UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ALEX ANDRIUS CECCHIM BOZZ

**Metodologia para projeto de sistemas de medi-
ção confiáveis para estimação de estado conside-
rando custo, medidas convencionais, fasoriais sin-
cronizadas e índice UI via Algoritmo Evolutivo e
Matriz H_{Δ}^t**

São Carlos
2014

ALEX ANDRIUS CECCHIM BOZZ

**Metodologia para projeto de sistemas de medi-
ção confiáveis para estimação de estado conside-
rando custo, medidas convencionais, fasoriais sin-
cronizadas e índice UI via Algoritmo Evolutivo e
Matriz H_{Δ}^t**

Dissertação de Mestrado apresentada à
Escola de Engenharia de São Carlos, da Uni-
versidade de São Paulo, como parte dos requi-
sitos necessários para a obtenção do Título de
Mestre em Ciências, Programa de Engenharia
Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de
Potência.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco A. London Ju-
nior.

São Carlos

2014

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

Bm

Bozz, Alex Andrius Cecchim

Metodologia para projeto de sistemas de medição
confiáveis para estimação de estado considerando custo,
medidas convencionais, fasoriais sincronizadas e índice
UI via Algoritmo Evolutivo e Matriz H / Alex
Andrius Cecchim Bozz; orientador João Bosco Augusto
London Junior. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Estimação de Estado. 2. Sistemas de Medição
Convencional. 3. Sistemas de Medição Fasorial. 4.
Sistemas elétricos de Potência. 5. Algoritmo Evolutivo.
I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEX ANDRIUS CECCHIM BOZZ.**

Título da dissertação: "Metodologia para projeto de sistemas de medição confiáveis para estimação de estado considerando custo, medidas convencionais, fasoriais sincronizadas e índices UI via algoritmo evolutivo e matriz H_{Δ}^1 ".

Data da defesa: 16/05/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **João Bosco Augusto London Júnior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Eduardo Nobuhiro Asada**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **George Lauro Ribeiro de Brito**
(Universidade Federal do Tocantins)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a todos da minha Família pelo apoio e confiança depositada. Em especial a Pâmella Suelen Alvarez Porto, mulher, companheira e linda.

Ao Prof. Dr. João Bosco Augusto London Jr., não só pela orientação neste trabalho, mas também pela oportunidade de realização do meu mestrado.

Agradeço a todos aos meus amigos pelo apoio, em especial a Alexandre Festa, Henrique Borges, Leandro Medeiros, Remy Amorim pelos finais de semana com churrasco.

Aos meus colegas do LACOSEP e demais laboratórios.

A todos os professores que contribuíram para minha formação.

À Universidade de São Paulo (USP), por todo o suporte necessário para a realização deste trabalho.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão de bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

A todos, meus sinceros agradecimentos.

“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.”

João Guimarães Rosa

RESUMO

BOZZ, A. A. C. **Metodologia para projeto de sistemas de medição confiáveis para estimação de estado considerando custo, medidas convencionais, fasoriais sincronizadas e índice UI via Algoritmo Evolutivo e matriz H_{Δ}^t** . 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Esta dissertação trata do problema de projeto e fortalecimento de sistemas de medição, para efeito de estimação de estado em sistemas elétricos de potência. São dois os objetivos principais desta dissertação. O primeiro é o desenvolvimento e implementação, em computador, de uma metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição confiáveis que fazem uso de medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA e de medidas fasoriais sincronizadas. Haja vista a existência de medidas redundantes que apresentam a característica de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do estimador por mínimos quadrados ponderados, definidas em (BENEDITO et al., 2013) como medidas com elevado índice UI, o segundo objetivo desta dissertação é o desenvolvimento e implantação, em computador, de uma metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição confiáveis que, além de considerar os critérios técnicos de confiabilidade para efeito de estimação de estado, considere também o índice UI das medidas. A metodologia possibilita a obtenção de sistemas de medição confiáveis formados por medidas com índice UI baixo. Para o desenvolvimento das metodologias propostas são utilizados como base algoritmo evolutivo monobjetivo e o método para projeto de sistemas de medição que faz uso da chamada matriz H_{Δ}^T , que é obtida via um processo de fatoração triangular da matriz jacobiana transposta do estimador de estado por mínimos quadrados ponderados.

Palavras-chaves: Sistemas Elétricos de Potência, Estimação de Estado, Sistemas de Medição e Algoritmos Evolutivos.

ABSTRACT

BOZZ, A. A. C. **Reliable metering system plan for state estimation considering cost, conventional, synchronized phasor measurements and index UI via Evolutionary Algorithm and H_{Δ}^t matrix.** 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

This thesis focuses on the problem of metering system planning for state estimation purposes and has two main objectives. The first one is to develop a methodology for metering system planning that allows the project of reliable metering systems considering both conventional and synchronized phasor measurements. Because of the existence of redundant measurements that have the characteristics of not reflecting their errors into the residuals of the weighted least squares estimator, called in (BENEDITO et al., 2013) as measurements with high Undetectability Index (UI), the second objective of this thesis is to develop a methodology, for metering system planning, that allow the project of reliable metering systems formed by measurements with UI lower than a pre-specified value. The background to develop the proposed methodologies are evolutionary algorithms and the method to metering system planning based on the analysis of the H_{Δ}^t matrix, that is obtained from the triangular factorization of the transpose Jacobian matrix of the weighted least squares estimator.

Keywords: Electrical Power Systems, State Estimation, Metering Systems and Evolutionary Algorithms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1-Transições de estados de operação em um SEP(VIGLIASSI, 2009).	34
Figura 2.2 - Modelo de medição (BENEDITO, 2011).....	35
Figura 2.3 - Matriz jacobiana para estimador híbrido.	43
Figura 3.1 – Fluxograma básico das etapas do processo de evolução do AG.	48
Figura 3.2 - Tipos de codificação (Genótipo).....	49
Figura 3.3 – <i>Crossover</i> de um ponto.	51
Figura 3.4 - Operador de mutação para representação binária.....	52
Figura 3.5 - Operador de mutação tipo <i>Swap Mutate</i> para representação sequencial.	52
Figura 3.6 - Matriz $H\Delta T$ para um sistema observável.....	56
Figura 3.7–Fluxograma do método proposto em (LONDON JR. et al., 2002).	59
Figura 3.8 - Sistema de 6 barras associado a um sistema de medição não observável (VIGLIASSI, 2009).	62
Figura 3.9 - Fluxograma do AERS.....	68
Figura 3.10 - Indivíduo do AERS.	69
Figura 3.11 - Problema no crossover da representação sequencial.	69
Figura 4.1 - Estrutura de montagem da matriz HT	77
Figura 4.2 - Composição da faixa de valores de UI de uma medida.	88
Figura 4.3 - Sistema exemplo com 4 barras.	91
Figura 4.4 - SMC encontrado para o exemplo 4 barras.	98
Figura 4.5 - SMC, com menor custo, encontrado para o sistema de 4 barras testado.....	98
Figura 5.1– SM tipo 4 obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 14 barras). ...	102
Figura 5.2 – Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 14 barras com 50 indivíduos).	102
Figura 5.3 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 14 barras).....	105
Figura 5.4 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 14 barras).....	106
Figura 5.5 - SM não observável associado ao sistema de 14 barras do IEEE.	106
Figura 5.6 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, com injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.5 (IEEE 14 barras).	107

Figura 5.7 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, sem injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.5 (IEEE 14 barras).....	108
Figura 5.8 - SMC obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 30 barras).	110
Figura 5.9 - Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 30 barras com 50 indivíduos).....	111
Figura 5.10 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 30 barras).	114
Figura 5.11 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 30 barras).....	115
Figura 5.12 - SM não observável associado ao sistema de 30 barras do IEEE.	116
Figura 5.13 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, com injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 30 barras).	117
Figura 5.14 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, sem injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 30 barras).....	118
Figura 5.15 - SMC obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 57 barras).	119
Figura 5.16- Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 57 barras com 50 indivíduos).....	120
Figura 5.17 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 57 barras).	121
Figura 5.18 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 57 barras).....	122
Figura 5.19 - SM não observável associado ao sistema de 57 barras do IEEE.	123
Figura 5.20 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, com injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 57 barras).	124
Figura 5.21 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, sem injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 30 barras).....	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Custo monetário do Sistema SCADA e UMFs, sendo <i>Nad</i> o número de adjacências da barra.	87
Tabela 5.1 - Barras que possuem injeção nula (utilizadas somente nos testes com medidas de injeção nula).	100
Tabela 5.2 - Medidas existentes consideradas apenas para os testes de fortalecimento.	100
Tabela 5.3 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 14 barras).	101
Tabela 5.4 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais (IEEE 14 barras).	101
Tabela 5.5 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais e UI como critério técnico (IEEE 14 barras).	103
Tabela 5.6 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico (IEEE 14 barras).	103
Tabela 5.7 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 14 barras).	104
Tabela 5.8 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 14 barras).	104
Tabela 5.9 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 14 barras).	105
Tabela 5.10 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 14 barras).	107
Tabela 5.11 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs sem injeção nula presente (IEEE 14 barras).	108
Tabela 5.12 - Comparação entre métodos para fortalecimento de SMs com MFSs (IEEE 14 barras).	109
Tabela 5.13 - SMC obtido pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 30 barras).	110
Tabela 5.14 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais (IEEE 30 barras).	111
Tabela 5.15 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais e UI como critério técnico (IEEE 30 barras).	112

Tabela 5.16 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico (IEEE 30 barras).	112
Tabela 5.17 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).	113
Tabela 5.18 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 30 barras).	113
Tabela 5.19 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 30 barras).	114
Tabela 5.20 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).	116
Tabela 5.21 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs sem injeção nula presente (IEEE 30 barras).	117
Tabela 5.22 - SMC obtido pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 57 barras).	119
Tabela 5.23 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 57 barras).	120
Tabela 5.24 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 57 barras).	121
Tabela 5.25 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 57 barras).	122
Tabela 5.26 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 57 barras).	124
Tabela 5.27 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs sem injeção nula presente (IEEE 57 barras).	125
Tabela 5.28 - Comparação entre métodos para fortalecimento de SMs com MFSs (IEEE 57 barras).	126
Tabela 6.1 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).	128

LISTA DE ABREVIATURAS

ACO	Colônia de Formigas, do inglês <i>Ant Colony Optimization</i>
AE	Algoritmo Evolutivo
AERS	Algoritmo Evolutivo por Representação Sequencial
AG	Algoritmo Genético
AS	Recozimento Simulado, do inglês <i>Simulated Annealing</i>
CCM	Conjunto Crítico de Medidas
EESEP	Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência
EE	Estimador de Estado
EG	Erro Grosseiro
GPS	Sistema de Posicionamento Global, do inglês <i>Global Positioning System</i>
MCs	Medida Críticas
MFS	Medida Fasorial Sincronizada
NRL	Número de Redundância Local
PMU	Unidade de Medição Fasorial, do inglês <i>Phasor Measurement Units</i>
PSO	Otimização por enxame de partículas, do inglês <i>Particle Swarm Optimization</i>
SCADA	Sistema de Controle Supervisório e de Aquisição de Dados, do inglês <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMC	Sistema de Medição Confiável
UI	Índice de não detecção, do inglês <i>Undetectability Index</i>
UMF	Unidade de Medição Fasorial
UTR	Unidade Terminal Remota
VC	Vetor de Contador
VCA	Vetor Contador Auxiliar
VF	Vetor de Fatores

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	25
1.1 OBJETIVOS	29
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	30
2. ESTIMAÇÃO DE ESTADO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	33
2.1 INTRODUÇÃO	33
2.2 ESTIMADOR DE ESTADO EM SEP	35
2.2.1 Estimador WLS	35
2.2.2 Formulação do Estimador linear	37
2.2.3 Processamento de Erros Grosseiros	38
2.2.4 Estimador de Estado Híbrido	40
2.3 OBSERVABILIDADE	41
2.3.1 Observabilidade Algébrica no Modelo $P\theta$	41
2.3.2 Observabilidade para SMs fasoriais sincronizado e híbridos	42
2.4 REDUNDÂNCIA DE MEDIDAS	43
2.4.1 Medidas Críticas	44
2.4.2 Conjunto Crítico de Medidas	44
2.4.3 Conjunto p -crítico	44
2.4.4 UTR Crítica	45
2.4.5 Nível de Redundância Local de uma Medida	45
2.5 PROJETO DE SISTEMA DE MEDIÇÃO	45
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	47
3.1 HEURÍSTICA CONSTRUTIVA	47
3.2 ALGORITMOS EVOLUTIVOS	48
3.2.1 Indivíduos	49
3.2.2 População	49
3.2.3 Operadores Genéticos	50
3.3 MÉTODOS PARA PROJETO E FORTALECIMENTO DE SMS	52
3.3.1 Sistemas de Medição Convencionais	52
3.3.2 Sistemas de Medição Fasoriais Sincronizados	54

3.3.3	Sistemas de Medição Híbridos	54
3.4	IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DE REDUNDÂNCIA DAS MEDIDAS	56
3.5	MÉTODO PARA PROJETO E FORTALECIMENTO DE SMS CONVENCIONAIS ATRAVÉS DA OBTENÇÃO E ANÁLISE DA MATRIZ <i>HΔT</i>	58
3.5.1	Fase 1 – Análise e restauração da observabilidade	59
3.5.2	Fase 2 – Análise e restauração do nível de redundância das medidas	60
3.5.3	Fase 3– Análise e aumento da redundância das UTRs críticas	61
3.5.4	Exemplo de aplicação do método	62
3.5.5	AERS	67
3.6	ÍNDICE DE NÃO DETECÇÃO DE ERROS GROSSEIROS NO PROCESSO DE EESEP	71
3.6.1	Interpretação Geométrica do Estimador de Estado WLS	71
4.	METODOLOGIA PROPOSTA	75
4.1	FASE 1 – CRIAÇÃO DA POPULAÇÃO INICIAL E MONTAGEM DA MATRIZ <i>HT</i>	76
4.2	FASE 2: ANÁLISE QUALITATIVA ATRAVÉS DA <i>HΔT</i>	78
4.2.1	Etapa 1 – Heurística Construtiva (nível de redundância das UTRs)	78
4.2.2	Etapa 2 – Análise e restauração da observabilidade	79
4.2.3	Etapa 3 – Identificação de MCs e aumento do NRL	82
4.2.4	Etapa 4 – Identificação de CCMs e aumento do NRL	82
4.2.5	Etapa 5 – Identificação de UTRs críticas e aumento do NRL	85
4.3	FASE 3: AVALIAÇÃO DOS INDIVÍDUOS E APLICAÇÃO DOS OPERADORES	87
4.4	UI COMO CRITÉRIO TÉCNICO	87
4.4.1	Modificações na Fase 1	88
4.4.2	Modificações na Fase 2	89
4.5	RESTRIÇÕES ECONÔMICAS	90
4.6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA CONSIDERANDO UTRs E UMFs	91
5.	TESTES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	99
5.1	TESTES COM O SISTEMA DE 14 BARRAS DO IEEE	100
5.1.1	Projeto de SMC	100
5.1.2	Fortalecimento de SM	106
5.2	TESTES COM O SISTEMA DE 30 BARRAS DO IEEE	109
5.2.1	Projeto de SMC	109
5.2.2	Fortalecimento de SM	115

5.3	TESTES COM O SISTEMA DE 57 BARRAS DO IEEE	118
5.3.1	Projeto de SMC	118
5.3.2	Fortalecimento de SM	123
6.	CONCLUSÕES	127
6.1	ANÁLISE DOS RESULTADOS	127
6.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
6.3	PERSPECTIVAS FUTURAS	129
6.4	ARTIGOS PUBLICADOS E ACEITOS PARA PUBLICAÇÃO	130
	REFERÊNCIAS	131
	APÊNDICE A. TABELAS COM DADOS E RESULTADOS DOS SMS ENCONTRADOS SEM CONSIDERAR UI	137
	APÊNDICE B. TABELAS COM DADOS E RESULTADOS DOS SMS ENCONTRADOS CONSIDERANDO O UI DAS MEDIDAS	151

Capítulo 1

1. Introdução

A operação em tempo real de sistemas elétricos de potência (SEPs) tem como principal objetivo o suprimento de energia elétrica em obediência à trilogia de continuidade, qualidade e economia de serviço (BENEDITO, 2011). Para alcançar tal objetivo é necessário que os níveis de tensão, frequência, fluxos nas interligações, carregamento de linhas e equipamentos sejam mantidos dentro de faixas, ou limites de segurança. Desta forma, a operação dos SEPs exige que uma grande quantidade de informações esteja disponível para os operadores. Essas informações devem permitir a determinação do estado operativo corrente do SEP, isto é, determinar se o sistema está ou não operando adequadamente e, caso não esteja, deve indicar o que precisa ser feito para corrigir essa operação inadequada.

Conhecida a topologia e os parâmetros da rede elétrica, o estado operativo de um SEP, operando em regime permanente, torna-se função das tensões complexas nas suas barras, pois, através das mesmas, é possível determinar todas as demais grandezas elétricas de interesse (correntes e fluxos de potência). Em razão disso, no contexto de operação em tempo real, as tensões complexas nas barras do SEP são chamadas simplesmente de variáveis de estado do SEP.

Devido à grande dimensão dos SEPs, para determinar as suas variáveis de estado, utilizam-se os sistemas de telemedição, isto é, medições feitas à distância, que estão sujeitos a uma série de ruídos inerentes ao processo de telemedição (MORAES, 2009). Dessa forma, para obtenção de valores mais confiáveis para as variáveis de estado dos SEPs, necessários à realização da operação em tempo real, as telemidas devem ser filtradas. Para execução dessa tarefa, os centros de controle dispõem de um conjunto de programas desenvolvíveis em computador denominado estimador de estado.

O Estimador de Estado (EE) é uma ferramenta computacional que possibilita a obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP, através do processamento do modelo elétrico e dos parâmetros do SEP e de um conjunto redundante de medidas

analógicas com ruído obtidas em tempo real. Esse conjunto de medidas é constituído usualmente por medidas de potência ativa e reativa (fluxo nas linhas e injeção nas barras) e por medidas de magnitude de tensão nas barras obtidas por meio do Sistema de Aquisição e Supervisão de Dados (SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*).

Em razão de as medidas analógicas, utilizadas no processo de Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência (ESEP), não serem exatas, a estimação obtida, para as variáveis de estado desconhecidas, também, não será exata. Pode-se dizer, então, que o processo de ESEP consiste em encontrar uma forma de atingir-se a melhor estimativa das variáveis de estado desconhecidas. Para isso, dos muitos critérios estatísticos existentes o que vem sendo mais utilizado, no processo de ESEP, é o dos mínimos quadrados ponderados (WLS, do inglês *Weighted Least Squares*), que foi formulado originalmente em (SCHWEPPE; WILDES, 1970).

Independente do estimador utilizado, o sucesso do processo de ESEP depende da qualidade e da redundância das medidas disponíveis. A qualidade das medidas depende da precisão de todos os equipamentos envolvidos no processo de telemedição. Por outro lado, a redundância das medidas depende da quantidade, tipo e localização dos medidores e das Unidades Terminais Remotas (UTRs)¹ instalados no SEP, ou seja, depende do Sistema de Medição (SM) disponível. Nesse sentido, usualmente, considera-se como confiável, para realização do processo de ESEP, o SM que atende aos seguintes critérios técnicos (SOUZA, DE et al., 2005; COSER et al., 2006; VIGLIASSI et al., 2009; ROCHA et al., 2010a):

1. Observabilidade e confiabilidade: durante a operação de um SEP, problemas podem ocorrer no sistema SCADA, causando a perda de medidas e/ou UTRs. Em razão disso, as medidas e UTRs disponíveis devem garantir a observabilidade do SEP, isto é, a estimação de todas as variáveis de estado do SEP, inclusive com a perda simultânea de 1 ou 2 medidas quaisquer, ou, até mesmo, com a perda de uma UTR qualquer.
2. Detecção e Identificação de Erros Grosseiros (EGs)²: as medidas fornecidas ao EE estão sujeitas aos chamados EGs, que levam o processo de estimação a variáveis de estado que não refletem a atual condição de operação do SEP, ou, até mesmo, a não convergência. Dessa forma, o EE deve ser robusto para permitir a detecção, identificação e eliminação dos efeitos das medidas portadoras de EGs. Para isso, o nível de

¹ Equipamentos eletrônicos responsáveis pela leitura das medidas SCADAS do SEP, nas usinas e subestações, e pelo seu envio aos centros de operação do sistema.

² Em geral, diz-se que uma medida é portadora de EG quando a mesma desvia do seu valor verdadeiro de, no mínimo, três vezes a sua variância (MILI et al., 1984).

redundância das medidas deve ser tal que garanta a ausência de Medidas Críticas (MCs)³ e de Conjuntos Críticos de Medidas (CCMs)⁴. Isso em razão de não ser possível detectar a ocorrência de EGs em MCs (CLEMENTS et al., 1981), nem mesmo identificar tais erros em medidas pertencentes a CCMs (MILI et al., 1984).

