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 5, pp. 1042–1048, May 1985.
- [Mont85b]** A. Monticelli, F. F. Wu, “Network observability: Identification of observable island and measurement placement”, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 5, pp. 1035–1041, May 1985.
- [Mont86]** A. Monticelli, F. F. Wu, “Observability analysis for orthogonal transformation based state estimation”, IEEE Trans. Power Syst., vol. PWRS-1, no. 1, pp. 201–208, Feb. 1986.
- [Mont99]** A. Monticelli, “State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach”, Kluwer Academic Press, 1999.
- [Mont00]** A. Monticelli, “Electric power system state estimation”, Proc. IEEE, vol. 88, no. 2, pp. 262–282, Feb. 2000.
- [Mora09]** R.M. Moraes, Sincrofasores em sistemas de potência: aplicações na estimação de estado, Tese de Doutorado, IC/UFF, Dez./2009.
- [Mori91]** H. Mori, S. Tsuzuki, “A fast method for topological observability analysis using a minimum spanning tree technique”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 2, pp. 491–500, May 1991.
- [Nuce91]** R. R. Nucera, M. L. Gilles, "Observability analysis: A new topological algorithm", IEEE Trans. Power Syst., vol. 6, no. 2, pp. 466-475, May 1991.
- [Phad08]** A. G. Phadke, J. S. Thorp, Synchronized Phasor Measurements and their Applications, Springer, 2008.
- [Prun10]** R. E. Pruneda, C. Solares, A. J. Conejo, E. Castillo, “An efficient algebraic approach to observability analysis in state estimation”, Electric Power Systems Research, vol. 80, no. 3, pp. 277–286. Mar. 2010.

- [Quin82] V. H. Quintana, A. Simões-Costa, A. Mandel, "Power system observability using a direct graph-theoretic approach," IEEE Trans. Power App.Syst., vol. 101, no. 3, pp. 617-626, Mar. 1982.
- [Roch10] H. R. O. Rocha, Construção de Planos de Medição para a Estimção de Estado em Sistemas de Potência via Metaheurísticas, Tese de Doutorado, IC/UFF, Nov. 2010.
- [Schw70] F. C. Schweppe, J. Wildes, "Power system static state estimation, part I: Exact model", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-89, no. 1, pp. 120–125, Jan. 1970.
- [Simo90] A. Simões-Costa, T. S. Piazza, A. Mandel, "Qualitative methods to solve qualitative problems in power system state estimation", IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 5, no.3, pp. 941-949, Aug. 1990.
- [Simo02] A. Simões-Costa, E. M. Lourenço, K. A. Clements, "Power system topological observability analysis including switching branches", IEEE Trans. Power Syst., vol. 17, no. 2, pp. 250–256, May 2002.
- [Slut87] I. W. Slutsker, J. M. Scudder, "Network observability analysis through measurement jacobian matrix reduction". IEEE PWRS-2, no. 2, pp. 331-338, May 1987.
- [Sola09] C. Solares, A. J. Conejo, E. Castillo, R. E. Pruneda. "A binary-arithmetic approach to observability checking in state estimation", IET Generation, Transm., Dist., vol. 3, no. 4, pp. 336–345. Apr. 2009.
- [Sou12] C.K. Sou, H. Sandberg, and K.H. Johansson, "Computing critical k-tuples in power networks", IEEE Trans. Power Syst., vol.27, no. 3, pp. 1511-1520, Aug 2012.
- [Souz05] J. C. S. Souza, M. B. Do Coutto Filho, M. Th. Schilling, Ch. Capdeville, "Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios", IEEE Trans. Power Syst., vol.20, no. 4, pp. 1700-1708, Nov./ 2005.
- [Tafu06] J. E. Villavicencio Tafur, "Ferramenta computacional para planejamento e avaliação de sistemas de medição para estimção de estado", Dissertação de Mestrado, IC/ Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2006.

- [**Tafu08**] J. E. Villavicencio Tafur, M. B. Do Coutto Filho, J. C. S. Souza, M. T. Schilling, "Cálculo de índices de observabilidade na estimação de estado em sistemas de potência", Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora – MG, vol. 1, pp. 1-8, 2008.
- [**Teix10**] A. Teixeira, S. Amin, H. Sandberg, K. H. Johansson, S. S. Sastry, "Cyber security analysis of state estimators in electric power systems", 48th Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, Atlanta – GA, USA, pp. 5991-5998, Dec. 2010.
- [**Wash99**] Richard D. Christie, "Power systems test case archive", University of Washington, College of Engineering, Aug. 1999, online
<http://www.ee.washington.edu/research/pstca>
- [**Wu89**] F. F. Wu, W. H. E. Liu, "Detection of topology errors by state estimation", IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 3, pp 176-183, Aug. 1989.
- [**Wu90**] F. F. Wu, "Power system state estimation: a survey", Electrical Power & Energy System, vol. 12, no. 1, pp. 80-87, Jan. 1990.
- [**Yang11a**] T. Yang, H. Sun, A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator – part I: architecture", IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 46-53, Feb. 2011.
- [**Yang11b**] T. Yang, H. Sun, A. Bose, "Transition to a two-level linear state estimator – part II: algorithm", IEEE Trans. Power Syst., vol. 26, no. 1, pp. 54-62, Feb. 2011.