Ante o exposto, com objetivo de tornar mais confiável o processo de EESEP, diversas metodologias têm sido desenvolvidas para projeto de novos SMs e para análise e adequação (ou fortalecimento) de SMs já existentes (MAGNAGO; ABUR, 1999; LONDON JR et al., 2002; COUTTO FILHO et al., 2005; COSER et al., 2006; VIGLIASSI et al., 2009; ROCHA et al., 2010a).

Algumas dessas metodologias consideram apenas os critérios técnicos supracitados, outras consideram também o custo necessário para aquisição e instalação de medidores e UTRs.

Para obter uma dependência entre a confiabilidade (critérios técnicos supracitados) e o custo associado à implantação de SMs, as metodologias desenvolvidas em (SOUZA, DE et al., 2005; COSER et al., 2006; VIGLIASSI et al., 2009; ROCHA et al., 2010a) fazem uso de metas-heurísticas.

Também, na tentativa de melhorar a confiabilidade do processo de EESEP, diversas pesquisas vêm investigando a possibilidade de utilização de Medidas Fasoriais Sincronizadas (MFSs), que são obtidas através das Unidades de Medição Fasorial (UMF) (PHADKE, 2002; COSTA et al., 2008; BRUNO et al., 2009; LONDON et al., 2009; MORAES, 2009). Justifica-se tal interesse principalmente pelas seguintes razões: aumento da redundância de medidas; as MFSs apresentam, em geral, um nível maior de precisão do que as medidas convencionais; e as MFSs possibilitam a medição de variáveis cuja medição é inviável através das medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA, como é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica.

Desenvolveram-se, assim, estimadores de estado híbridos, ou seja, estimadores que fazem uso de medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA (medidas de potência e de magnitude de tensão) e por MFSs (ZHOU et al., 2006; ZHU; ABUR, 2007; ALBUQUERQUE; COSTA, 2012; GUIMARAENS et al., 2012). E surgiram, então, métodos para projetos de SMs fasoriais sincronizados para efeito de EESEP.

³ Medida crítica é a medida que, quando perdida, faz um SEP observável tornar-se não observável.

⁴ Conjunto crítico de medidas é o conjunto de medidas formado por medidas não críticas, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna as demais críticas.

Vários métodos têm sido propostos para a solução do problema de alocação ótima de UMFs. Segundo Manousakis et al. (2012), esses métodos podem ser divididos em matemáticos e heurísticos. Os métodos matemáticos fazem uso de métodos de otimização clássicos, por exemplo, programação inteira. Já os métodos heurísticos fazem uso de algoritmos inteligentes, destacando a meta-heurística Algoritmo Evolutivo (AE). Segundo Albuquerque et al. (2013), dependendo do tipo do problema, os métodos clássicos podem ser mais eficientes que os heurísticas, entretanto os AEs apresentam ótimos resultados quando existem hipóteses válidas restritivas acerca do espaço de busca de soluções.

Alguns dos métodos para obtenção de SMs fasoriais sincronizados se preocupam com os critérios técnicos definidos anteriormente (XU; ABUR, 2004; CHEN; ABUR, 2006), outros com a precisão das estimativas e, de forma indireta, com os critérios de redundância. Nesse sentido, importa destacar a metodologia desenvolvida em (KETABI et al., 2010), que faz uso de uma meta-heurística (Evolução Diferencial) para minimizar simultaneamente o número de UMFs e o erro médio quadrado das estimativas.

Apesar do grande impacto positivo resultante do surgimento e incorporação da tecnologia de MFS no SEP, devido ao elevado custo das UMFS, os atuais SMs não serão completamente substituídos por UMFs em um curto período de tempo. Portanto, faz-se necessário que as metodologias possibilitem tratamento simultâneo de ambas as tecnologias.

Afim de superar tal limitação, diversos métodos foram propostos para o tratamento simultâneo de ambas as tecnologias de medição, dessa maneira, permitindo a obtenção de SMs híbridos. O método proposto em (ESMAILI et al., 2013) faz uso de programação linear inteira mista e permite o fortalecimento de um SM convencional através da instalação de UMFs, assegurando a observabilidade do SEP na condição normal de operação e em contingência devido à perda de uma linha de transmissão ou de uma UMF. Já a metodologia proposta em (CIPRIANI; COSTA, 2010) permite a obtenção de um SM híbrido através da instalação de UMFs e posteriormente medidas do sistema SCADA. O método, inicialmente, obtém um SM observável somente com UMFs e, depois, aumenta o nível de redundância das medidas instalando medidas convencionais. Assim, o método garante a existência de MCs.

Observe que, de acordo com os critérios técnicos de um SM confiável, sem considerar o custo para aquisição e instalação de medidores e UTRs, um SM "ótimo" seria aquele possuindo o maior número de medidas possíveis, ou seja, o sistema mais redundante possível. Entretanto, através da análise geométrica dos resíduos do estimador WLS, em (BENEDITO et al., 2013) foi demonstrado que, dependendo das medidas convencionais

disponíveis, SMs com redundância menor podem ser mais confiáveis em termos de processamento de EGs. Isso em razão da existência de medidas que possuem as características de não refletirem seus erros no resíduo do estimador de estado WLS. Dessa forma, é melhor ter um SM com redundância menor, mas isento dessas medidas.

Com o intuito de classificar as medidas de acordo com as suas características de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do estimador WLS, em (BENEDITO et al., 2013) foi desenvolvido o Índice de Não Detecção de Erros, ou, simplesmente *Undetectability Index* (UI). As medidas com maiores UI são aquelas cujos EGs são mais difíceis de serem detectados através de métodos que fazem uso da análise dos resíduos do estimador WLS. Isto porque os erros dessas medidas são, de certa forma, “mascarados”, isto é, não são refletidos nos resíduos das mesmas. Assim, torna-se evidente a necessidade de diminuir o índice UI das medidas para prover um aumento na capacidade de detecção e identificação de EGs num SM já existente, ou ainda, projetar novos SMs como objetivo de tornar mínimo o índice UI das medidas além dos critérios técnicos relacionados à confiabilidade de SMs.

1.1 Objetivos

São dois os objetivos desta dissertação. O primeiro é o desenvolvimento e implementação, em computador, de uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs híbridos confiáveis para efeito de EESEP. Haja vista a existência de medidas que apresentem a característica de não refletirem grande parcela de seus erros nos resíduos do estimador WLS, definidas, em (BENEDITO et al., 2013), como medidas com elevado índice UI, o segundo objetivo desta dissertação é o desenvolvimento e implantação, em computador, de uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs confiáveis que, além de considerar os critérios técnicos de confiabilidade para efeito de estimação de estado (observabilidade e ausência de MCs, CCMs e UTRs críticas), considere o índice UI das medidas. A ideia é desenvolver uma metodologia que possibilite a obtenção de SMs confiáveis formados por medidas com índice UI baixo.

Para atingir o primeiro objetivo desta dissertação, ou seja, o desenvolvimento de uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs híbridos confiáveis, utilizar-se-á como base a metodologia proposta em (VIGLIASSI et al., 2009), que possibilita a obtenção de SMs confiáveis de baixo custo. Através da análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T (LONDON JR et al., 2001), que é obtida via um processo de fatoração triangular da matriz jacobiana transposta do estimador de estado WLS, essa metodologia possibilita a obtenção de SMs

confiáveis. Para obter uma dependência entre a confiabilidade e o custo do sistema de medição, essa metodologia faz uso de um AE projetado especialmente para aproveitar as características da matriz H_{Δ}^T . Vale lembrar, entanto, que essa metodologia não considera a existência de MFSs. Dessa maneira, de uma forma mais específica, o que está sendo proposto é a extensão dessa metodologia para que a mesma possibilite a obtenção de SMs híbridos confiáveis. Para possibilitar tal extensão, analisar-se-á o trabalho apresentado em (LONDON et al., 2009), que demonstrou, através da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T , ser possível analisar a observabilidade e identificar MCs e CCMs em SMs híbridos.

Para atingir o segundo objetivo, por sua vez, o trabalho de (BENEDITO et al., 2013) será analisado detalhadamente. A ideia é utilizar uma estratégia que utilize a parcela do UI que varia de acordo com o nível de redundância das medidas para, então, através desta estratégia, garantir um SM com medidas que apresentem baixo UI. Vale ressaltar que, em (BENEDITO et al., 2013), o índice UI não foi definido para SMs híbridos. Dessa forma, não está sendo tratado neste objetivo a obtenção de SMs híbridos confiáveis, e sim SMs convencionais confiáveis. Entretanto, os resultados desta dissertação certamente possibilitarão o desenvolvimento de uma metodologia capaz que tratar o índice UI para obtenção de SMs híbridos confiáveis.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 revisa alguns dos principais métodos e técnicas relativos ao processo de EESEP, tais como: Estimador de Estado WLS convencional e híbrido, resíduo normalizado, observabilidade, redundância de medidas; detecção e identificação de erros grosseiros e a formulação do problema de projeto de SMs confiáveis de baixo custo.
- O Capítulo 3 apresenta, inicialmente, uma sucinta revisão bibliográfica dos métodos desenvolvidos para obtenção de SMs convencionais, fasoriais sincronizados e híbridos. Em seguida, descreve o embasamento teórico necessário para desenvolvimento desta dissertação de mestrado, ou seja, informações básicas sobre AEs, sobre índice de não detecção de erro grosseiro e quanto às metodologias para análise de redundância e para projeto de SMs confiáveis que fazem uso da matriz H_{Δ}^T .

- O Capítulo 4 descreve a metodologia proposta nesta dissertação de mestrado para projeto e fortalecimento de SMs convencionais, com ou sem UI, fasoriais sincronizados e híbridos confiáveis, isto é, SMs formados por medidas convencionais, obtidas pelo sistema SCADA, e por MFSs, obtidas pelas UMFs, observáveis e isentos de MCs, CCMs e UTRs críticas.
- No Capítulo 5 são apresentados os resultados de diversos testes que foram realizados para validar a metodologia proposta.
- Por fim, o capítulo 6 conclui este trabalho apresentando as considerações finais e perspectivas futuras.

Capítulo 2

2. Estimação de Estado em Sistemas Elétricos de Potência

2.1 Introdução

Para saber se um sistema de potência está ou não operando de forma adequada, analisa-se o seguinte conjunto de restrições (DY LIACCO, 1974):

Restrições de Carga ($g(x) = 0$): a função vetorial de restrições de carga trata-se de uma restrição de igualdade. A carga líquida de todo o sistema deve ser zero, logo, todos os consumidores estão sendo atendidos. Lembrando que “ x ” são as variáveis de estado do sistema.

Restrições de Operação ($h(x) \leq 0$): a função vetorial de restrições de operação estabelece os limites de operação do SEP, como, por exemplo, o nível máximo de tensão admissível ou o máximo carregamento de uma linha de transmissão.

Restrições de segurança ($s(x) \leq 0$): a função vetorial de restrições de segurança é constituída por todos os valores de restrições de carga e operação que, na ocorrência de uma contingência, levariam o sistema para o estado de emergência (definido a seguir).

Importante observar que todas essas restrições são funções vetoriais das variáveis de estados “ x ”, que são as tensões complexas nas barras do SEP.

Baseando-se nessas restrições, quatro estados de operação foram definidos:

Estado Normal - Seguro: é o estado de operação ideal, pois os três conjuntos de restrições são obedecidos. Isto significa que o sistema está em perfeitas condições de operação, sendo que, na ocorrência de uma das contingências de segurança preestabelecidas, o sistema não passará para o estado de emergência.

Estado Normal - Alerta: neste estado, são obedecidas apenas as restrições de carga e operação. Da mesma maneira que no estado seguro, o sistema atende perfeitamente a demanda, porém, na ocorrência de pelo menos uma das contingências de segurança preestabelecidas, o sistema passará para o estado de emergência.

Estado de Emergência: o que caracteriza o estado de emergência é a violação das restrições de operação. Ou seja, embora o sistema esteja intacto (todas as cargas são atendidas), o limite de operação de pelo menos um dos equipamentos do sistema (linhas, geradores, etc.) foi desrespeitado.

Estado Restaurativo: este estado é atingido quando uma emergência foi eliminada por desligamento manual ou automático de partes do sistema. As restrições operacionais são obedecidas, mas o sistema não está intacto (cargas não atendidas, ilhamentos, etc.). Nota-se, portanto, que, ao se passar do estado de emergência para o estado restaurativo, sacrifica-se a integridade total do sistema a fim de se resgatar a observância das restrições de operação.

A transição entre esses estados pode ser resultado de uma ação de controle (transições voluntárias) ou devido ao resultado de uma contingência (transições involuntárias). A figura 2.1 mostra algumas possíveis transições de estado.

Conforme mencionado no capítulo 1, para operar um SEP, o primeiro passo é identificar qual o estado operativo corrente do mesmo e, em seguida, determinar as ações de

controle cabíveis. Como os estados operativos são funções das tensões complexas nas barras do SEP, a operação de um SEP requer a determinação dessas tensões, que são chamadas simplesmente de “variáveis de estado do SEP”. Eis aqui a importância do estimador de estado para operação em tempo real dos SEP, pois é o estimador de estado que possibilita a obtenção (estimação) de forma confiável dessas variáveis de estado.

2.2 Estimador de Estado em SEP

O estimador de estado pode ser dinâmico ou estático. No caso do estimador dinâmico, as variações das grandezas de interesse, em relação à variável ‘tempo’, são consideradas na modelagem da rede fazendo uso de equações diferenciais. Por sua vez, no estimador estático o modelo da rede utilizado é estático. Dessa forma, o comportamento matemático do sistema é modelado utilizando-se apenas equações algébricas não lineares.

Na seção 2.2.1 será apresentado o estimador de estado mais utilizado em SEP, o estimador por Mínimos Quadrados Ponderados (WLS, do inglês *Weighted Least Squares*). Isto em razão da simplicidade da sua formulação, bem como da facilidade com que permite implantá-lo em computador.

2.2.1 Estimador WLS

Neste estudo, considera-se (por hipótese) um modelo determinístico para representar o sistema, isto é, admitir-se-á a não existência de erros nos parâmetros do modelo. Tal representação é ilustrada pelo diagrama a seguir.

Figura 2.2 - Modelo de medição (BENEDITO, 2011).

Baseado no diagrama, as equações não lineares para EESEP são representadas como:

$$\underline{z} = h(\underline{x}) + \underline{w}, \quad (2.1)$$

sendo:

$\underline{z}$: vetor de medidas ($k \times 1$);

$h(\cdot)$: vetor de funções não lineares que relacionam as medidas com as variáveis de estado ($m \times 1$);

$\underline{x}$: vetor de variáveis de estado ($k \times 1$);

$\underline{w}$: vetor de erros das medidas ($m \times 1$);

m : número de medidas;

k : número de variáveis de estado a serem estimadas.

Os erros das medidas (termo de $\underline{w}$) são usualmente considerados como variáveis aleatórias independentes, com distribuição gaussiana de média zero e matriz de covariância R dada por (SCHWEPPE; HANDSCHIN, 1974):

$$R = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

onde, σ_i^2 é a variância do erro da medida i .

Por meio da aplicação da teoria do WLS, a melhor estimativa do vetor de variáveis de estado $\underline{x}$, designado por $\hat{\underline{x}}$, pode ser obtida determinando-se o valor de $\underline{x}$ que torne mínimo o índice $J(\underline{x})$, dado por:

$$J(\underline{x}) = \frac{1}{2} \cdot \underline{w}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{w}, \quad (2.3)$$

ou

$$J(\underline{x}) = \frac{1}{2} \cdot [\underline{z} - h(\underline{x})]^t \cdot R^{-1} \cdot [\underline{z} - h(\underline{x})], \quad (2.4)$$

Sendo R^{-1} o inverso da matriz de covariância do vetor de erros das medidas, aqui utilizado como matriz de ponderação das medidas.

Considerando que $\underline{x}_v$ torna mínimo o índice $J(\underline{x})$, pode-se indicar que $J(\underline{x})$ é convexo nas proximidades de $\underline{x}_v$. Deste modo, $J(\underline{x})$ torna-se mínimo quando:

$$\frac{\partial J(\underline{x})}{\partial \underline{x}} = 0, \quad (2.5)$$

ou

$$H^t(\hat{\underline{x}}) \cdot R^{-1} \cdot [\underline{z} - h(\hat{\underline{x}})] = 0, \quad (2.6)$$

Sendo $H(\hat{\underline{x}})$ a matriz das primeiras derivadas das funções não lineares do vetor $h(\hat{\underline{x}})$, conhecida como matriz jacobiana, dada por:

$$H(\underline{x}) = \left. \frac{\partial h(\underline{x})}{\partial \underline{x}} \right|_{\underline{x}=\hat{\underline{x}}}. \quad (2.7)$$

Devido à não linearidade de $H(\underline{x})$ e $h(\underline{x})$, não é possível a solução direta da equação (2.6). Portanto, é preciso recorrer a técnicas iterativas que resolvam uma equação linear a cada iteração v , de modo a calcular a estimativa através de sucessivas correções (SCHWEPPE; HANDSCHIN, 1974), dadas por:

$$\underline{x}^{v+1} = \underline{x}^v + \Delta \underline{x}^v. \quad (2.8)$$

Reescrevendo a equação (2.1), em relação às aproximações realizadas em $h(\underline{x})$, obtém-se o modelo de medição linear:

$$\underline{z} = h(\underline{x}^v) + H(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v + \underline{w}, \quad (2.9)$$

ou ainda

$$\Delta \underline{z}(\underline{x}^v) = \underline{z} - h(\underline{x}^v) = H(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v + \underline{w}, \quad (2.10)$$

Onde $\Delta \underline{z}(\underline{x}^v)$ é o vetor dos resíduos de medição.

A partir do modelo de medição linear, a função objetivo $J(\Delta \underline{x})$ torna-se:

$$J(\Delta \underline{x}) = \frac{1}{2} \cdot [\Delta \underline{z}(\underline{x}^v) - H(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v]^t \cdot R^{-1} \cdot [\Delta \underline{z}(\underline{x}^v) - H(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v], \quad (2.11)$$

cujo o mínimo é calculado a partir de

$$\frac{\partial J(\underline{x})}{\partial \underline{x}} = H(\underline{x}^v)^t \cdot R^{-1} \cdot [\Delta \underline{z}(\underline{x}^v) - H(\underline{x}^v) \cdot \Delta \underline{x}^v], \quad (2.12)$$

Portanto, a solução é definida como:

$$\Delta \underline{x}^v = [H(\underline{x}^v)^t \cdot R^{-1} \cdot H(\underline{x}^v)]^{-1} \cdot H(\underline{x}^v)^t \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}(\underline{x}^v), \quad (2.13)$$

Assim, o valor estimado corresponde ao valor de $\underline{x}^v$ que satisfaça o critério de convergência previamente fixado.

2.2.2 Formulação do Estimador linear

Em virtude da sua forma iterativa, o estimador de estado não linear é pouco interessante em aplicações de estudos de métodos e técnicas referentes ao processo de EESEP. Para isso, algumas hipóteses simplificadoras transformam o problema de estimação em uma forma não iterativa, portanto, o estimador passa a ser linearizado (BENEDITO, 2011).

O estimador linear baseia-se nas equações de fluxo de carga linear, desprezando-se as perdas e considerando todas as magnitudes de tensão iguais a 1p.u. Em função destas aproximações, calcula-se o fluxo de potência ativa entre duas barras genéricas k e i , bem como a injeção de potência ativa na barra k , respectivamente, pelas seguintes expressões (MONTICELLI, 1999):

$$P_{ki} = \frac{\theta_k - \theta_i}{x_{ik}} \quad (2.14)$$

$$P_k = \sum_{i \in \Omega_k} \frac{\theta_k - \theta_i}{x_{ik}}, \quad (2.15)$$

sendo:

θ_k e θ_i : ângulos de fase de tensão nas barras k e i , respectivamente;

x_{ki} : reatância da linha de transmissão que liga as barras k e i ;

Ω_k : conjunto das barras vizinhas à barra k .

Para o estimador de estado linear, o modelo de medição apresentado na seção 2.2.1 torna-se (MONTICELLI, 1999):

$$\underline{z}_p = H_{p\theta} \cdot \underline{\theta} + \underline{w}_p, \quad (2.16)$$

sendo:

$\underline{\theta}$: vetor de variáveis de estado⁵ ($n_p \times 1$);

$\underline{z}_p$: vetor de medidas de potência ativa ($m_p \times 1$);

$H_{p\theta}$: matriz jacobiana ativa ($m_p \times n_p$);

$\underline{w}_p$: vetor de erros das medidas de potência ativa ($m_p \times 1$);

m_p : número de medidas de potência ativa;

n_p : número de variáveis de estado a serem estimadas para o estimador de estado

linear, ou seja, número de ângulo de fase de tensões nodais a serem estimados;

Através da formulação do WLS, o valor de $\underline{\theta}$ que torna mínimo o índice $J(\underline{x})$, designado por $\hat{\underline{\theta}}$, é dado por:

$$J(\underline{\theta}) = [\underline{z}_p - H_{p\theta} \cdot \underline{\theta}]^t \cdot R_p^{-1} \cdot [\underline{z}_p - H_{p\theta} \cdot \underline{\theta}]. \quad (2.17)$$

Assim, a solução ótima pode ser calculada por:

$$\hat{\underline{\theta}} = [H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot H_{p\theta}]^{-1} \cdot H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot \underline{z}_p. \quad (2.18)$$

2.2.3 Processamento de Erros Grosseiros

Como mencionado anteriormente, as medidas convencionais, fornecidas ao estimador, estão sujeitas a EGs. Dentre as principais causas de EGs, destacam-se: erro na conversão analógico-digital; erro nos canais de comunicação das telemedidas; e a falta de sincronismo dos dados obtidos pelo sistema SCADA (VIGLIASSI, 2009).

⁵ As variáveis de estado para o estimador linearizado correspondem aos ângulos de tensão nas barras do SEP.

Na tentativa de melhorar a precisão das medidas, vários trabalhos de pesquisa têm abordado a possibilidade da obtenção de um SM sincronizado fazendo uso das MFSs. Através do sincronismo das MFSs dado pelo *clock* do GPS, essas medidas apresentam maior precisão que as convencionais disponíveis pelo sistema SCADA (THORP et al., 1985; PHADKE et al., 1986, 1994). Porém, mesmo as medidas fasoriais estão sujeitas aos EGS, isto em razão de as mesmas fazerem uso de equipamentos como transformadores de tensão e corrente, canais de comunicação, etc.

Quando os erros das medidas são gaussianos, o estimador WLS funciona muito bem, porém, na ocorrência de pelos menos um EG, o estimador WLS perde sua robustez (MILI et al., 1991).

Para superar tal limitação, diversos métodos foram desenvolvidos para detecção e identificação de EGs. Os mais usados, em conjunto com o estimador WLS, são baseados na análise estatística dos resíduos das medidas, ou em uma função dos mesmos.

Nesta seção, o estimador linearizado será utilizado para delinear as considerações dos resíduos das medidas por se tratar de um modelo mais simplificado.

Da equação (2.16) do modelo linear de medição, obtém-se a solução ótima pelo WLS através:

$$\hat{\underline{\theta}} = (H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot H_{p\theta})^{-1} \cdot H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot \underline{z}_p. \quad (2.19)$$

Considerando o vetor de medidas estimadas como $\hat{\underline{z}}_{p\theta} = H_{p\theta} \cdot \hat{\underline{\theta}}$, e substituindo o valor de $\hat{\underline{\theta}}$, tem-se que:

$$\hat{\underline{z}}_p = H_{p\theta} \cdot (H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot H_{p\theta})^{-1} \cdot H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot \underline{z}_p. \quad (2.20)$$

Definindo o vetor de resíduos de medidas ($\underline{r}$) como a diferença entre os valores das medidas e seus respectivos valores estimados, tem-se:

$$\underline{r} = \underline{z} - \hat{\underline{z}}. \quad (2.21)$$

O vetor de resíduos $\underline{r}$, definido como sendo a diferença entre $\underline{z}$ e a correspondente quantidade filtrada $\hat{\underline{z}}$, é normalizado e submetido a um teste de validação:

$$r_{(k)}^N = \frac{|r(k)|}{\sigma_r(k)} \leq \lambda \text{ (limiar de detecção)}, \quad (2.22)$$

onde: $r_{(k)}^N$ é o maior entre todos os $r_{(i)}^N, i = 1, \dots, m$; $\sigma_r(k) = \sqrt{\Omega(k,k)}$ é o desvio padrão da k -ésima componente do vetor resíduo; e Ω é a matriz de covariância dos resíduos dada por:

$$\Omega = R_p - H_{p\theta} \cdot (H_{p\theta}^t \cdot R_p^{-1} \cdot H_{p\theta})^{-1} \cdot H_{p\theta}^t. \quad (2.23)$$

De acordo com a literatura, na ocorrência de apenas uma medida com erro grosseiro, se $r(k)^N > \lambda$, a k -ésima medida é portadora de erro grosseiro (usualmente $\lambda = 3$) (MONTICELLI, 1999).

Na ocorrência de EG simples, isto é, quando apenas uma medida possui EG, os métodos para detecção e identificação de EGs, através dos resíduos das medidas, apresentam um bom desempenho, porém possuem limitações, como, por exemplo, o fato de não detectarem EGs em MCs, bem como não identificarem EGs em CCM. A razão para isso será apresentada na seção 2.4.

2.2.4 Estimador de Estado Híbrido

Já foram desenvolvidos diversos estimadores híbridos, isto é, estimadores que processam medidas convencionais e MFSs. Cada um deles trata de forma diferente o problema de determinação da referência angular, isso porque as medidas sincronizadas de ângulo de fase de tensão são determinadas pelo *clock* do sistema de GPS. Vale lembrar que, no processo de EESEP convencional (sem considerar medidas fasoriais sincronizadas), a escolha da barra de referência é arbitrária, dessa maneira, uma das barras do sistema é escolhida como referência angular, uma vez que é irrelevante, para o processo de EESEP, o valor absoluto do ângulo de fase de tensão da barra de referência.

Dentre os estimadores de estado híbridos, destacam-se, a nosso ver:

- Estimador de Estado Híbrido de duas Fases (ZHOU et al., 2006)
- Estimador de Estado WLS híbrido (ZHU; ABUR, 2007)

O Estimador de Estado Híbrido de duas Fases proposto por Zhou et al. (2006), como o nome sugere, é dividido em duas fases. A primeira fase consiste em determinar as variáveis de estados do SEP, para tanto, processando exclusivamente as medidas convencionais, através do estimador WLS convencional. Na segunda fase, os estados estimados na primeira fase são utilizados como conjunto de medidas, juntamente com as medidas fasoriais obtidas pelas UMFs, e, então, são estimadas as variáveis de estados do SEP através do estimador WLS Linear, pois as medidas relacionam diretamente as variáveis de estado do sistema.

O Estimador de Estado WLS híbrido proposto por Zhu e Abur (2007) trata as medidas fasoriais sincronizadas, obtidas pelas UMFs, como se fossem medidas convencionais e, na existência de pelo menos uma medida angular de tensão, a referência angular vai ser determinada pelo *clock* do sistema de GPS. Então, tal metodologia não requer muitas modificações na formulação do processo de EE WLS, que faz uso apenas de medidas conven-

cionais e permite o processamento de EGs das MFSs. A formulação do WLS Híbrido apresentada por Zhu e Abur (2007) é praticamente a mesma do WLS Convencional apresentada na seção 2.2.1. A diferença é a inclusão das medidas fasoriais de tensão e corrente que, na matriz jacobiana, resulta no aparecimento de novas linhas referente às derivadas parciais dos fasores de tensão e corrente (BORGES, 2011).

2.3 Observabilidade

Um SEP é dito observável se, através do conjunto de medidas existentes, as variáveis de estado do sistema puderem ser determinadas por um estimador de estado.

Então, é de suma importância que, antes de estimar as variáveis de estado de um SEP, seja efetuada uma análise da observabilidade. A respeito, são apresentados, a seguir, os conceitos de observabilidade algébrica, numérica e topológica, definidos em (KRUMPHOLZ et al., 1980) com base na formulação do EE WLS.

Observabilidade Algébrica: para um SEP ser considerado algebricamente observável, a correspondente matriz Jacobiana do EE WLS deve ter posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas.

Observabilidade Numérica: para um SEP ser considerado numericamente observável, deve ser possível fazer uma estimativa para o vetor de variáveis de estados, através das equações do estimador de estado.

Observabilidade Topológica: para um SEP ser considerado topologicamente observável, através das medidas disponíveis, deve ser possível criar uma árvore geradora observável⁶, sendo as arestas da árvore as medidas e os nós as barras nas quais se deve estimar as variáveis de estado.

2.3.1 Observabilidade Algébrica no Modelo $P\theta$

Para a obtenção de um procedimento mais simples, este trabalho aborda a análise de observabilidade apenas pelo modelo $P\theta$. Neste sentido, expõem-se algumas considerações.

⁶Uma árvore geradora da rede é dita observável (ou de posto completo), com respeito a um conjunto de medidas, se for possível associar uma medida deste conjunto a cada aresta da árvore, sem que existam duas ou mais arestas associadas à mesma medida.

A matriz Jacobiana $H(\underline{x})$, dada pela equação (2.19), relaciona as medidas disponíveis com as variáveis de estado a serem estimadas. Para o estimador não linear, um sistema com n barras é observável se:

$$\text{Posto}(H) = 2n - 1, \quad (2.24)$$

sendo $(2n - 1)$ a dimensão do vetor de variáveis de estado a ser estimado (KRUMPHOL et al., 1980).

Através do desacoplamento $P\theta$ - QV , que é obtido considerando o fato de as sensibilidades $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial Q}{\partial V}$ serem mais intensas que as sensibilidades $\frac{\partial P}{\partial V}$ e $\frac{\partial Q}{\partial \theta}$, pode-se realizar a análise de observabilidade algébrica separadamente, para cada um dos modelos. Assim, um sistema, pelo modelo $P\theta$, é algebricamente observável se:

$$\text{Posto}(H_{P\theta}) = n - 1. \quad (2.25)$$

Então, um sistema, pelo modelo QV , é algebricamente observável se:

$$\text{Posto}(H_{QV}) = n. \quad (2.26)$$

Como ocorre na maioria dos SMs, em que as medidas de potência ativa e reativa são realizadas aos pares, a observabilidade algébrica $P\theta$ garante a observabilidade algébrica QV , desde que exista pelo menos uma medida de magnitude de tensão. Dessa forma, para SMs com essas características, a análise de observabilidade pode ser realizada considerando apenas o desacoplamento $P\theta$ (KRUMPHOL et al., 1980).

2.3.2 Observabilidade para SMs fasoriais sincronizado e híbridos

A visualização do desacoplamento $P\theta$ - QV na presença de medidas fasoriais de corrente não é imediata. Então, para possibilitar tal visualização, utilizam-se como base as equações dos fasores de correntes, onde, ao considerar que a impedância de todos os ramos seja igual a $j1 p.u.$, e as magnitudes de tensões em todas as barras sejam iguais a $1 p.u.$, a parte real do fasor de corrente, medido por uma UMF da barra i para barra j , pode ser modelada como (CHEN; ABUR, 2006; KORRES; MANOUSAKIS, 2011):

$$\text{real}(I_{ij}) \cong \theta_i - \theta_j \quad (2.27)$$

sendo θ_i e θ_j os ângulos de fase de tensão das barras i e j , respectivamente.

Então, é possível modelar as medidas de ângulo de fase de tensão e módulo da corrente, como:

- As medidas de ângulo de fase das tensões nodais são modeladas como se fossem medidas de fluxo de potência em ramos fictícios, com impedância unitária, que conectam as barras onde as medidas foram realizadas com uma barra fictícia, representando a referência de GPS (BORGES, 2011).
- As medidas de módulo de corrente são modeladas como se fossem medidas de fluxo no respectivo ramo.

A figura 2.3 exemplifica a estrutura da matriz jacobiana de um estimador WLS híbrido linear contendo uma medida fasorial de ângulo de fase de tensão e do módulo da corrente de ramo, ambas instaladas na barra i .

$$\begin{array}{c}
 \dots \quad \theta_i \quad C_{i-j} \quad \dots \\
 \text{Barra } i \quad \left[\begin{array}{ccccc}
 0 & 1 & 1 & 0 \\
 \vdots & 0 & 0 & \vdots \\
 \text{Barra } j & \vdots & 0 & -1 & \vdots \\
 \text{GPS} & 0 & -1 & 0 & 0
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

Figura 2.3 - Matriz jacobiana para estimador híbrido.

A adição da barra é essencial, pois, supondo-se um SM onde todas as barras do sistema possuem uma MFS de ângulo de fase de tensão e não seja adicionada a referência GPS, as MSFs de ângulo de fase de tensão não formariam uma árvore geradora observável. Porém, com a adição da linha GPS, as MFS de ângulo de fase de tensão estariam em uma árvore gerada observável cuja raiz é a linha adicionada, então, elas estariam conectadas entre si através da linha adicional.

Portanto, como ocorre a adição de uma barra, um sistema com “n” barras passará a ter (de forma fictícia), no modelo $P\theta$, “n+1” barras, e será observável se a correspondente matriz Jacobiana tiver posto igual a “n”.

2.4 Redundância de Medidas

Já foi mencionado que o sucesso do processo de ESEEP depende do conjunto redundante de medidas e que essas medidas estão sujeitas a erros. Porém falhas no sistema de medição podem indisponibilizar algumas medidas no centro de operação. Essas falhas podem ser provenientes da mudança da topologia da rede, problemas nos canais de telemetria, manutenção de equipamentos ou perda premente dos mesmos (VIGLIASSI, 2009).

Assim, dependendo do tipo de falha, pode ocorrer a perda de uma ou mais medidas. Isso porque o sistema de telemetria é formado pelas UTRs, que, por sua vez, transmitem diversas medidas. A falha em um medidor causa a perda de apenas uma medida. Entretanto a falha de uma UTR causa a perda de todas as medidas transmitidas por ela. Em razão disso, as análises de observabilidade e de redundância das medidas devem considerar esses dois tipos de falhas que podem ocorrer.

Em face do exposto, serão apresentadas, a seguir, as definições de MC, CCM, conjuntos p -críticos, UTRs críticas e redundância local de medidas.

2.4.1 Medidas Críticas

Uma medida é dita crítica quando a perda dessa medida, de um sistema observável, torna-o não observável. Além disso, as MCs apresentam resíduos nulos, o que torna impossível detectar EGs nas mesmas através dos resíduos do processo de estimação WLS.

2.4.2 Conjunto Crítico de Medidas

Um conjunto crítico pode ser definido como um conjunto de medidas, formado por medidas redundantes, cuja perda de qualquer medida pertencente ao conjunto torna as demais medidas críticas. Não é possível identificar EGs nas medidas pertencentes a um conjunto crítico, pois seus resíduos normalizados assinalam valores iguais em módulo (MILI et al., 1984).

2.4.3 Conjunto p -crítico

Conjunto p -crítico de medidas é um conjunto de “ p ” medidas ($p \geq 1$), associadas a um SEP observável, que, se perdidas, tornam tal sistema não observável. Entretanto a remoção de qualquer conjunto de k medidas, pertencentes a um conjunto p -crítico, com $k < p$, não causa a perda da observabilidade do sistema (LONDON JR et al., 2001). Através dessa definição, verifica-se que:

Conjunto p -crítico com $p=1$: medida crítica;

Conjunto p -crítico com $p=2$: par crítico de medidas;

Conjunto p -crítico com $p=3$: trio crítico de medidas;

e assim por diante.

2.4.4 UTR Crítica

Uma UTR é crítica se a eliminação de todas as medidas transmitidas por ela torna o sistema não observável. Deve-se destacar que, mesmo não contendo MC, uma UTR pode ser crítica.

2.4.5 Nível de Redundância Local de uma Medida

O Nível de Redundância Local (NRL) de uma medida é igual a $p-1$, sendo “ p ” o conjunto p -crítico com menor número de medidas a que ela pertence. Por exemplo, uma medida não crítica que aparece em pelo menos um par crítico apresenta $NRL = 1$.

2.5 Projeto de Sistema de Medição

O problema de projeto de SMs em SEP, para efeito de estimação de estado, é um problema de otimização, onde o objetivo é a minimização dos custos de implantação do SM considerando alguns requisitos e visando ao processo de EE (ANTONIO et al., 2001). São eles:

Observabilidade: garantir a observabilidade do sistema em situações normais de operação ou na existência de contingência. Portanto, na perda de uma ou duas medidas quaisquer ou de uma UTR, o sistema deve permanecer observável como um todo.

Confiabilidade: apresentar elevado nível de redundância para que, no processo de EE, seja possível a detecção, identificação e eliminação de erros grosseiros. Ou seja, nível de redundância tal que garanta a ausência de MCs e CCMs.

Qualidade: garantia de certo nível de precisão para que haja qualidade nas estimativas. Conforme apresentado no capítulo 1, é possível considerar aqui que é necessário minimizar a existência de medidas com elevado índice UI.

Logo, trata-se de um problema NP-Completo (BRUENI; HEATH, 2005) que pode ser formulado como:

$$\text{Min } (C_{\text{med. scada}} + C_{\text{UTR}} + C_{\text{UMF de barra}} + C_{\text{UMF de ramo}}) \quad (2.28)$$

s.a. requisitos de observabilidade e redundância

sendo:

$C_{\text{med. scada}}$: custo para aquisição e instalação de medidores convencionais;

C_{UTR} : custo para aquisição e instalação de UTRs;

$C_{\text{PMU de barra}}$: custo para aquisição e instalação de UMFs com canal de comunicação para uma medida fasorial de tensão e n_d medidas fasoriais de corrente, sendo n_d o número de linhas adjacentes à barra onde a UMF está instalada;

$C_{\text{PMU de ramo}}$: custo para aquisição e instalação de UMFs com apenas dois canais de comunicação, um para uma medida fasorial de tensão e um para uma medida fasorial de corrente.

Em razão de o problema formulado no item 2.28 ser de natureza combinatória, discreta (ALBUQUERQUE et al., 2013), com vários mínimos locais e com um grande número de soluções possíveis, não se dispõe de ferramentas analíticas eficientes para a sua solução. Desta forma, desenvolveram-se diversas metodologias para projeto e fortalecimento de SMs baseados em meta-heurísticas, que serão apresentadas no Capítulo 3.

Capítulo 3

3. Fundamentação Teórica

Neste capítulo será apresentada, inicialmente, uma sucinta revisão bibliográfica dos métodos desenvolvidos para obtenção de SMs convencionais, fasoriais sincronizados e híbridos para efeito de EESEP. Em seguida, será delineado o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho para projeto e fortalecimento de SMs convencionais, fasoriais sincronizados e híbridos (objetivo número 1) e projeto e fortalecimento de SMs convencionais com baixo UI (objetivo número 2). Isto é, serão apresentadas: informações básicas sobre AEs; o método que possibilita a identificação do NRL das medidas através da análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T proposto em (LONDON JR et al., 2001), o método para projeto e fortalecimento de SMs, a partir da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T proposto em (LONDON JR et al., 2002) e, por último, da metodologia para projeto e fortalecimento de SMs confiáveis que faz uso da matriz H_{Δ}^T e de AEs proposto em (VIGLIASSI et al., 2009).

Vale lembrar, mais uma vez, que o método proposto em (LONDON JR et al., 2002) possibilita a obtenção de SMs confiáveis, ou seja, observáveis e isentos de MCs, CCMs e UTRs críticas, mas não considera o custo para aquisição e instalação de medidores e UTRs. Por sua vez, a metodologia proposta em Vigliassi et al. (2009), denominada AERS (Algoritmo Evolutivo com Representação Sequencial), possibilita a obtenção de SMs confiáveis de baixo custo. Entretanto, essa metodologia não considera a existência de MFSs.

3.1 Heurística Construtiva

Heurísticas construtivas são procedimentos que constroem uma solução inicial a partir de um conjunto de regras específicas para um dado problema de otimização. Como as heurísticas construtivas, geralmente, são rápidas, os resultados obtidos através delas

são usados como ponto de partida para algoritmos de melhoria e/ou meta-heurísticas (ARROYO, 2002). Portanto, é possível inferir que heurística construtiva é a parte de um algoritmo de otimização que, através de informações particulares do problema, auxilia o método a construir soluções.

3.2 Algoritmos Evolutivos

Algoritmos Evolutivos são algoritmos baseados nos mecanismos de evolução biológica, tais como a seleção natural proposta por Darwin, em 1858⁷, os quais deram origem a diversas técnicas computacionais. Entre elas, as que mais se destacam são os AGs.

Proposto por Holland (1975), o AG é inspirado na maneira como o darwinismo explica o processo de evolução, baseando-se então na seleção natural, cruzamento e mutação (HOLLAND, 1975). Então, pode-se apontar que o AG cria uma população de possíveis respostas e submete-as ao processo de evolução para aprimorá-las, conforme diagrama a seguir:

Figura 3.1 – Fluxograma básico das etapas do processo de evolução do AG.

⁷ O ano de 1858 marcou a apresentação da teoria de evolução por seleção natural à sociedade *Linæus* de Londres, por Charles Darwin e Alfred, porém o primeiro grande trabalho teórico a respeito deste assunto foi publicado no ano seguinte.

3.2.1 Indivíduos

No AE, uma possível solução para o problema (fenótipo) é representada por um indivíduo, também chamado de cromossomo. Por codificarem possíveis soluções para a problema a ser trado, os indivíduos são a unidade fundamental de um AE. Geralmente, os primeiros indivíduos são gerados de forma aleatória.

Codificação

A escolha da representação do indivíduo é uma das etapas mais importante do desenvolvimento do algoritmo, desse modo, os indivíduos devem ser codificados de acordo com o problema, devendo representar uma solução como um todo e ser o mais simples possível (VIGLIASSI, 2009). No AG clássico proposto por Holland (1975), os indivíduos eram codificados em *strings* binárias de tamanho fixo. Cada elemento dessa *string* recebe o nome gene, podendo assumir valores binários, inteiros ou reais, como apresentado na figura 3.2.

Codificação Binária	0	1	0	1	1	0	1	1
Codificação Inteira	4	8	3	1	5	2	7	6
Codificação Real	2,1	10,4	1,6	1	0,2	4,33	6,6	0

Figura 3.2 - Tipos de codificação (Genótipo).

3.2.2 População

O conjunto dos indivíduos de um AE é chamado de população. É através da dinâmica populacional que os indivíduos evoluem. O processo de evolução ocorre nas chamadas gerações. A cada geração, novos indivíduos são criados através da dinâmica populacional e avaliados segundo sua função de avaliação⁸.

A função de avaliação atribui um valor a cada indivíduo da população, representando a capacidade desse indivíduo em resolver um determinado problema (VIGLIASSI,

⁸ A função de avaliação, chamada de aptidão ou *fitness*, mede a qualidade da solução, sendo ela uma função de máximo ou de mínimo.

2009). Como cada problema possui a sua própria função de avaliação, deve-se ter cuidado para expressar corretamente o objetivo do AE.

3.2.3 Operadores Genéticos

Como mencionado anteriormente, é através da dinâmica populacional que os indivíduos evoluem, portanto, os operadores genéticos são de fundamental importância para a evolução da solução. Os operadores genéticos mais frequentemente usados são Seleção, Cruzamento e Mutação. É a partir do processo de seleção que a nova população será gerada através do cruzamento, também chamado de *crossover*, e da mutação.

Seleção

A seleção é responsável pela permanência de boas características na população, então, um indivíduo só consegue se perpetuar no ambiente e nele se reproduzir se for capaz, graças às suas características fenotípicas, respondendo adequadamente a todos os fenômenos de seu meio e tornando-se mais adaptado. Porém indivíduos menos adaptados podem reproduzir-se, mas dificilmente se perpetuarão no ambiente. A seleção dos indivíduos que irão cruzar pode ser realizada através de vários métodos, sendo os mais comuns a Roleta e o Torneio.

No método roleta, cada indivíduo da população é representado, em uma roleta, com uma parcela ao seu *fitness*. Desta forma, os indivíduos com melhor aptidão têm uma porção maior da roleta, portanto, tendo maior probabilidade de serem selecionados. Entretanto, quando a codificação dos indivíduos é Real e o espaço de busca possibilita valores positivos e negativos, para os valores negativos, haverá problemas para determinação do percentual da roleta.

A seleção por torneio consiste em selecionar aleatoriamente um conjunto de indivíduos da população atual e, entre eles, o que possui melhor *fitness* será o ganhador do torneio (GOLDBERG, 1989).

É comum que o melhor indivíduo da população atual seja escolhido para prosseguir para a próxima geração sem sofrer mutação ou qualquer alteração, assim, garantindo a sua existência, o que aumenta a probabilidade desse indivíduo propagar as suas características entre os demais indivíduos da população através do cruzamento. Esse método é chamado de Elitismo.

Crossover (Recombinação)

O *crossover* cria novos indivíduos através da combinação genética de dois ou mais indivíduos, chamados de pais. Ele é o responsável pela troca de carga genética entre os indivíduos.

Existem diversos tipos de *crossover*⁹, variando o número de pontos de quebra ou indivíduos. O *crossover* de um ponto, como mostrado na figura 3.3, é o mais comum, haja vista sua facilidade de implementação.

Figura 3.3 – *Crossover* de um ponto.

A realização do *crossover* em indivíduos de representação binária é simples, devendo-se manter as restrições impostas por cada problema. Nos indivíduos que representam sequências ou ordens, onde não é permitida a repetição de dados em um mesmo indivíduo, o *crossover* tende a ser mais trabalhoso (VIGLIASSI, 2009).

Mutação

A mutação modifica aleatoriamente um ou mais genes de um cromossomo. O papel desse operador é introduzir diversidade na população, fazendo com que os indivíduos explorem novas áreas do espaço de busca (MICHALEWICZ, 1996).

Em Holland (1975) foi proposto o operador de mutação padrão para codificação binária, onde simplesmente realiza-se a inversão do valor de um gene do cromossomo, como apresentado na figura 3.4.

A mesma restrição imposta nas operações de *crossover*, em indivíduos representados por sequência ou ordens citadas anteriormente, aplica-se ao operador de mutação. Nessas situações de representação, o operador de mutação simplesmente promove a troca de posição dos genes, conforme a figura 3.5.

⁹ Uma vasta revisão bibliográfica sobre os tipos de *crossover* pode ser encontrada em Goldberg (1989).

Antes da mutação

0	1	0	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---

Depois da mutação

0	1	0	0	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---

Figura 3.4 - Operador de mutação para representação binária.

Antes da mutação

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
----	----	----	----	----	----	----

Depois da mutação

M1	M5	M3	M4	M2	M6	M7
----	----	----	----	----	----	----

Figura 3.5 - Operador de mutação tipo *Swap Mutate* para representação sequencial.

3.3 Métodos para projeto e fortalecimento de SMs

3.3.1 Sistemas de Medição Convencionais

Diversos métodos para projeto e fortalecimento de SMs convencionais têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas. A limitação dos primeiros métodos propostos era o tratamento dado às UTRs, pois em muitos nem se considerava a existência das mesmas, sendo que, nas que consideravam, normalmente, eram requeridas muitas iterações para a sua identificação.

Em (CLEMENTS et al., 1982), foi apresentado um dos primeiros métodos que levou em consideração a existência das UTRs, baseando-se no algoritmo topológico para identificação de MCs proposto por Clements, Krumpholz e Davis (1981). Porém a análise de confiabilidade do SM é realizada considerando a disponibilidade ou não da UTR, sendo que se pondera a perda de uma UTR um evento independente. Pelo fato de basear-se em um algoritmo que permite identificar apenas MCs, tal método permite determinar, diretamente, se uma UTR é crítica quando a mesma possui alguma medida crítica. Contudo podem existir UTRs críticas mesmo não possuindo MC (LONDON JR et al., 2001), e para

permitir a identificação dessas UTRs críticas, que não possuam MCs, o método proposto por (CLEMENTS et al., 1982) requer que o algoritmo de identificação de MCs seja processado “p” vezes, sendo “p” o número de medidas transmitidas pela UTR em análise.

Ao considerar também a existência das UTRs, em (KORRES; CONTAXIS, 1994) foi desenvolvido um método para análise e fortalecimento de SMs que utiliza um algoritmo numérico para análise da redundância das medidas, para identificação de MCs e CCMs (KORRES; CONTAXIS, 1991). Portanto, assim como em Clements, Krumpholz e Davis (1982), esse método não consegue identificar diretamente as UTRs críticas que não possuem MCs.

Em (MAGNAGO; ABUR, 1999) foi apresentado um procedimento sistemático pelo qual um SM pode ser atualizado. Este procedimento produz um SM que pode resistir a qualquer perda de linha ou de uma única medida, sem que o sistema se torne não observável.

Em (YEHIA et al., 2001) foi proposto um método para alocação de UTRs que tem como objetivo a obtenção de um SM que, além de garantir a observabilidade do sistema mesmo com a perda de uma UTR qualquer, não contenha MCs. Entretanto tal metodologia não se preocupa com a existência de CCMs e não possibilita a identificação de UTR crítica de forma direta.

Já o método proposto por London Jr. et al. (2002) permite determinar onde devem ser instalados medidores e UTRs, em um SEP, para a obtenção de um SM Confiável (SMC). O método baseia-se na análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T , que permite identificar os conjuntos de medidas que caso perdidas fazem um sistema de potência observável torna-se não observável, assim como possibilita identificar UTRs críticas de forma mais direta e simples. Porém tal método não considera os custos de implantação do SMC.

Tal limitação foi superada em (VIGLIASSI et al., 2009), que apresentaram um AE que, combinado com as propriedades da H_{Δ}^T , permite a obtenção de um SM isento de MCs, CCMs, e UTRs críticas considerando múltiplas topologias, levando em consideração os custos associados ao SMC.

Já em (ROCHA et al., 2010b) é apresentado o conceito de Conjunto Crítico de UTRs, aumentando o número de critérios técnicos a serem avaliados para determinação de um SMC. Outra característica dessa metodologia é a utilização de uma heurística construtiva combinada com uma meta-heurística Ant Colony Optimization (ACO). A heurística construtiva é utilizada para a construção inicial da solução, garantindo soluções boas que são melhoradas pela meta-heurística.

Todas as metodologias citadas até aqui não consideram a existência de MFSs associadas ao SM. Adiante, analisar-se-ão métodos para superar tal limitação

3.3.2 Sistemas de Medição Fasoriais Sincronizados

Conforme mencionado no capítulo 1, nos últimos anos, diferentes abordagens foram surgindo para projeto de SMs fasoriais sincronizados.

Em (AL-MOHAMMED et al., 2011) foi utilizado um algoritmo de evolução diferencial para a obtenção de SMs observáveis, onde a observabilidade é avaliada de acordo com as diretrizes da observabilidade topológica, sendo que o objetivo é a minimização do número de UMFs e, ao mesmo tempo, garantir o máximo de redundâncias das MFSs. O mesmo ainda permite o fortalecimento ou realocação de medidores, considerando a possibilidade de o SEP operar com múltiplas topologias.

Em (KOUTSOUKIS et al., 2013) é proposta uma metodologia baseada na meta-heurística Tabu Search, para a obtenção de SMs fasoriais sincronizados através da alocação ótima de UMFs. Além dos ótimos resultados encontrados pela metodologia, o grande diferencial da metodologia é que a avaliação da observabilidade do SEP é feita por método numérico.

Ainda nos métodos heurísticos, em (HUI-LING et al., 2013) é proposto um Algoritmo Genético (AG) melhorado, chamado de MST-GA, que, combinado com teoria de grafo, possibilita reparar soluções ineficazes. O problema é formulado para minimizar o número de UMFs instaladas e maximizar a redundância das medidas.

Outros métodos para projeto de SMs fasoriais sincronizados, também baseados em meta-heurísticas, que priorizam a minimização do número de UMFs a serem instalados têm sido propostos, tais como AG (ALLAGUI et al., 2012), Particle Swarm Optimization (PSO) (WANG et al., 2012) e Simulated Annealing (SA) (BALDWIN et al., 1993; WANG et al., 2012).

Uma vasta revisão bibliográfica sobre métodos para projeto de SMs com MFSs pode ser encontrada em (MANOUSAKIS et al., 2012).

3.3.3 Sistemas de Medição Híbridos

Devido ao elevado custo das UMFs, a total substituição do SM convencional para o SM fasorial sincronizado será de forma gradativa. Por conseguinte, faz-se necessário que

as metodologias possibilitem o tratamento de UMFs simultaneamente com medidas convencionais.

Nenhum dos métodos citados até aqui leva em consideração a existência de medidas convencionais (SCADA) em conjunto com MFSs, o que já é uma realidade nos SEPs. Tal limitação foi superada em alguns artigos, como, por exemplo, em (CHAKRABARTI et al., 2009; ABBASY; ISMAIL, 2009; CIPRIANI; COSTA, 2010; KAVASSERI; SRINIVASAN, 2011; AZIZI et al., 2013; ESMAILI et al., 2013), conforme se observará a seguir.

Em (CHAKRABARTI et al., 2009) é apresentada uma metodologia para alocação de UMFs visando garantir a observabilidade completa do SEP na existência, ou não, de medidas convencionais de fluxo/injeção previamente instaladas. A metodologia faz uso de programação quadrática para minimizar o número de UMFs e maximizar a redundância das medidas garantindo a observabilidade completa do SEP. Também assegura a observabilidade do SEP em condições normais de operação, bem como sob contingência, para o caso de perda de uma linha de transmissão ou de uma única UMF.

Em (ESMAILI et al., 2013), utilizando programação linear inteira mista, a metodologia minimiza o número de UMFs, bem como maximiza a redundância das medidas considerando todos os critérios técnicos da metodologia (CHAKRABARTI et al., 2009). Contudo a metodologia apresenta um diferencial quanto à possibilidade de proibir instalação de UMFs em barras radiais. Nessa condição, a metodologia assume que barras radiais possuem medidas de fluxo para efeito de tarifação, portanto não seria necessária a instalação de UMFs para garantir a observabilidade.

Já em (ABBASY; ISMAIL, 2009) é proposta uma metodologia baseada em programação linear inteira binária para alocação de UMFs que, ao contrário das metodologias até aqui citadas, trata o problema de observabilidade em condições normais de operação, bem como na perda de múltiplas UMFs.

Nenhuma das metodologias até aqui apresentadas, para projeto e fortalecimento de SMs híbridos, levava em conta a possibilidade de limitar o número de canais de comunicação das UMFs. Tal limitação foi superada em (AZIZI et al., 2013) e (EMAMI; ABUR, 2010), onde todas as UMFs podem apresentar o mesmo número definido de canais de comunicação.

Como é mais comum a falha de canais de comunicação de uma UMF do que a perda total da UMF (ALBUQUERQUE; PAUCAR, 2013), é de fundamental importância que o SM híbrido não apresente nenhuma MC. Em (CIPRIANI; COSTA, 2010) foi apresentada uma metodologia que permite a obtenção de um SM híbrido, em que é garantida a observabilidade do SEP mesmo na perda de qualquer medida. Portanto, é assegurado que não

colunas são chamadas de Medidas Básicas, pois são suficientes para tornar o sistema observável.

As medidas da submatriz R são chamadas de Suplementares. Isso em razão de as mesmas não serem necessárias para observabilidade do sistema (são medidas redundantes). Porém essas medidas são fundamentais para obtenção de níveis adequados de redundância.

As linhas da matriz H_{Δ}^T correspondem às variáveis de estado equivalentes, que são combinações lineares das variáveis de estado do sistema. Então, os elementos não nulos que aparecem em uma linha da matriz H_{Δ}^T indicam as medidas que dão informação da variável de estado equivalente correspondentes àquela linha. Logo, através da análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T é possível identificar os chamados conjuntos p -críticos de medidas (LONDON et al., 2007).

A busca pelos conjuntos p -críticos de medidas é dividida em duas fases:

- (i) Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contêm apenas uma medida básica.
- (ii) Identificação dos conjuntos p -críticos de medidas que contêm mais de uma medida básica.

Considera-se, então, o seguinte Teorema, cuja demonstração é apresentada (LONDON JR et al. 2001):

Teorema 1: As p medidas, correspondentes às colunas dos p elementos não nulos que pertencem a uma mesma linha da matriz H_{Δ}^T , formam um conjunto p -crítico de medidas contendo apenas uma Medida básica.

Através do Teorema 1, é possível concluir que: (i) quando uma linha tem apenas um elemento não nulo, significa que a informação do estado equivalente, corresponde àquela linha, é fornecida apenas pela medida correspondente à coluna desse elemento, portanto, essa medida é crítica; (ii) quando uma linha tem dois elementos não nulos é porque existem apenas duas medidas dando informação do estado equivalente correspondente a essa linha. Consequentemente, essas duas medidas, que correspondem às colunas desses dois elementos não nulos, formam um par crítico de medidas. Ou seja, um conjunto p -crítico com $p = 2$. E assim por diante.

Para realizar a segunda fase da busca, elimina-se uma medida básica não crítica da matriz H_{Δ}^T , para, em sequência, proceder-se a obtenção da nova matriz H_{Δ}^T . Como a medida (ou coluna) retirada é redundante (ou linearmente dependente) de pelo menos uma

medida suplementar (uma coluna da submatriz R), existe outra medida (ou coluna) que pode substituí-la. Após a substituição, analisando as linhas da nova matriz, conclui-se que as p medidas, associadas aos novos conjuntos p -críticos identificados, constituem, juntamente com a medida básica retirada, um conjunto $(p+1)$ crítico.

Após a identificação dos conjuntos p -críticos de medidas, o método proposto em (LONDON JR et al. 2001) possibilita a identificação do NRL das medidas de acordo com a definição apresentada no capítulo 2, seção 2.4.5.

H_{Δ}^T com medidas convencionais e fasoriais sincronizadas

Em (LONDON JR et al. 2009) demonstrou-se que é possível realizar a análise de observabilidade e redundância de medidas através do método da fatoração triangular da matriz jacobiana com medidas convencionais e fasoriais sincronizadas.

A estrutura da matriz H obtida para um sistema com medidas convencionais e fasoriais sincronizadas é praticamente a mesma de quando estão presentes apenas medidas convencionais, conforme ilustrado na figura 2.3. A diferença é que, ao invés da linha n , sendo n o número de barras do sistema, ser formada por zeros, será a linha $n+1$. Isto em razão da forma com que são tratadas as medidas de ângulo de fase de tensão, que são modeladas como medidas de fluxo de potência em ramos fictícios, com impedância unitária, que conectam as barras onde as medidas foram realizadas e uma barra fictícia representando a referência de GPS.

3.5 Método para projeto e fortalecimento de SMs convencionais através da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T

Fazendo uso das propriedades da matriz H_{Δ}^T para identificação de conjuntos p -críticos, London Jr. et al. (2002) propuseram um método para análise e fortalecimento de um SM convencionais já existente de duas maneiras: (i) através da seleção de medidas candidatas, que consiste em selecionar novos medidores em barras que já possuam UTRs instaladas; (ii) através da seleção de UTRs candidatas em barras que não possuem UTRs.

O método trabalha em três fases distintas, conforme ilustrado no fluxograma apresentado na figura 3.7.

Figura 3.7—Fluxograma do método proposto em (LONDON JR. et al., 2002).

3.5.1 Fase 1 – Análise e restauração da observabilidade

Na primeira fase é feita a análise de observabilidade do SEP, considerando o SM já existente. Se o sistema não for observável, o método permite determinar onde devem ser instalados medidores e/ou UTRs para tornar o SEP observável como um todo.

A análise de observabilidade é realizada através da fatoração triangular da matriz H^T , que, para sistemas observáveis, resultará em apenas um pivô nulo, isto é, um elemento nulo na diagonal (n, n) , sendo “ n ” o número de barras do sistema. Lembrando que para um SM com medidas convencionais e fasoriais sincronizadas aparecerá um elemento nulo na diagonal $(n + 1, n + 1)$.

Caso o sistema não seja observável, surgirá, durante a fatoração de H^T , um pivô nulo antes da diagonal (n, n) . Além disso, todas as demais colunas da matriz H^T que está sendo fatorada terão elementos nulos na linha do pivô nulo. Isto indica que nenhuma me-

dida já instalada fornece informação sobre a variável de estado equivalente correspondente à linha do pivô nulo. Nesta situação, o próximo passo do método será a busca por uma medida candidata¹⁰ que dê aquela informação.

A busca por medidas candidatas procedesse da seguinte forma: (i) cria-se uma nova coluna na matriz H^T , onde será armazenada a medida candidata para análise; (ii) aplica-se a essa coluna os fatores triangulares obtidos até o momento; (iii) caso apareça um elemento não nulo, na linha correspondente ao pivô nulo, então, a medida analisada é selecionada para ser instalada, assim, promovendo a restauração da observabilidade do sistema.

Caso ocorra a situação em que não existam medidas candidatas que forneçam a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha do pivô nulo, buscar-se-á, então, uma UTR candidata que dê a informação desejada, de forma análoga à busca por medidas candidatas. A diferença entre ambas é que, na busca de UTR candidata, considera-se, ao mesmo tempo, todas as medidas transmitidas por essa UTR. Então, os fatores triangulares são aplicados em todas as medidas transmitidas pela UTR, e se pelo menos uma das medidas fornecer a informação desejada, tal UTR e a correspondente medida serão selecionadas para serem instaladas e as demais medidas dessa UTR serão classificadas como medidas candidatas.

3.5.2 Fase 2 – Análise e restauração do nível de redundância das medidas

Na segunda fase, o objetivo é a obtenção de um SM formado por medidas com $NRL > 1$ (SEÇÃO 2.4.5), pois isso garantiria a obtenção de um SM isento de MCs e de CCMs, uma vez que MC possui NRL igual a zero e as medidas de um CCM possuem NRL igual a 1.

Para que todas as medidas de um sistema de medição tenham $NRL > 1$, é necessário garantir a não existência de conjuntos p -críticos de medidas com $p \leq 2$. Como todos os conjuntos p -críticos possuem pelo menos uma medida básica, basta garantir que o menor conjunto p -crítico formado por uma medida básica tenha $p > 2$, assim ter-se-á $NRL > 1$ para todas as medidas disponíveis.

A primeira análise, então, é a identificação do NRL das medidas básicas, através da análise da matriz H_{Δ}^T , como demonstrado em (LONDON JR et al. 2001). Caso exista alguma medida básica com $NRL \leq 1$, procede-se a busca das medidas e/ou UTRs candidatas a fim de aumentar tal NRL. Para isto, o método é dividido em dois passos:

¹⁰ Medida que possui sua UTR instalada, porém não está instalada.

Passo 1: Determinar qual a informação dada pela medida básica, com $NRL \leq 1$: consiste em identificar a linha do elemento não nulo, que aparece na coluna da matriz H_{Δ}^t , correspondente a essa medida.

Passo 2: Realizar a busca de uma medida e/ou UTR candidata, dando a informação da variável de estado equivalente, correspondente à linha identificada na etapa anterior.

3.5.3 Fase 3– Análise e aumento da redundância das UTRs críticas

A terceira e última fase permite a identificação e o aumento da redundância das UTRs críticas.

Identificação de UTRs Críticas

A identificação de UTRs críticas compreende dois passos:

Passo 1: Através da estrutura da matriz H_{Δ}^T , identifique os conjuntos p -críticos de medidas, formados por apenas uma medida básica. Em seguida, classifique como crítica a UTR que transmitir pelo menos um desses conjuntos.

Em (LONDON JR et al., 2001) relatou-se que conjuntos p -críticos, formados por mais de uma medida básica, não são identificados diretamente através da estrutura da matriz H_{Δ}^T . Logo, podem existir UTRs que são críticas por transmitirem pelo menos um desses conjuntos p -críticos. Dessa forma, para garantir que todas as UTRs críticas sejam identificadas, é necessário o passo 2.

Passo 2: Se existir alguma UTR ainda não identificada como crítica, que transmite mais de uma medida Básica, elimina-se da matriz H_{Δ}^T as colunas correspondentes a todas as medidas transmitidas por ela. Em seguida, verifica-se se é possível obter uma nova matriz H_{Δ}^T , trocando-se as posições de algumas de suas colunas. Se isso não for possível, a UTR que foi eliminada é classificada como crítica.

Tornando redundante as UTRs críticas

Para a determinação de onde devem ser instalados medidores e/ou UTRs para tornar redundantes as UTRs críticas, considerar-se-ão também dois passos:

Passo 1: Se a UTR tiver sido identificada como crítica no Passo 1 do processo de identificação de UTRs críticas, verifique qual é a linha correspondente ao conjunto p -crítico

transmitido por essa UTR. Em seguida, proceda à busca de uma medida e/ou UTR candidata, dando a informação da variável de estado equivalente, correspondente àquela linha.

Passo 2: Se a UTR tiver sido identificada como crítica no passo 2 do processo de identificação de UTRs críticas, determine quais as linhas da matriz H_{Δ}^T , não considerando a última linha dessa matriz, que, após a eliminação da UTR crítica, tenha ficado com todos os seus elementos iguais a zero. Em sequência, proceda à busca das medidas e/ou UTRs candidatas, dando as informações das variáveis de estado equivalentes correspondentes àquelas linhas.

3.5.4 Exemplo de aplicação do método

Neste exemplo, conforme apresentado em (VIGLIASSI, 2009), o método proposto por London Jr. et al. (2002) é aplicado ao sistema de 6 barras, associado ao sistema de medição convencional não observável ilustrado na figura 3.8. Considera-se a existência de uma UTR por barra.

De acordo com a figura 3.8, o conjunto de medidas e UTRs candidatas, para o fortalecimento daquele SM, é o seguinte:

- 2 medidas candidatas: a medida de injeção na barra 3 (I3) e a medida de fluxo da barra 3 para a barra 4 (F7);
- 2 UTRs candidatas: uma UTR na barra 2 (UTR5), que transmite a medida de injeção na barra 2 (I2) e as medidas de fluxo da barra 2 para a barra 1 (F8) e da barra 2 para a barra 3 (F9); e outra UTR na barra 4 (UTR 6), que transmite a medida de injeção na barra 4 e as medidas de fluxoda barra 4 para a barra 5 (F11) e da barra 4 para a barra 6 (F12).

Figura 3.8 - Sistema de 6 barras associado a um sistema de medição não observável (VIGLIASSI, 2009).

Legenda:

Barra do sistema
Linha de transmissão
Medida de fluxo de potência instalada
Medida de injeção de potência instalada
Medida de fluxo de potência candidata
Medida de injeção de potência candidata

UTR instalada
UTR candidata

Fase 1:

Passo 1: Forme a matriz H^T , a partir do SM já existente:

	UTR 1			UTR 2		UTR 3		UTR 4	
	F1	F2	I1	F3	F4	F5	I5	F6	I6
1	1	1	2	-1	0	0	0	0	0
2	-1	0	-1	0	-1	0	0	0	0
3	0	-1	-1	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1
5	0	0	0	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Fatorando essa matriz até $H^T(d,d)=0$, obtém-se:

	F1	F2	I1	F3	F4	F5	I5	F6	I6
1	1	1	2	-1	0	0	0	0	0
2	(1)	1	1	-1	-1	0	0	0	0
3	0	(1)	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1
5	0	0	0	0	0	1	1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Observação 3.4.1: Os números que aparecem entre parênteses são os fatores triangulares.

Como $H^t(3,3) = 0$, $n \neq 3$ ($n = 6$), vá para o próximo passo.

Passo 2: Verificar se a medida candidata I3 dá informação do estado equivalente correspondente à linha 3. Cria-se, então, a coluna 10, na matriz H_{Δ}^T , onde será armazenada a medida I3. Em seguida, aplica-se a essa coluna os fatores triangulares obtidos até o momento. A matriz H_{Δ}^T torna-se:

$$H_{\Delta}^T =$$

	F1	F2	I1	F3	F4	F5	I5	F6	I6	I3
1	1	1	2	-1	0	0	0	0	0	-1
2	(1)	1	1	-1	-1	0	0	0	0	-2
3	0	(1)	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1
5	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0

Como $H^T(3,10) \neq 0$, selecione I3 e vá para o passo 3.

Passo 3: Fatorando H^T até $H^T(d,d) = 0$, obtém-se, após a troca de posições de algumas colunas de H^T , que se fez necessária:

$$H_{\Delta}^T =$$

	F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1
1	1	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0
2	(1)	1	-2	0	0	-1	0	-1	0	1
3	0	(1)	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	(1)	-1	-1	0	-1	0	-1	0
5	0	0	0	(1)	-1	0	0	0	-1	0
6	0	0	0	0	(1)	0	0	0	0	0

Como $H^T(6,6) = 0$ e $n = 6$, o sistema é observável, considerando o sistema de medição já existente e a instalação da medida I3 e o processo termina.

Fase 2:

Para executar esta fase, inicialmente obtém-se a matriz H_{Δ}^T , a partir da matriz H^T parcialmente fatorada na Fase 1. A matriz H_{Δ}^T é:

$$H_{\Delta}^T =$$

	F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2	0	1	0	0	0	-1	0	1	0	1
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Onde a submatriz I , destacada na matriz H_{Δ}^T anterior, representa as medidas básicas (F1, F2, I3, F5 e F6), suficientes para tornar o sistema observável, e a submatriz R representa as medidas suplementares.

A matriz dos fatores triangulares é:

		F1	F2	I3	F5	F6
1		1	-1	1	0	0
2		1	1	2	0	0
3	Fatores =	0	1	1	0	0
4		0	0	1	-1	-1
5		0	0	0	1	-1
6		0	0	0	0	1

Passo 1: Analisando H_{Δ}^T , como indicado em (LONDON JR et al. 2001), verifica-se que as medidas básicas I3, F5 e F6 têm $NRL \leq 1$, como destacado na matriz H_{Δ}^T a seguir:

		F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1
1		1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2		0	1	0	0	0	-1	0	-1	0	1
3	$H_{\Delta}^T =$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
4		0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
5		0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Passo 2: As colunas correspondentes às medidas básicas I3, F5 e F6 possuem elementos não nulos nas linhas: 3, 4 e 5.

Passo 3: Incluindo a medida candidata F7, da UTR2 já instalada, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^T :

		F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1	F7
1		1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1
2		0	1	0	0	0	-1	0	-1	0	1	2
3	$H_{\Delta}^T =$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4		0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0
5		0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
6		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como a coluna 11 tem elemento não nulo na linha 3, F7 é selecionada para ser instalada, então, volte ao Passo 1.

Passo 1: As medidas básicas I3, F5 e F6 ainda possuem $NRL \leq 1$.

Passo 3: As colunas correspondentes às medidas básicas I3, F5 e F6 possuem elementos não nulos nas linhas: 3, 4 e 5.

Passo 4: Como não existem mais medidas candidatas, o método vai testar as UTRs candidatas. Testando a UTR 5, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^T :

	F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1	F7	F8	F9	I2
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	-1	-1	-2
2	0	1	0	0	0	-1	0	-1	0	1	2	0	1	1
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como não surgiu elemento não nulo algum, nas linhas 3, 4 e 5, nas colunas de H_{Δ}^T correspondentes às medidas transmitidas pela UTR 5, esta UTR não será selecionada para ser instalada. Testando a UTR 6, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^T :

	F1	F2	I3	F5	F6	F3	I5	F4	I6	I1	F7	F10	F11	I2	I4
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	-1	1	0	0	1
2	0	1	0	0	0	-1	0	-1	0	1	2	-2	0	0	-2
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	-1
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	-1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Como apareceram elementos não nulos, nas linhas 3, 4 e 5, nas colunas de H_{Δ}^T correspondentes às medidas transmitidas pela UTR 6, esta UTR será selecionada para ser instalada, então, volta-se ao Passo 1.

Passo 1: Como todas as medidas básicas têm $NRL \leq 1$ o processo termina.

Fase 3:

Passo 1: Identificando UTR crítica.

Etapa 1: Nenhum dos conjuntos p -críticos de medidas, identificados na análise das linhas da matriz H_{Δ}^T , resultante da Fase 2, é transmitido por apenas uma UTR. Logo, esta Etapa não identifica nenhuma UTR crítica.

Etapa 2: A UTR 1 é a única UTR que transmite mais de uma medida básica. Assim, é necessário aplicar a análise da Etapa 2 para essa UTR.

Analisando a UTR 1: Eliminando da matriz H_{Δ}^T as colunas correspondentes às medidas transmitidas por essa UTR, obtém-se a seguinte matriz H_{Δ}^T :

$$H_{\Delta}^T =$$

	F4	F7	I3	F5	F6	F3	I5	I6	F10	F11	F12	I4
1	1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	-1	0	0	-1	0	0	-1
3	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-1	0	-1
5	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	-1	-1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Consequentemente, a UTR 1 é redundante.

Como resultado da análise do SM apresentado na figura 3.8, o método proposto em (LONDON JR et al. 2002) indica que, para torná-lo confiável, é necessário a instalação de: (i) um medidor de fluxo de potência da barra 3 para a barra 4; (ii) um medidor de injeção de potência na barra 3; (iii) uma UTR na barra 4, com um medidor de injeção de potência na mesma barra 4 e 3 medidores de fluxo de potência da barra 4 para as barras 3, 5 e 6.

3.5.5 AERS

Importa destacar que a metodologia para projeto e fortalecimento de sistemas de medição proposta em (VIGLIASSI et al., 2007) foi a primeira tentativa de obtenção de uma metodologia baseada na matriz H_{Δ}^T e em AEs. Deve-se ressaltar, entretanto, que tal metodologia perde eficiência em função da busca em regiões não factíveis. Tal busca ocorre em razão da codificação utilizada por essa metodologia, onde cada indivíduo é representado por um vetor binário, onde "0" indica medidor instalado e "1" medidor não instalado. Faz-se relevante lembrar que essa codificação é a mesma utilizada pelas metodologias propostas por Souza et al. (2005) e Cosser et al. (2006). A codificação utilizada no AERS, ou seja, a representação dos indivíduos de forma sequencial, torna possível a utilização de todas as propriedades da matriz H_{Δ}^T , restringindo a busca apenas nas regiões factíveis. Consequentemente, aumenta a probabilidade de o algoritmo de busca encontrar SMs confiáveis com menor custo.

Como já mencionado, o AERS baseia-se no método desenvolvido por London Jr. et al. (2002). Conforme apresentado na seção anterior, tal método possibilita a obtenção de um SMC a partir da análise de uma lista contendo todos os medidores candidatos a serem instalados em um sistema, com a indicação da correspondente UTR candidata. Analisando essa lista, o método seleciona os medidores e UTRs que devem ser instalados para obtenção de um SMC. Isso é realizado através da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T . Dependendo da sequência com que os medidores candidatos estão dispostos na lista, o método fornece SMCs selecionando, para instalação, números distintos de medidores e UTRs. Em razão

de o custo de um sistema de medição depender do número de medidores e UTRs instalados, o AERS trabalha da seguinte forma:

Passo 1: Através de AE, geram-se diversas listas (indivíduos) contendo todos os medidores candidatos, sendo que, em cada uma das listas, esses medidores aparecem em uma ordem distinta.

Passo 2: Cada uma das listas (indivíduos) geradas no passo anterior é analisada pelo método proposto por London Jr. et al. (2002), que fornece, como resultado, o número de medidores e UTRs que devem ser instalados para obtenção de um SMC. De acordo com esse número de medidores e UTRs, calcula-se o custo do sistema de medição obtido (função de aptidão), que será o parâmetro a ser analisado para definir a solução “ótima” do problema, isto é, para definir qual das listas (indivíduo) possibilitou a obtenção do SMC mais barato.

Em face do exposto, verifica-se que no AERS há a possibilidade de obtenção de um SMC de baixo custo “otimizando” a sequência com que as medidas candidatas serão analisadas pelo método proposto por London Jr. et al. (2002). Esses passos podem ser estruturados da forma apresentada no fluxograma da figura 3.9:

Figura 3.9 - Fluxograma do AERS.

A representação sequencial, bem como os demais componentes do AERS são apresentados a seguir.

Cromossomo

Cada indivíduo é um vetor cujas posições (genes) correspondem a uma determinada medida passível de existir no SEP (ou seja, que correspondem a um determinado medidor possível de ser instalado no SEP). O tamanho de cada indivíduo é igual ao número total de medidores passíveis de existir no SEP. Por exemplo, para o sistema do IEEE de 30 barras os indivíduos terão 112 posições, sendo 30 representando as medidas de injeção, 82 representando as medidas de fluxo. Exemplo:

Med. 8 (I_1)	Med. 5 (F_{3-4})	Med. 12 (F_{5-1})	(...)	Med. 3 (I_3)	Med. 6 (F_{1-2})	Med. 10 (F_{5-6})
----------------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------	-------------------------	--------------------------------	---------------------------------

Figura 3.10 - Indivíduo do AERS.

Cruzamento (*Crossover*)

Conforme apresentado em (VIGLIASSI, 2009), a representação sequencial apresenta problemas para aplicação de forma direta do *crossover* e da mutação, pois podem aparecer valores (ou medidores) duplicados. Para resolver esse problema, o AERS utiliza um vetor auxiliar, denominado Vetor de Controle (VC), a fim de verificar se o medidor já foi utilizado. Cada posição do VC corresponde a um determinado medidor e será igual a 1 (um) se o medidor foi instalado; e 0 (zero) caso contrário. A figura 3.10 ilustra um exemplo do problema do *crossover* da representação sequencial (VIGLIASSI, 2009).

Pai A	Med. 3	Med. 5	Med. 1	Med. 8	Med. 4	Med. 2	Med. 7	Med. 6
Pai B	Med. 1	Med. 4	Med. 8	Med. 2	Med. 7	Med. 5	Med. 3	Med. 6
Filho A	Med. 3	Med. 5	Med. 1	Med. 8	Med. 7	Med. 5	Med. 3	Med. 6
Filho B	Med. 1	Med. 4	Med. 8	Med. 2	Med. 4	Med. 2	Med. 7	Med. 6

Figura 3.11 - Problema no crossover da representação sequencial.

Os passos para a realização do *Crossover* são:

Passo 1: Todos os elementos do Pai A, até o ponto de *crossover*, são colocados no Filho A e as respectivas posições no vetor de controle recebe o valor “1”. Em seguida, são

selecionados, um a um, os elementos posteriores ao ponto de *crossover* do Pai B e vá para o próximo passo.

Filho A	Med. 3	Med. 5	Med. 1	Med. 8				
VC	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
	1	0	1	0	1	0	0	1

Passo 2: Se o elemento selecionado no passo anterior ainda não foi utilizado no Filho A, coloque-o e faça VC (desse elemento) = 1.

Filho A	Med. 3	Med. 5	Med. 1	Med. 8	Med. 7	Med. 6		
VC	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
	1	0	1	0	1	1	1	1

Passo 3: Se existir pelo menos um elemento do Pai B que ainda não foi analisado, seleciona-se esse elemento e volta-se para Passo 2. Caso contrário, vá para o próximo passo.

Passo 4: Se existirem posições ainda não preenchidas no Filho A, tais posições devem ser preenchidas por elementos correspondentes às posições ainda nulas no vetor de controle.

Filho A	Med. 3	Med. 5	Med. 1	Med. 8	Med. 7	Med. 6	Med. 2	Med. 4
VC	Med. 1	Med. 2	Med. 3	Med. 4	Med. 5	Med. 6	Med. 7	Med. 8
	1	1	1	1	1	1	1	1

Mutação

A mesma restrição imposta nas operações de *crossover* em indivíduos representados por sequência se aplica ao operador de mutação. Nessas situações de representação, o operador de mutação simplesmente promove a troca de posição dos genes, conforme a figura 3.5.

No AERS, a mutação é aplicada ao indivíduo selecionado para mutação. Portanto, tem-se a taxa de seleção para mutação, que representa a chance (%) de um indivíduo ser selecionado para mutação, e a taxa de mutação das medidas que representa o percentual (%) do indivíduo que sofrerá mutação.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia proposta neste trabalho, que é uma extensão do AERS, porém diversas modificações foram propostas para melhorar o

processo de busca de soluções e possibilitar o tratamento das MFSs. Contudo, os operadores genéticos aqui mostrados serão os mesmos aplicados na nova metodologia.

3.6 Índice de não detecção de erros grosseiros no processo de EE-SEP

Índice de não detecção de erros grosseiros define quão difícil é detectar, via teste dos resíduos normalizados e do índice $J(\underline{x})$, erros grosseiros em medidas.

Através da decomposição do espaço vetorial das medidas em Benedito et al.(2013) detectou-se que o UI de uma medida indica a proximidade da mesma para imagem da matriz jacobiana do estimador WLS, portanto, através do UI é possível qualificar as medidas de acordo com as suas características de "mascararem" os seus erros (BENEDITO et al., 2013).

3.6.1 Interpretação Geométrica do Estimador de Estado WLS

A partir do modelo de medição representado pela equação (2.1), tem-se que $\underline{z} \in R^m$, $\underline{x} \in R^n$ e $h: R^n \rightarrow R^m$ é uma função não linear e continuamente diferenciável. Como o número de medidas m é, em geral, maior que o número de variáveis de estado n , é possível estimar o vetor de variáveis de estado $\underline{x}$, pelo método WLS, que é obtido através da minimização do índice $J(\underline{x})$, dado pela equação (2.4).

A linearização da equação (2.1), num certo ponto $\underline{x}^*$, resulta em:

$$\Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \underline{x} + \underline{w}, \quad (3.1)$$

sendo $H = \frac{\partial h}{\partial x}$ a matriz Jacobiana calculada em $\underline{x}^*$, $\Delta \underline{z} = \underline{z} - h(\underline{x}^*)$ o vetor de correção e $\Delta \underline{x} = \underline{x} - \underline{x}^*$.

Se o sistema representado pela equação (3.1) é observável ($\text{posto}(H) = n$), então, o espaço vetorial das medidas R^m pode ser decomposto numa soma direta de dois subespaços vetoriais, isto é,

$$R^m = \mathfrak{R}(H) \oplus \mathfrak{R}(H)^\perp, \quad (3.2)$$

onde: $\mathfrak{R}(H)$ representa o subespaço vetorial de dimensão n em R^m , denominado imagem de H . $\mathfrak{R}(H)^\perp$ representa o complemento ortogonal de $\mathfrak{R}(H)$, isto é, se $\underline{u} \in \mathfrak{R}(H)$ e $\underline{v} \in \mathfrak{R}(H)^\perp$, então $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v} = 0$ (BENEDITO, 2011).

A equação (3.1), calculada em $\underline{x}$, que torna mínimo o índice $J(\underline{x})$, pode ser interpretada como uma projeção do vetor de correção $\Delta \underline{z}$ em $\Re(H)$ (BENEDITO, 2011). Assim, considere P como um operador linear, que projeta o vetor $\Delta \underline{z}$ em $\Re(H)$, ou seja:

$$\Delta \hat{\underline{z}} = P \cdot \Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}. \quad (3.3)$$

Desta forma, o vetor de resíduo $\underline{r}$, para o modelo linearizado, é dado por:

$$\underline{r} = \Delta \underline{z} - \Delta \hat{\underline{z}} = \Delta \underline{z} - H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}. \quad (3.4)$$

A partir desses dois vetores, o operador P , que torna mínima a norma $J(\underline{x})$, é aquele que projeta $\Delta \underline{z}$ ortogonalmente em $\Re(H)$, em termos do produto interno $\langle \underline{u}, \underline{v} \rangle = \underline{u}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{v}$, isto é, o vetor $\Delta \hat{\underline{z}}$ é ortogonal ao vetor $\underline{r}$. Mais precisamente:

$$\begin{aligned} \langle \Delta \hat{\underline{z}}, \underline{r} \rangle &= \Delta \hat{\underline{z}}^t \cdot R^{-1} \cdot \underline{r} = 0; \\ \langle \Delta \hat{\underline{z}}, \underline{r} \rangle &= (H \cdot \Delta \hat{\underline{x}})^t \cdot R^{-1} \cdot (\Delta \underline{z} - H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}) = 0. \end{aligned} \quad (3.5)$$

Resolvendo-se a equação (3.5) para $\Delta \hat{\underline{x}}$, obtém-se:

$$\Delta \hat{\underline{x}} = (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1} \cdot \Delta \underline{z}. \quad (3.6)$$

Como $\Delta \hat{\underline{z}} = P \cdot \Delta \underline{z} = H \cdot \Delta \hat{\underline{x}}$, a matriz projeção P é:

$$P = H \cdot (H^t \cdot R^{-1} \cdot H)^{-1} \cdot H^t \cdot R^{-1}. \quad (3.7)$$

O vetor resíduo pode ser calculado, em termos da matriz de projeção P , e através da seguinte expressão:

$$\begin{aligned} \underline{r} &= \Delta \underline{z} - \Delta \hat{\underline{z}} = \Delta \underline{z} - P \cdot \Delta \underline{z}; \\ \underline{r} &= (I - P) \cdot \Delta \underline{z} = S \cdot \Delta \underline{z}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

onde a matriz $(I - P)$, ou matriz de sensibilidade dos resíduos S , é um operador que projeta $\Delta \underline{z}$ em $\Re(H)^\perp$.

A decomposição do espaço vetorial das medidas, em uma soma direta de $\Re(H)$ e $\Re(H)^\perp$, será utilizada para decompor o vetor de erro das medidas $\underline{w}$ em duas componentes (BENEDITO, 2011): detectável e não detectável.

Considerando o modelo linearizado do WLS, tem-se que:

$$\begin{aligned} \Delta \underline{x}_{verd} &= \Delta \underline{x}_{verd} - \hat{\underline{x}}; \\ \Delta \underline{z}_{verd} &= H \cdot \Delta \underline{x}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde: $\underline{x}_{verd}$ é o vetor de estado sem EG; $\underline{z}_{verd}$ é o vetor de medidas sem EG.

Se a matriz jacobiana disponível estiver próxima da obtida pelos estados sem EG, então, $\underline{z}_{verd}$ está próximo a $\Re(H)$ e $\Delta \underline{z}_{verd} \approx \underline{z}_{verd} - \hat{\underline{z}}$.

O vetor de erro das medidas é dado por (BENEDITO, 2011):

$$\underline{w} = \underline{z} - \underline{z}_{verd} \approx \Delta \underline{z} - \Delta \underline{z}_{verd}, \quad (3.10)$$

e pode ser escrito como:

$$\underline{w} = P \cdot \underline{w} + (I - P) \cdot \underline{w}, \quad (3.11)$$

sendo $\underline{w}_U$ a componente não detectável e $\underline{w}_D$ a componente detectável de $\underline{w}$, tem-se:

$$\underline{w}_U = P \cdot \underline{w}, \quad (3.12)$$

$$\underline{w}_D = (I - P) \cdot \underline{w}. \quad (3.13)$$

Benedito et al. (2013) demonstraram que pequenos resíduos normalizados não implicam em pequenos erros nas medidas, pois o resíduo da medida não é afetado pela componente não detectável dos erros, conforme a expressão que segue:

$$\underline{r} = (I - P) \cdot \underline{w} = \underline{w}_D. \quad (3.14)$$

Em (BENEDITO, 2011), o UI, para a i -ésima medida, foi definido como sendo:

$$UI_i = \frac{\|\underline{w}_U^i\|_{R-1}}{\|\underline{w}_D^i\|_{R-1}} = \frac{\sqrt{(\underline{w}_U^i)^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{w}_U^i)}}{\sqrt{(\underline{w}_D^i)^t \cdot R^{-1} \cdot (\underline{w}_D^i)}}, \quad (3.15)$$

que, através do desenvolvimento, chegou-se a seguinte forma:

$$UI_i = \frac{\|\underline{w}_U^i\|_{R-1}}{\|\underline{w}_D^i\|_{R-1}} = \frac{\sqrt{(P_{ii})}}{\sqrt{(1 - P_{ii})}}, \quad (3.16)$$

sendo P_{ii} o elemento da diagonal principal da matriz de projeção P .

A partir das análises feitas por (BENEDITO, 2011), verificou-se que o UI possibilita uma nova forma de enxergar o problema de mascaramento de EGs, o que viabiliza o desenvolvimento de metodologias mais eficientes para processamento de EGs, bem como para projetos de sistemas de medição.

Também em (BENEDITO, 2011) verificou-se que o UI não depende da magnitude do erro, mas sim dos elementos da diagonal principal das matrizes P e S . Porém, as matrizes P e S dependem dos valores dos parâmetros do sistema, da ponderação das medidas, do valor estimado das variáveis de estado e do nível de redundância local das medidas.

Capítulo 4

4. Metodologia Proposta

Neste capítulo será apresentada a metodologia proposta nesta dissertação que está dividida em dois objetivos, para projeto e fortalecimento de SMs híbridos, isto é, SMs formados por medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA e por MFSs obtidas pelas UMFs, observáveis e isentos de MCs, CCMs e UTRs críticas (objetivo número 1 deste trabalho) e projeto e fortalecimento de SMs convencionais, ou seja, SMs formados por medidas convencionais obtidas pelo sistema SCADA, observáveis e isentos de MCs, CCMs e UTRs críticas e com UI menor que um determinado valor (objetivo número 2 deste trabalho). A metodologia proposta deverá possibilitar o projeto de novos SMCs híbridos, convencionais ou fasoriais sincronizados, bem como o fortalecimento de SMs já existentes através da seleção para instalação de medidores convencionais, UTRs e UMFs.

Conforme já mencionado, a metodologia proposta, aqui chamada de AERS+, baseia-se na metodologia denominada AERS apresentada no capítulo 3 e proposta em (VIGLIASSI, 2009). Assim, o AERS+ trabalha da seguinte forma:

- ✓ Através da obtenção e análise da estrutura da matriz H_{Δ}^T , como apresentado em London Jr. et al.(2002), a metodologia possibilita a obtenção de SMCs. Entretanto, para possibilitar a consideração simultânea de medidas convencionais e MFSs, a matriz H_{Δ}^T considerada em (LONDON JR at al. 2002) é estendida para permitir o processamento de SMs híbridos, de acordo com (LONDON et al., 2009; BORGES, 2011). Também foram propostas diversas modificações para melhorar o desempenho do método frente a limitações encontradas no AERS no decorrer do desenvolvimento deste projeto;
- ✓ Para obter-se uma dependência entre o custo do SMC e o atendimento aos critérios técnicos de um SMC (observabilidade e ausência de MCs, CCMs e UTRs críticas), a

metodologia proposta faz uso do AERS proposto em (VIGLIASSI et al., 2009). Entretanto diversas alterações no código do programa computacional que implementa o AERS foram realizadas para aumentar a eficiência computacional da metodologia proposta.

Para aplicar a metodologia para fortalecimentos de SMs já existentes considerar-se-á a possibilidade de o sistema em análise possuir alguns medidores, UTRs e/ou UMFs previamente instalados, bem como a possibilidade de o sistema possuir subestações que, apesar de terem UTRs, ainda apresentam pontos de medição sem medidores.

A metodologia proposta é dividida em três fases. São elas:

Fase 1 – Criação da população inicial, isto é, criação de diversos indivíduos através dos quais são montadas diversas matrizes H^T ;

Fase 2 – Análise de cada indivíduo através do processo de obtenção e análise da matriz H_A^T , como proposto em (LONDON JR et al., 2002), juntamente com a heurística construtiva proposta pelo trabalho. Esta fase fornecerá o número de medidores, UTRs e UMFs necessárias para obtenção de um SMC;

Fase 3 – Avaliação dos indivíduos e aplicação dos operadores. Essa avaliação consiste basicamente em calcular o custo de cada SMC através da análise do número de medidores, UTRs e UMFs selecionados para instalação em cada indivíduo no passo anterior.

4.1 Fase 1 – Criação da população inicial e montagem da matriz H^T

O AERS+ possibilita a obtenção de um SM a partir da análise de uma lista contendo todos os medidores que podem ser instalados no sistema, fasoriais sincronizados ou não. A partir dessa lista, que no AE corresponde ao indivíduo, é montada a respectiva matriz H^T , de acordo com a sequência de medidores da lista, ou seja, a sequência das colunas dessa matriz corresponderá exatamente à sequência em que os medidores aparecem na lista (lembrando que as colunas e linhas da matriz H^T correspondem às medidas e às variáveis de estado a serem estimadas respectivamente).

Uma característica do AERS (VIGLIASSI et al., 2009) é que a linha x da matriz H^T corresponde à barra x do SEP. Porém constatou-se que a aleatoriedade imposta pelo AE se perdia devido a essa característica, pois a fatoração começa sempre da primeira linha, que corresponde ao estado equivalente da barra 1.

Para superar tal limitação, no AERS+ foi proposta uma alteração na ordem das linhas da H^T . Assim, a numeração da linha não corresponderá, necessariamente, à respectiva barra de tal numeração. A ordem das linhas é definida de acordo com a ordem que as UTRs aparecem na lista, portanto, fica visível que uma pequena alteração no início do indivíduo impõe uma maior modificação no indivíduo do que uma alteração no final do mesmo. No capítulo de resultados será exposta uma comparação para validar a melhora obtida pela alteração.

A seleção de medidores, UTRs e UMFs, que devem ser instalados para a obtenção de um SMC, ocorre durante a heurística construtiva (quando necessário), no processo de obtenção da H_{Δ}^T (fatoração da H^T) e no aumento da redundância das medidas e UTRs/UMFs, que pode exigir permutações de colunas, portanto, dependendo da sequência com que os medidores são dispostos na lista, a metodologia fornecerá diferentes SMs.

A primeira fase pode, então, ser dividida em três etapas: (i) Criação da população inicial, ou seja, de listas contendo todas as medidas possíveis no SEP; (ii) definição da ordem das linhas da H^T de cada indivíduo; (iii) montagem da H^T , de cada indivíduo, conforme a característica do medidor, UTR e UMF. As medidas já existentes em um SM estarão presentes em todas as listas geradas, e ocuparão as primeiras " m_{ex} " posições da matriz H^T . Em seguida, aparecerão as medidas candidatas, UTRs candidatas e UMFs candidatas, conforme ilustrado na figura 4.1. Lembrando que, quando a metodologia for aplicada para projeto de um novo SM, não existirá, inicialmente, medida candidata alguma, mas apenas UTRs e UMFs candidatas. No instante em que a medida de uma UTR (ou UMF) candidata for instalada, todas as demais medidas dessa mesma UTR (ou UMF) tornar-se-ão medidas candidatas.

$$H^T = \left[\begin{array}{cc|cc} \text{MED.} & \text{MED.} & \text{UTRs} & \text{UMFs} \\ \text{INST.} & \text{CAND.} & \text{CAND.} & \text{CAND.} \end{array} \right]$$

Figura 4.1 - Estrutura de montagem da matriz H^T .

Ressalta-se que as UMFs estão dispostas no final da matriz para dar preferência à instalação de medidas convencionais que apresentam custos menores. Entretanto, nada impede de ser dada preferência para instalação de UMFs dispondo-as no início da matriz.

4.2 Fase 2: Análise qualitativa através da H_{Δ}^T

A segunda fase do AERS+ consiste na aplicação da heurística construtiva necessária quando se deseja garantir a não existência de UTRs críticas ou UMFs críticas, e da obtenção e análise das matrizes H_{Δ}^T , que são obtidas através da fatoração triangular das matrizes H^T , da mesma forma como é feita pelo método para análise de observabilidade e identificação de MCs e CCMs de London Jr. et al. (2001) e pelo método para obtenção de SMC de London Jr. et al. (2002).

A heurística construtiva foi desenvolvida a fim de superar uma limitação do método de London Jr. et al. (2002) quanto ao tratamento do nível de redundância das UTRs. É importante destacar que o método permite fazer essa análise sem a heurística construtiva, porém, como a identificação e aumento da redundância das UTRs é feito após o tratamento do nível de redundância local das medidas acaba-se por instalar UTRs e medidores que, na análise do nível de redundância das UTRs, não serão necessários para garantir o nível mínimo de redundância local desejada. Isso acaba por aumentar os custos finais do SM encontrado.

O processo da heurística construtiva e de obtenção e análise da H_{Δ}^T acontecem em cinco etapas, são elas:

4.2.1 Etapa 1 – Heurística Construtiva (nível de redundância das UTRs)

A primeira etapa consiste na aplicação da Heurística Construtiva que auxilia a análise e restauração do nível de redundância de UTRs. Essa etapa só é executada quando se deseja obter um SM imune de UTRs críticas. É importante ressaltar que a heurística construtiva auxilia o método da H_{Δ}^T a restaurar o nível de redundância de UTRs, portanto, só é garantida a não existência de UTRs críticas após a etapa de identificação e restauração do nível de redundância das UTRs.

Basicamente, a heurística construtiva irá instalar medidas de fluxo, injeção ou corrente, de forma que todas as barras do SEP apresentem, no mínimo, duas UTRs/UMFs incidentes para cada barra do sistema, sendo estas duas UTRs de barras adjacentes ou uma de sua própria barra e outra de uma adjacente.

A análise e instalação são feitas através de dois vetores, o $VC_UTR_{[n]}$ e $VC_CORRENTE_ADJA_{[n]}$, que auxiliam na contagem. Para exemplificar, usar-se-á lista de medidores baixo, onde, I_x é medida de injeção na barra x e F_{x-y} é medida de fluxo da barra x para barra y .

I_3	I_4	I_1	F_{2-1}	F_{1-2}	F_{2-3}	I_2	F_{3-4}	F_{4-3}	F_{3-2}
-------	-------	-------	-----------	-----------	-----------	-------	-----------	-----------	-----------

Inicialmente, como não existem medidas/UTRs instaladas e sendo um SM convencional, o vetor fica $VC_UTR[0;0;0;0]$. Procede-se então para a análise das barras, começando pela barra 3, pois a mesma aparece primeiro na lista de medidas, através da medida de injeção I_3 . Seria então instalada a medida/UTR I_3 , resultando no vetor $VC_UTR[0;1;1;1]$. Mesmo após a instalação de I_3 , ainda, é necessária a instalação de mais uma medida/UTR para obterem-se, no mínimo, uma UTR redundante à UTR já instalada. Procede-se então à busca da próxima medida/UTR para a barra 3. Após essa busca, é feita a instalação da medida I_4 , obtendo-se $VC_UTR[0;1;2;2]$. Então, percebe-se que as barras 3 e 4 já apresentam as UTRs necessárias. Seguindo para a próxima barra que, na ordem da lista, é a barra 1, procede-se à busca das medidas/UTRs necessárias. Após a instalação da medida I_1 , analisando o vetor $VC_UTR[1;2;2;2]$, obtém-se que a barra 2 passa a apresentar a quantidade de UTRs redundantes necessárias, porém a barra 1 ainda precisa de mais uma medida/UTR. Após a busca é instalada a medida F_{2-1} resultando no vetor $VC_UTR[2;3;3;2]$.

Após a execução da Etapa 1, todas as UTRs necessárias para garantir que não existam UTRs críticas foram instaladas, porém o SM é tido, efetivamente, sem UTRs críticas somente após o termino da análise da H_{Δ}^T .

4.2.2 Etapa 2 – Análise e restauração da observabilidade

A segunda etapa consiste na análise da observabilidade e, se necessário, a restauração da mesma através da busca (ou seleção) por medidas, ou UTRs, ou MFSs candidatas (para a instalação de MFSs existe uma ressalva que será apresentada na seção 4.4 deste capítulo). Essa análise é feita durante a etapa Forward do processo de fatoração triangular, conforme Seção 3.5.1.

O processo de busca por medidas candidatas ocorre da forma proposta em (LONDON JR et al., 2002), apresentada no capítulo 3. Tendo em vista que esse processo é de suma importância para o entendimento da metodologia proposta, o mesmo será apresentado novamente.

Busca por medidas Candidatas

Ao imaginar que se procura uma medida candidata que forneça informação da variável de estado equivalente correspondente à linha " i ", os passos para realização dessa busca são os seguintes: (i) Cria-se uma nova coluna na matriz H^t que está sendo fatorada, para o caso de restauração da observabilidade, ou na matriz H_{Δ}^T , para o caso de fortalecimento da redundância de medidas e UTRs. Nessa nova coluna será armazenada a medida candidata para análise. (ii) Aplicam-se a essa coluna os fatores triangulares obtidos pela fatoração. (iii) Caso apareça um elemento não nulo, na linha " i ", então, a medida analisada é selecionada para ser instalada, assim, promove a restauração da observabilidade do sistema ou o fortalecimento da redundância de medidas ou UTRs.

Caso ocorra a situação em que não existam medidas candidatas dando a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha " i ", buscar-se-á, então, uma UTR candidata que dê a informação desejada.

Busca por UTRs Candidatas

A busca por UTRs candidatas ocorre de forma análoga à busca por medidas candidatas. A diferença entre ambas é que, na busca por uma UTR candidata, considera-se, ao mesmo tempo, todas as medidas transmitidas por essa UTR. Então, os fatores triangulares são aplicados nas colunas correspondentes a todas as medidas transmitidas pela UTR; e, se pelo menos uma das medidas fornecer a informação desejada, tal UTR e a correspondente medida serão selecionadas para serem instaladas e as demais medidas dessa UTR serão classificadas como medidas candidatas.

Caso ocorra a situação em que não existam medidas e UTRs candidatas dando a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha " i ", buscar-se-á, então, uma UMF candidata que dê a informação desejada.

Busca por UMFs Candidatas

A busca por UMFs candidatas é exatamente igual à busca por UTRs candidatas. Ou seja, na busca de uma UMF candidata, considera-se, ao mesmo tempo, todas as MFSs transmitidas por essa UMF. Então, os fatores triangulares são aplicados em todas as MFSs transmitidas pela UMF, e, se pelo menos uma dessas MFSs fornece a informação desejada, tal UMF e a correspondente MFS serão selecionadas para serem instaladas.

Importa ressaltar que esse processo de busca é aplicado em todas as etapas da metodologia proposta, seguindo a sequência: medidas candidatas, UTRs candidatas e UMFs candidatas.

O algoritmo da Etapa 2 compreende os seguintes passos:

Passo 1: Faça m_{ex} = número de medidas existentes instaladas. Com a utilização da heurística construtiva deve-se considerar as medidas anteriormente selecionadas e instaladas.

Passo 2: Se " $m_{ex} = 0$ ", trata-se do projeto de um novo e confiável SM. Dessa forma, faça $d = 0$ e vá para o próximo passo. Caso contrário ($m_{ex} \neq 0$), fatore a matriz H^T considerando apenas as " m_{ex} " colunas até que $H^T[d][d] = 0$ (isso pode exigir a permutação das primeiras m_{ex} colunas da matriz). Se " $d = N$ "¹¹, o SEP é observável considerando apenas as medidas existentes e fim de processamento. Caso contrário, vá para o próximo passo.

Passo 3: Verifique se é possível obter a informação da variável de estado equivalente, correspondente à linha " d ", através de uma das medidas candidatas (processo de busca por medida candidata supracitado). Se for possível, selecione essa medida, faça " $m_{ex} = m_{ex} + 1$ " e vá para o passo 4. Caso contrário, determine a UTR (ou UMF) candidata que dá informação dessa variável de estado equivalente. Em seguida, selecione essa UTR (ou UMF), faça " $m_{ex} = m_{ex} + 1$ ", atualize o conjunto de medidas candidatas e vá para o passo 4.

Passo 4: Continue a fatoração da matriz H^T , considerando as primeiras m_{ex} colunas, até que $H^T[d][d] = 0$. Se " $d = N$ ", o SEP é observável considerando o SM já existente e a instalação das medidas e/ou UTRs e UMFs selecionadas no passo 3; e fim de processamento. Caso contrário, volte ao passo 3.

Observação: sempre que uma medida, ou UTR ou UMF candidata for selecionada para instalação, o algoritmo incrementa o número de medidas, UTRs e UMFs a serem instaladas no sistema.

Após a execução da Etapa 2, cada indivíduo analisado corresponderá a um SM observável, com a indicação do número de novos medidores, UTRs e UMFs necessárias para torná-lo observável, medidores esses que aparecem nas colunas da submatriz I do método.

¹¹ Se o SM possuir apenas medidas convencionais, " $N = n$ ", mas se o SM possuir medidas convencionais e MFSs, " $N = n + I$ ", sendo " n " o número de barras do SEP em análise.

4.2.3 Etapa 3 – Identificação de MCs e aumento do NRL

A terceira etapa consiste em identificar e tornar redundante as MCs. Para isso, utiliza-se o Vetor Contador (VC)¹², que armazena, em cada uma das suas linhas, o número de elementos não nulos que aparecem nas respectivas linhas da submatriz R.

Para entender como funciona o processo de identificação de MCs através do vetor VC, ou seja, do número de elementos não nulos da submatriz R, importa lembrar que, em razão de a submatriz I, da matriz H_{Δ}^T , ser uma matriz identidade de dimensão $[(N-1) \times (N-1)]^{13}$, pode-se dizer que a coluna "j", da submatriz I, tem elemento não nulo apenas na linha "j". Tendo em vista que as medidas básicas correspondem às colunas da submatriz I, pode-se afirmar então que: a medida básica correspondente à coluna "j" da matriz H_{Δ}^T , para $j = 1, \dots, (N-1)$, dá informação apenas da variável equivalente correspondente à linha "j".

Face ao exposto, o procedimento de identificação de MCs, através do vetor VC, torna-se bastante simples. Por exemplo, se a linha "i" do VC for igual a zero, a medida básica correspondente à coluna "i", da matriz H_{Δ}^T , é uma MC. Para tornar essa MC redundante, a metodologia proposta busca por uma medida (UTR ou UMF) candidata que forneça a informação da variável de estado correspondente à linha "i". Sempre que for selecionada alguma medida candidata é necessário incrementar a variável m_{ex} , ou seja, é necessário fazer " $m_{ex} = m_{ex} + 1$ ", pois o conjunto de medidas disponíveis no SM em análise aumentou, haja vista mais uma medida candidata ter sido selecionada para ser instalada.

Após a execução da Etapa 3, cada indivíduo analisado corresponderá a um SM observável e isento de MCs, com a indicação do número de novos medidores, UTRs e UMFs necessários para atingir esse padrão de qualidade.

4.2.4 Etapa 4 – Identificação de CCMs e aumento do NRL

Na quarta e última etapa, ocorre a identificação e o aumento da redundância das medidas que formam CCMs. O objetivo desta etapa é a obtenção de SMs isentos de CCMs.

A metodologia proposta identifica os CCMs através da análise dos pares críticos de medidas, isto é, dos conjuntos p -críticos com $p = 2$. Importa destacar, então, que conjunto p -crítico não é, por definição, a mesma coisa que CCM, pois, de acordo com a sua definição,

¹² O VC possui dimensão $(n-1)$ para sistemas de medição formado apenas por medidas convencionais, ou n para sistemas de medição híbridos, sendo n o número de barras do SEP.

¹³ Se o SM possuir apenas medidas convencionais, " $N = n$ ", mas se o SM possuir medidas convencionais e MFSs, " $N = n+1$ ", sendo " n " o número de barras do SEP em análise.

CCM é o conjunto de medidas constituído por medidas redundantes, em que a eliminação de uma medida qualquer, a ele pertencente, torna todas as demais MCs. Assim, observa-se que um conjunto p -crítico será igual a um conjunto crítico somente se ambos possuírem duas medidas, porquanto, a retirada de uma das medidas de um par crítico torna a outra crítica. Verifica-se, também, que as duas medidas que constituem um par crítico pertencem ao mesmo CCM. Dessa forma, através da identificação dos pares críticos de medidas é possível criar um procedimento para identificação dos CCMs de uma forma bastante direta e simples.

Conforme apresentado no capítulo 3, a identificação dos conjuntos p -críticos de medidas, através da estrutura da matriz H_{Δ}^T , acontece em dois passos. Dessa forma, a Etapa 4 da metodologia proposta é dividida também em duas subetapas, que serão aqui denominadas Etapas 4.1 e 4.2.

Na **Etapa 4.1**, os pares críticos de medidas formados por apenas uma medida básica são identificados através das linhas do vetor VC com valor igual a 1, lembrando que as linhas desse vetor indicam a quantidade de elementos não nulos na correspondente linha da submatriz R. Para aumentar a redundância das medidas que constituem cada um desses pares críticos, procura-se por medidas (UTRs ou UMFs) candidatas que forneçam informação das variáveis de estado correspondentes às linhas de VC com valor igual a 1. Da mesma forma que nas etapas anteriores, sempre que for selecionada alguma medida candidata é necessário incrementar a variável m_{ex} , ou seja, é necessário fazer " $m_{ex} = m_{ex} + 1$ ", pois o conjunto de medidas disponíveis no SM em análise aumentou, haja vista mais uma medida candidata ter sido selecionada para ser instalada.

Na **Etapa 4.2** são identificados os pares críticos de medidas que são formados por mais de uma medida básica e que não são identificados pela Etapa 3.1. Para execução dessa etapa, está sendo proposta modificações para torná-la mais eficiente computacionalmente quando comparada com o método apresentado na seção 3.5.2 proposto por London Jr. et al (2001). Na sequência, será descrito matematicamente o funcionamento dessa etapa.

O algoritmo aqui desenvolvido possui 17 passos, são eles:

Passo 1: Percorra as colunas da submatriz R até encontrar uma coluna que possua elemento não nulo na linha " i "¹⁴ e armazene a posição da coluna na variável $col1$.

¹⁴ Em razão de a coluna " i " corresponder a uma medida básica não crítica, certamente, será encontrado um elemento não nulo, na linha " i ", em pelo menos uma das colunas da submatriz R.

Passo 2: Se existir fator de Forward, ou seja, se $i < (N - 1)$, faça $j = i + 1$ e vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o passo 10.

Passo 3: Se a medida da linha j e coluna $col1$ é igual a zero, ou seja, se $F1_j = 0$ faça $j = j + 1$. Se $j < N$, vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o passo 10.

Passo 4: Calcule o Fator F1 da medida da linha i fazendo $F1 = \frac{D1_j}{F1_i}$, sendo que $F1_j$ é a medida da linha j e coluna $col1$ e que $D1_i$ é a medida da linha i e coluna $col1$.

Passo 5: Percorra as colunas da submatriz R até encontrar uma coluna com elemento não nulo na linha j e armazene a posição da coluna na variável $col2$.

Passo 6: Se $col1 \neq col2$ vá para o próximo passo. Caso contrário, volte para o passo 5 e continue a busca.

Passo 7: Calcule o Fator F2 da medida da linha j fazendo $F2 = \frac{D2_j}{F2_i}$, sendo que $F2_j$ é a medida da linha j e coluna $col2$ e que $D2_i$ é a medida da linha i e coluna $col2$.

Passo 8: Se $F1 - F2 \neq 0$, a medida suplementar selecionada, correspondente a linha j , será redundante a medida básica da linha j , portanto vá para o próximo passo. Caso contrário volte para o passo 5.

Passo 9: Se $col2 \geq m_{ex} + 1$ instale a medida e incremente o valor da variável m_{ex} . Faça $j = j + 1$ e volte para o passo 3.

Passo 10: Se existe fator de Backward, ou seja, se $i > 1$ faça $j = i - 1$ e vá para o próximo passo. Caso contrário, fim do processo.

Passo 11: Se a medida da linha j e coluna $col1$ é igual a zero, ou seja, se $F1_j = 0$ faça $j = j + 1$. Se $j > 0$ vá para o próximo passo. Caso contrário, fim do processo.

Passo 12: Calcule o Fator F1 da medida da linha i fazendo $F1 = \frac{B1_j}{D1_i}$, sendo que $B1_j$ é a medida da linha j e coluna $col1$ e que $D1_i$ é a medida da linha i e coluna $col1$.

Passo 13: Percorra as colunas da submatriz R até encontrar uma coluna com elemento não nulo na linha j e armazene a posição da coluna nas variáveis $col2$.

Passo 14: Se $col1 \neq col2$ vá para o próximo passo. Caso contrário, volte para o passo 13 e continue a busca.

Passo 15: Calcule o Fator $F2$ da medida da linha j fazendo $F2 = \frac{B2_j}{D2_i}$, sendo que $B2_j$ é a medida da linha j e coluna $col2$ e que $D2_i$ é a medida da linha i e coluna $col2$.

Passo 16: Se $F1 - F2 \neq 0$, a medida selecionada, correspondente a linha j , será redundante a medida básica da linha j , portanto vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o passo 13.

Passo 17: Se $col2 \geq m_{ex} + 1$ instale a medida e incremente o valor da variável m_{ex} . Volte para o passo 11.

Após a execução da Etapa 4, cada indivíduo analisado corresponderá a um SM observável e isento de MCs e CCMs, com a indicação do número de novos medidores, UTRs/UMFs necessários para atingir esse padrão de qualidade.

4.2.5 Etapa 5 – Identificação de UTRs críticas e aumento do NRL

A última etapa da fase de análise qualitativa dos indivíduos consiste em identificar e aumentar a redundância das UTRs críticas, lembrando que esta etapa finaliza o processo de identificação de UTRs críticas que começa na Etapa 1 com a heurística construtiva. De acordo com a definição de UTR crítica, pode-se concluir que toda UTR crítica transmite pelo menos um conjunto p -crítico de medidas. Dessa forma, as UTRs que transmitem apenas medidas suplementares não são UTRs críticas.

Desse modo, a busca por UTRs críticas pode restringir-se apenas às UTRs que transmitem pelo menos uma medida básica. Assim, a partir de uma lista com todas as UTRs que transmitem pelo menos uma medida básica (lista L_UTR_B) e de uma matriz auxiliar $H_{\Delta}^t_{temp}$, com as mesmas dimensões da matriz H_{Δ}^T , aplica-se o seguinte algoritmo para identificação das UTRs críticas:

Passo 1: Selecione a primeira UTR da lista L_UTR_B e vá para o próximo passo.

Passo 2: Copie H_{Δ}^T para $H_{\Delta}^t_temp$ e vá para o próximo passo.

Passo 3: Elimine, da matriz $H_{\Delta}^t_temp$, todas as medidas transmitidas pela UTR em análise.

Passo 4: Fatore a matriz $H_{\Delta}^t_temp$ considerando apenas as " m_{ex} " colunas, armazenando os fatores triangulares, até que $H_{\Delta}^t[d][d] = 0$ (isso pode exigir a permutação das primeiras m_{ex} colunas da matriz). Se " $d = N$ "¹⁵, a UTR em análise não é crítica; vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o Passo 6.

Passo 5: Se já tiverem sido analisadas todas as UTRs da lista L_UTR_B , fim de processamento. Caso contrário, selecione a próxima UTR dessa lista, copie H_{Δ}^T para $H_{\Delta}^t_temp$ e volte para o passo 3.

Passo 6: Busque pela medida (UTR ou UMF) candidata que forneça a informação da variável de estado equivalente correspondente à linha " d ". Em seguida, selecione essa medida, faça " $m_{ex} = m_{ex} + 1$ " e vá para o passo 7.

Passo 7: Continue a fatoração da matriz $H_{\Delta}^t_temp$, considerando as primeiras m_{ex} colunas, até que $H_{\Delta}^t[d][d] = 0$. Se " $d = N$ ", a UTR em análise tornou-se redundante; vá para o passo 5. Caso contrário, vá para o Passo 6.

Após a execução da Etapa 4, cada indivíduo analisado corresponderá a um SMC (observável e isento de MCs, CCMs e UTRs críticas), com a indicação do número de novos medidores, UTRs e UMFs necessários para atingir esse padrão de qualidade.

Case seja de interesse que não haja Conjuntos Críticos de UTRs, basta que no Passo 4, após a fatoração da matriz, seja identificadas as medidas que se tornaram críticas conforme a Etapa 3. Após a identificação das MCs, as UTRs que transmitem essas MCs, junto com a UTR removida, formam um Conjunto Crítico de UTRs.

¹⁵ Se o SM possuir apenas medidas convencionais, " $N = n$ ", mas se o SM possuir medidas convencionais e MFSSs, " $N = n + 1$ ", sendo " n " o número de barras do SEP em análise.

4.3 Fase 3: Avaliação dos Indivíduos e aplicação dos operadores

Após a execução das Fases 1 e 2, cada indivíduo (ou cromossomo) analisado corresponderá a um SMC. O próximo passo é o cálculo do *fitness* de cada um deles, ou seja, calcular o custo de cada SM confiável que foi gerado. Para isso, considerar-se-á a função *fitness* definida pela Equação 2.3, apresentada no capítulo 2, e os custos dos medidores, UTRs e UMFs (aquisição e instalação) apresentados na tabela 4.1.

Após a avaliação de todos os indivíduos da população, o melhor indivíduo é selecionado, automaticamente, para continuar na próxima geração (Elitismo) e para a reprodução.

Custo em Unidade Monetária (UM)			
Sistema SCADA		UMFs	
Medidores	UTR	De Ramo	De Barra
4,5	100	135	$(130 + 5 \times n_{ad})$

Tabela 4.1 - Custo monetário do Sistema SCADA e UMFs, sendo N_{ad} o número de adjacências da barra.

Sobre a nova população, exceto o melhor indivíduo, são aplicados os demais operadores genéticos. O processo de evolução continua até que o critério de parada¹⁶ seja alcançado.

4.4 UI como critério técnico

Como apresentado na seção 3.6, o UI de uma medida depende dos valores dos parâmetros do sistema, da ponderação da medida, do valor estimado para a variável de estado e do nível de redundância local dessa medida. Esse conjunto de condições pode ser dividido em dois subconjuntos diferentes chamados de fixo e variável. O subconjunto fixo é composto pelas condições fixas, tais como os valores dos parâmetros do sistema e das ponderações das medidas¹⁷. Já o subconjunto variável é composto pelas variáveis de estado e pelos níveis de redundância local das medidas. Então, pode-se afirmar que o UI de uma medida possui uma parcela atribuída ao conjunto fixo e outra parcela ao conjunto variável.

¹⁶ Normalmente, utiliza-se, como critério de parada, o número de gerações, tempo de execução ou estagnação da convergência.

¹⁷ Nem sempre as ponderações das medidas são fixas, existem propostas que se baseiam no valor medido.

Porém, em (BENEDITO, 2011) foi demonstrado que o UI de uma medida varia muito pouco com a variação das variáveis de estado, portanto o UI possui uma fraca dependência das variáveis de estado. Assim, o subconjunto variável será formado exclusivamente pela condição do NRL.

Então, o UI é composto pela soma da parcela fixa e variável, conforme a figura 4.2, ou seja, o UI de uma medida possui uma faixa de valores que pode assumir dependendo do NRL da medida. Portanto, o menor UI que uma medida pode apresentar é na condição de máxima redundância local, assim como o maior UI é na condição de mínima redundância local, onde a medida é crítica e o UI corresponde a infinito.

Figura 4.2 - Composição da faixa de valores de UI de uma medida.

Assim, as medidas que na condição de máxima redundância apresentam elevado UI são classificadas como ruins, pois para qualquer SM elas apresentarão elevado UI, diferente do que ocorre com as medidas que apresentam baixo UI na condição de máxima redundância que, dependendo do SM, podem apresentar baixo ou elevando UI. Utilizando essa característica, foram implementadas modificações no AERS+ para possibilitar a obtenção de SMCs com medidas de baixo UI.

Então, no caso em que se deseja um SMC com baixo UI, o algoritmo proposto difere se pouco do apresentado anteriormente. A seguir, serão descritas as modificações que ocorrem no AERS+ ao se desejar um SMC com baixo UI. Vale lembrar que essas mudanças são automáticas no processo, portanto, o usuário apenas define se quer ou não utilizar o UI como critério técnico através do SET e RESET de uma variável. As modificações são apresentadas nas próximas subseções.

4.4.1 Modificações na Fase 1

Conforme apresentado anteriormente, a fase 1 consiste na criação e montagem da H^T . Nesta fase, a única modificação proposta foi o acréscimo de uma linha na matriz. Esta linha adicional passará a ser a primeira linha da matriz e armazenará os valores dos UIs das correspondentes medidas. É importante destacar que sobre essa linha não serão aplicados os fatores da fatoração triangular da matriz jacobiana.

A metodologia faz uso dos valores dos UIs das medidas na condição de máximo NRL, ou seja, na presença de todas as medidas possíveis de serem instaladas no SEP, sendo que esses valores fazem parte dos dados de entrada do AERS+. Esses valores são obtidos através do método proposto em (BENEDITO, 2011) e é através dessas informações que o AERS+ selecionara medidas para serem instaladas, como será apresentado adiante.

4.4.2 Modificações na Fase 2

Nesta fase, onde é feita a análise qualitativa do indivíduo, é onde ocorreu a modificação mais significativa. Todo o processo do método da H_{Δ}^T continua o mesmo, porém, no momento em que é feita a busca por medidas/UTRs (lembrando que só é analisado o UI para SM convencional) candidatas priorizar-se-ão medidas com baixo UI e, conjuntamente com a medida selecionada será instalada outra medida redundante a ela. Caso a medida selecionada seja de fluxo, necessariamente a outra medida a ser instalada será a medida de fluxo no extremo oposto dessa linha, sendo que, na já existência dessa medida como instalada o algoritmo não procede a busca.

Em face do exposto, suponha que se esteja no procedimento de identificação de MCs, através do vetor VC. Se a linha " i " do VC for igual a zero, a medida básica correspondente à coluna " i ", da matriz H_{Δ}^T , é uma MC. Então, para tornar essa MC redundante, a metodologia proposta busca por uma medida/UTR candidata que forneça a informação da variável de estado correspondente à linha " i ". Para a busca o AERS+ utilizará dois dados, o menor UI do conjunto de medidas que será armazenado na variável *menor_ui* e o passo incremental que é definido pelo usuário. Essa busca funciona da seguinte forma:

Passo 1: Faça $passo = 0,1$;

Passo 2: Faça $ui_ref = menor_ui$;

Passo 3: Busque uma medida na linha i que forneça o estado equivalente da barra i , ou seja, busque um elemento não nulo na linha i que possua UI menor que ui_ref ;

Passo 4: Se encontrou uma medida que possui UI menor que ui_ref instale a medida e vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o passo 8;

Passo 5: Se a medida encontrada é de fluxo (F_{i-j}), vá para o próximo passo. Caso contrário, vá para o passo 7;

Passo 6: Busque a medida redundante (F_{j-i}) e instale a medida. Fim do processo;

Passo 7: Como a medida encontrada é de injeção (I_i), busque uma medida de fluxo em um ramo incidente à barra i e instale a medida. Caso todas as medidas de fluxo de todos os ramos incidentes à barra i já estejam instaladas o algoritmo encerra a busca. Fim do processo;

Passo 8: Faça $ui_{ref} = ui_{ref} + 0,1$ e volte para o passo 3.

Após esse procedimento, todas as medidas apresentaram baixo UI, conforme os testes apresentados no Capítulo 5.

4.5 Restrições Econômicas

A metodologia proposta neste trabalho possibilita tratar o problema de projeto e fortalecimento de SMCs, isto é, observáveis e isentos de MCs, CCMs, UTRs/UMFs críticas e Conjunto Crítico de UTRs. Entretanto, quando os recursos financeiros não forem suficientes ou a relação custo *vs* qualidade estiver alta, tornando os investimentos inviáveis, a metodologia proposta pode ser flexibilizada, possibilitando a obtenção dos seguintes sistemas de medição:

Tipo 1: Sistema de medição observável.

Tipo 2: Sistema de medição observável e isento de MCs,

Tipo 3: Sistema de medição observável e isento de MCs e CCMs,

Tipo 4: Sistema de medição observável e isento de MCs, CCMs e UTRs/UMFs críticas (SMC).

Tipo 5: Sistema de medição observável e isento de MCs, CCMs, UTRs/UMFs críticas e Conjunto Crítico de UTRs.

Essa flexibilidade é obtida através do processamento de diferentes fases da análise da matriz H_{Δ}^t . Assim, para obter um SM Tipo 1, basta processar apenas a fase de observabilidade. Para obter um SM Tipo 2, basta processar as fases de observabilidade e de

MCs. Para obter um sistema de medição Tipo 3, basta processar as fases de observabilidade, MCs e de CCMs.. E para obter um sistema de medição do tipo 4 ou 5, basta processar as fases de observabilidade, MCs, de CCMs e UTRs Críticas.

Importa destacar que a metodologia proposta não se preocupará diretamente com o nível de redundância das MFSs na obtenção de SMs híbridos observáveis. O nível de redundância das MFSs será definido pelo usuário, através da quantidade de UMFs que se deseja instalar. Portanto, caso seja de interesse instalar apenas uma UMF em um SM híbrido do Tipo 4, o resultado será um SMC híbrido com uma MFS de ângulo de fase de tensão crítica.

4.6 Exemplo de aplicação da metodologia considerando UTRs e UMFs

Neste exemplo, a metodologia proposta será aplicada para projetar um novo e confiável SM de baixo custo para o sistema de 4 barras ilustrado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Sistema exemplo com 4 barras.

Fase 1: Inicialmente, a metodologia gera diversos indivíduos (factíveis) de forma aleatória, ou seja, diversas listas de medidores, UTRs e UMFs ordenados aleatoriamente, respeitando a sequência: medidas candidatas (se existirem), UTRs candidatas e UMFs candidatas.

Tendo em vista que neste exemplo está sendo considerada a inexistência de medida, UTR e UMF alguma, pois trata-se do projeto de um novo SM, não existe, inicialmente, medida candidata alguma. Assim, considerando a existência de uma UTR por barra e de UMFs de barra, o conjunto de UTRs e UMFs candidatas, para o sistema de 4 barras em análise, é o seguinte:

- Uma UTR candidata na barra 1 (UTR 1), que transmite a medida de injeção de potência na barra 1 (I_1) e a medida de fluxo de potência da barra 1 para barra 2 (F_{12}).
- Uma UTR candidata na barra 2 (UTR 2), que transmite a medida de injeção de potência na barra 2 (I_2) e as medidas de fluxo de potência da barra 2 para as barras 1 (F_{21}) e 3 (F_{23}).

- Uma UTR candidata na barra 3 (UTR 3), que transmite a medida de injeção de potência na barra 3 (I3) e as medidas de fluxo de potência da barra 3 para as barras 2 (F32) e 4 (F34).

- Uma UTR candidata na barra 4 (UTR 4), que transmite a medida de injeção de potência na barra 4 (I4) e a medida de fluxo de potência da barra 4 para barra 3 (F43).

- Uma UMF de barra na barra 1 (UMF 1), contendo uma medida fasorial de ângulo de fase de tensão na barra 1 (θ_1) e a medida fasorial de corrente da barra 1 para barra 2 (C12).

- Uma UMF de barra na barra 2 (UMF 2), contendo uma medida fasorial de ângulo de fase de tensão na barra 2 (θ_2) e as medidas fasoriais de corrente da barra 2 para as barras 1 (C21) e 3 (C23).

- Uma UMF de barra na barra 3 (UMF 3), contendo uma medida fasorial de ângulo de fase de tensão na barra 3 (θ_3) e as medidas fasoriais de corrente da barra 3 para as barras 2 (C32) e 4 (C34).

- Uma UMF de barra na barra 4 (UMF 4), contendo uma medida fasorial de ângulo de fase de tensão na barra 4 (θ_4) e a medida fasorial de corrente da barra 4 para barra 3 (C43).

Conforme será apresentado a seguir, quando a medida de uma UTR (ou UMF) candidata for selecionada para ser instalada, todas as demais medidas dessa UTR (ou dessa UMF) tornam-se candidatas.

Importa destacar que neste exemplo foi restringida a instalação de apenas uma UMF, portanto, a MFS do ângulo de fase da tensão será crítica.

Segue um exemplo de cromossomo e sua respectiva matriz jacobiana transposta estruturada considerando o sistema de 4 barras ilustrado pela figura 4.3.

I3	F 2-1	θ_3	I1	F 1-2	C 2-3	F 2-3	θ_1	C 1-2	I2	I4	C 2-1	C 4-3	F 3-4	θ_2	C 3-2	C 3-4	F 4-3	F 3-2	θ_4
----	----------	------------	----	----------	----------	----------	------------	----------	----	----	----------	----------	----------	------------	----------	----------	----------	----------	------------

Para deixar claro como funciona o processo de seleção de medidas candidatas para serem instaladas, utilizar-se-á o seguinte código de cores nas colunas da matriz jacobiana transposta:

	Medidas Instaladas
	Medidas Candidatas
	Medidas de UTRs Candidatas
	Medidas Fasoriais Sincronizadas Candidatas

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	θ_3	C23	θ_1	C12	C21	C43	θ_2	C32	C34	θ_4
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

Lembrando que, se a metodologia estiver sendo aplicada para fortalecimento de um SM, os medidores já instalados são colocados à esquerda do cromossomo, seguidos pelas medidas candidatas, UTRs candidatas e MFSs candidatas.

Fase 2: Os cromossomos gerados na fase anterior são avaliados qualitativamente através da obtenção e análise da matriz H_{Δ}^T .

Primeiramente, a análise começa com a heurística construtiva que instalará as medidas necessárias para auxiliar no nível de redundância de UTRs, para, posteriormente, realizar-se a análise e restauração da observabilidade através da fatoração triangular da matriz jacobiana transposta correspondente a cada indivíduo (Etapa 2). Depois, as MCs são identificadas e tornadas redundantes (Etapa 3). Finalmente, na Etapa 4, as medidas que constituem os CCMs são identificadas e aumenta-se a redundância das mesmas para obtenção de um SM isento de CCMs.

Etapa 1 – Heurística Construtiva

Como mencionado anteriormente, a heurística construtiva irá instalar medidas de fluxo, injeção ou corrente de forma que todas as barras do SEP apresentem, no mínimo, duas UTRs/UMFs relacionadas às variáveis de estado dessa barra, sendo estas duas UTRs/UMFs de barras adjacentes ou uma de sua própria barra e outra de uma adjacente.

Lembrando que a sequência das UTRs em análise respeita a sequência com que as mesmas aparecem no indivíduo. Portanto, para o indivíduo teste a sequência será:

$$Sequência = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	θ_3	C32	θ_1	C12	C21	C43	θ_2	C23	C34	θ_4
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

Como não existem medidas instaladas inicialmente, tem-se os vetores $VC_UTR_{[n]}$ e $VC_CORRENTE_ADJA_{[n]}$ zerados.

$VC_UTR =$	0	0	0	0
$VC_CORRENTE_ADJA =$	0	0	0	0

Barra 3

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	$\theta 3$	C32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

$VC_UTR =$	0	1	1	1
$VC_CORRENTE_ADJA =$	0	0	0	0

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	$\theta 3$	C32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

$VC_UTR =$	1	2	2	1
$VC_CORRENTE_ADJA =$	0	0	0	0

Barra 2

A análise da UTR 2 não é necessária, pois, como pode-se ver, no vetor $VC_UTR_{[n]}$, a barra 2 já possui duas UTRs que podem fornecer seu estado.

Barra 1

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	$\theta 3$	C32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

$VC_UTR =$	2	3	2	1
$VC_CORRENTE_ADJA =$	0	0	0	0

Barra 4

	I3	F21	I1	F12	F23	I2	I4	F34	F43	F32	$\theta 3$	C32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	2	0	0	0	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	1	-1	-1	1	2	0	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	-1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	0	0	0	1	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

VC_UTR =	2	3	3	2
VC_CORRENTE_ADJA =	0	0	0	0

Ao término da execução da heurística construtiva, a matriz H_{Δ}^T é reorganizada.

	I3	I1	F23	I4	F21	F12	I2	F34	F43	F32	$\theta 3$	C32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	2	0	-1	-1	0	0	-1	1	-1	1	1	-1	0	0	0	-1	0	1	1	0
2	-1	-1	1	0	1	-1	2	0	0	-1	0	1	0	-1	1	0	1	-1	0	0
1	0	1	0	0	-1	1	-1	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
4	-1	0	0	1	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	-1	0	0	0	-1	0	0	-1

VC_UTR =	2	3	3	2
VC_CORRENTE_ADJA =	0	0	0	0

Etapa 2 – Observabilidade

Forward

[illegible]

Diagonalização

[illegible]

Backward

	I3	I1	F23	$\theta 3$	I4	C32	F21	F12	I2	F34	F43	F32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1
2	0	1	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	1	0	0	-1	1	1	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Etapla 3 – Tornando o SM isento de Medidas Críticas

Todas as medidas que apresentaram $VC_{(i)} < 1$ são classificadas como MCs.

$$VC^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Após a identificação das MCs, as mesmas são tornadas redundantes, exceto a medida angular de fase de tensão, pois não é permitida a instalação de mais uma UMF.

	I3	I1	F23	$\theta 3$	I4	C32	F21	F12	I2	F34	F43	F32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	1	0	0	0	-1	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1
2	0	1	0	0	0	0	-1	1	-1	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	1	0	0	-1	1	1	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$VC^T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Etapla 4– Tornando o SM isento de Conjuntos Críticos de Medidas

Após realizada a identificação das medidas que fazem parte de CCMs, procede-se ao aumento da redundância das medidas.

	I3	I1	F23	$\theta 3$	I4	C32	F21	F12	F34	I2	F43	F32	$\theta 1$	C12	C21	C43	$\theta 2$	C23	C34	$\theta 4$
3	1	0	0	0	-1	0	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	1	-1
2	0	1	0	0	0	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	-1	-1	0	0	1	1	-1	-1	1	0	0	-1	1	1	1	-1
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
GPS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$$VC^T = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

Etapa 5 – Tornando o SM isento de UTRs Críticas

Analisa, uma a uma, das UTRs da lista L_UTR_B (UTRs que fornecem uma ou mais medida básica).

$$L_UTR_B = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline \end{array}$$

UTR 1

Ao analisar a UTR 1, eliminam-se todas as medidas básicas fornecidas pela UTR, portanto, elimina-se a medida I1. Após a eliminação, obtém-se a nova matriz H_{Δ}^T , onde, para restaurar a observabilidade, foi utilizada a medida suplementar F21.

	I3	F21	F23	θ_3
3	1	0	0	0
2	0	1	0	0
1	0	0	1	0
4	0	0	0	1
GPS	0	0	0	0

Logo, não foi preciso instalar uma medida ou UTR, portanto, a UTR 1 não é crítica.

UTR 2

Na análise da UTR 2, elimina-se a medida F23. Após a eliminação, obtém-se a nova matriz H_{Δ}^T , onde, para restaurar a observabilidade foi utilizada a medida suplementar I4.

	I3	I1	I4	θ_3
3	1	0	0	0
2	0	1	0	0
1	0	0	1	0
4	0	0	0	1
GPS	0	0	0	0

Como não foi preciso instalar uma medida ou UTR a UTR 2 não é crítica.

UTR 3

Na análise da UTR 2, elimina-se a medida I3. Após a eliminação, obtém-se a nova matriz H_{Δ}^T , onde, para restaurar a observabilidade foi utilizada a medida suplementar I4.

	I4	I1	F23	θ_3
3	1	0	0	0
2	0	1	0	0
1	0	0	1	0
4	0	0	0	1
GPS	0	0	0	0

Não sendo preciso instalar uma medida ou UTR, a UTR 3 é considerada redundante.

Analisando as H_{Δ}^T acima, detecta-se que o SM encontrado não possui UTR crítica, portanto, fim do processo de análise qualitativa do indivíduo.

Fase 3: Terminada a análise qualitativa dos cromossomos gerados, calcula-se, nesta fase, o *fitness* de cada cromossomo (indivíduo) de acordo com os valores apresentados na tabela 4.1. Para o indivíduo em análise, tem-se:

$$fitness = 4,5 \times 7 + 100 \times 4 + 135$$

$$fitness = 566,5 \text{ UM}$$

O indivíduo analisado no exemplo corresponde ao seguinte SM confiável:

Figura 4.4 - SMC encontrado para o exemplo 4 barras.

Após a avaliação de todos os indivíduos da população, o melhor é selecionado para reproduzir com todos e, assim, darão origem a novos indivíduos, os quais serão incluídos na próxima geração. O processo de evolução continua até que o critério de parada seja alcançado.

Para o sistema teste analisado, a melhor solução, ou seja, SMC híbrido com menor custo de instalação, foi o da figura 4.5, que apresentou um *fitness* de 466,5 UM.

Figura 4.5 - SMC, com menor custo, encontrado para o sistema de 4 barras testado.

Capítulo 5

5. Testes e Análise dos Resultados

Diversos testes foram realizados para comprovar a eficiência do AERS+ para projeto de novos SMCs e para fortalecimento de SMs já existentes. Alguns desses testes serão apresentados neste capítulo.

Para cada sistema foram realizados três testes considerando todos os critérios técnicos apresentados. Os testes são:

- Projeto de SM convencional, portanto, utilizando somente medidas convencionais;
- Projeto de SM fasorial, portanto, utilizando somente MFSs;
- Fortalecimento de um SM convencional utilizando UMFs.

A metodologia foi implementado utilizando a linguagem de programação C, sendo executado em um microcomputador Core i5 2,67 GHz, com 4 GB de memória RAM e Sistema Operacional Windows 7. Para realização dos testes foram utilizados os sistemas de 14, 30 e 57 barras do IEEE.

Para os testes foram feitas as seguintes considerações e especificações:

- Cada barra do sistema estará associada a somente uma UTR e/ou UMF;
- Cada UTR estará associada a somente uma barra do sistema;
- Considerar-se-ão os custos de medidores, UTRs e UMFs apresentados na tabela 4.1;
- Para cada caso teste foram realizadas 50 simulações;
- As barras com medidas de injeção nula podem ser vistas na tabela 5.1;
- Para os testes de fortalecimentos, as medidas existentes estão representadas na tabela 5.2.

- Parâmetros do AE: 500 Gerações; População é formada por 50 indivíduos; Taxa de seleção dos indivíduos para mutação¹⁸ variável de 70% à 99% da população; Mutação do tipo *Swap Mutate* com taxa de mutação dos indivíduos¹⁹ de 1% à 10%; Foi utilizado Elitismo; A reprodução utilizada foi “melhor cruza com todos”; Operador *Multi Point Crossover* de um ou dois pontos, sendo eles escolhidos aleatoriamente.

Sistema IEEE	Barras com injeção nula
14 Barras	7.
30 Barras	6; 9; 11; 25; 28.
57 Barras	4; 7; 11; 21; 22; 24; 26; 34; 36; 37; 39; 40; 45; 46; 48.

Tabela 5.1 - Barras que possuem injeção nula (utilizadas somente nos testes com medidas de injeção nula).

Sistema IEEE	Med. de Fluxo existentes
14 Barras	1-5; 6-11; 9-10.
30 Barras	3-1; 3-4; 7-5; 11-9; 18-15; 18-19; 23-15; 23-24; 26-25.
57 Barras	14-15; 15-45; 18-19; 21-22; 22-38; 24-26; 28-29; 30-31; 34-35; 36-40; 39-57; 47-48; 50-51; 53-54.

Tabela 5.2 - Medidas existentes consideradas apenas para os testes de fortalecimento.

5.1 Testes com o Sistema de 14 Barras do IEEE

5.1.1 Projeto de SMC

A seguir, serão mostrados os resultados obtidos para projeto de um novo SMC. Os testes foram divididos em duas categorias. Inicialmente foi considerada, somente, medidas convencionais. Posteriormente considerou-se, somente, medidas fasoriais sincronizadas.

Somente com medidas convencionais sem considerar UI como critério técnico

A tabela 5.3 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs convencionais, com diversos critérios técnicos.

¹⁸ Chance do indivíduo de ser selecionado para mutação.

¹⁹ Porcentagem do indivíduo que sofrerá mutação

Sistema IEEE14 barras										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	11	2	4	-	-	458,5 UM	458,5 UM	458,5 UM	0	50/50
Tipo 2	12	4	4	-	-	472 UM	472 UM	472 UM	0	50/50
Tipo 3	11	7	8	-	-	881 UM	890 UM	885,41 UM	2,3	7/50
Tipo 4	7	9	9	-	-	972,0 UM	981 UM	975,6 UM	2,4	13/50

Tabela 5.3 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 14 barras).

Analisando-se a tabela 5.3 percebe-se que os desvios padrão (σ) permanecem baixos independente do critério técnico utilizado, portanto, o AERS+ mostrou-se muito estável para o sistema de 14 barras.

A tabela 5.4 mostra, para fins de comparação, os resultados obtidos por outros métodos encontrados na literatura. Observando-se a tabela fica evidente a melhora dos resultados obtidos pelo AERS+, quando comparada com os demais métodos, inclusive quando comparado com o AERS, proposto em (VIGLIASSI et al., 2009). Boa parte dessa melhora vem com a aplicação da heurística construtiva para auxiliar no tratamento das UTRs críticas, como será mostrado no final deste capítulo.

Sistema IEEE14 barras				
Métodos	SM tipo 1	SM tipo 2	SM tipo 3	SM tipo 4
(COSER et al., 2006)	-	-	-	1076,5 UM
(VIGLIASSI et al., 2009)	-	-	-	1003,5 UM
(ROCHA et al., 2010b)	458,5 UM	476,5 UM	894,5 UM	976,5 UM
(TAFUR et al., 2007)	458,5 UM	476,5 UM	885,5 UM	-
AERS+ (PROPOSTA)	458,5 UM	472 UM	881 UM	972 UM

Tabela 5.4 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais (IEEE 14 barras).

A melhor solução, para SM tipo 4, encontrado pelo AERS+ pode ser visto na figura 5.1, onde, facilmente percebe-se que todas as barras possuem no mínimo três medidas fornecendo o seu estado equivalente, sendo que, uma medida é básica e as outras são redundantes.

Figura 5.1– SM tipo 4 obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 14 barras).

A figura 5.2 mostra o gráfico com a evolução do *fitness*, em escala logarítmica, para obtenção do SM tipo 4 ilustrado na figura 5.1. Percebe-se que o processo de convergência, para o sistema de 14 barras com medidas convencionais, do AERS+ com os parâmetros adotados é muito rápido, saturando em aproximadamente 80 geração. Este valor corresponde a 16% do número de gerações adotada como critério de parada.

Figura 5.2 – Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 14 barras com 50 indivíduos).

Somente com medidas convencionais considerando UI como critério técnico

A tabela 5.5 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico.

Sistema IEEE14 barras										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 4	28	1	14	-	-	1530,5 UM	1530,5 UM	1530,5 UM	0	50/50

Tabela 5.5 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais e UI como critério técnico (IEEE 14 barras).

A forma com que a metodologia proposta trabalha para minimizar o UI, instalando sempre pares²⁰ de medidas de fluxo, pouco restringe o espaço de busca. Porém, para sistemas com poucas barras essa restrição é suficiente para se obter, independente do critério técnico utilizado, desvios padrão (σ) zeros. Esse efeito pode ser visualizado na tabela 5.5. Porém, aumentando-se o sistema teste, esse efeito já não apresenta significância, conforme será mostrado adiante.

A tabela 5.6 mostra, para fins de comparação, o resultado encontrado por (BENEDITO et al., 2013). Analisando a tabela fica evidente a capacidade do AERS+ em obter SMCs com medidas com baixo UI, sendo que a metodologia mostrou-se mais eficiente, pois, o maior UI e o desvio padrão encontrado é muito inferior aos obtidos por (BENEDITO et al., 2013).

Todas as medidas e os respectivos UIs, encontrado pela metodologia e por (BENEDITO et al., 2013), estão nas tabelas B1, B2 e B3, respectivamente, do Apêndice.

Sistema IEEE14 barras - CCM					
Métodos	Custo	Menor UI	Maior UI	Média	σ
(BENEDITO et al., 2013)	1566,5 UM	0,1666	1,9962	0,8362	0,45
AERS+ considerando UI	1526 UM	0,9096	1,071	1,002	0,03
AERS+ desconsiderando UI	972 UM	1	22,7417	7,2054	5,89

Tabela 5.6 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico (IEEE 14 barras).

²⁰ O par da medida de fluxo F_{x-y} é a medida F_{y-x} .

Somente com medidas fasoriais sincronizadas

A tabela 5.7 apresenta os resultados encontrados pelo AERS+ para a obtenção de SMs fasoriais, com diversos critérios técnicos e considerando a medida de injeção nula na barra 7 como existente.

Sistema IEEE14 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	3	-	450 UM	565 UM	454,6	22,5	48/50
Tipo 2	-	-	-	4	3	970 UM	1085 UM	984 UM	34,1	32/50
Tipo 3	-	-	-	5	4	1260 UM	1390 UM	1321,8 UM	59,5	24/50

Tabela 5.7 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 14 barras).

Analisando as tabelas 5.7 e 5.8 percebe-se que, diferentemente do que ocorreu com os SMs convencionais, os desvios padrão para SMs fasoriais são maiores. Atribui-se esse aumento à grande variação de custos imposta pelas UMFs, pois existe apenas duas opções de instalação, ou instala uma medida fasorial de tensão e uma de corrente ou uma medida fasorial de tensão e todas de correntes da barra.

Sistema IEEE14 barras sem injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	3	1	570 UM	695 UM	579 UM	24,5	34/50
Tipo 2	-	-	-	5	2	990 UM	1082,3 UM	1225 UM	50,8	6/50
Tipo 3	-	-	-	5	5	1390 UM	1397,5 UM	1520 UM	25,14	26/50

Tabela 5.8 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 14 barras).

Sistema IEEE14 barras						
Métodos	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Com inj.	Sem inj.	Com inj.	Sem inj.	Com inj.	Sem inj.
	0	0	0	0	0	0
(KAVASSERI; SRINIVASAN, 2011)	450 UM	595 UM	-	-	-	-
(KOUTSOUKIS et al., 2013)	450 UM	-	-	-	-	-
(ABBASY; ISMAIL, 2009)	-	570 UM	-	-	-	-
AERS+ (PROPOSTA)	450 UM	570 UM	970 UM	990 UM	1260 UM	1390 UM

Tabela 5.9 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 14 barras).

As figuras 5.3 e 5.4 ilustram os SMs fasoriais, tipo 3, com e sem medida de injeção nula, respectivamente, encontrados pelo AERS+. Analisando-as é fácil visualizar que todas as barras possuem no mínimo três medidas fornecendo suas variáveis de estados.

Figura 5.3 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 14 barras).

Figura 5.4 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 14 barras).

5.1.2 Fortalecimento de SM

Na sequência, ilustram-se os resultados obtidos para fortalecimento do SM apresentado na figura 5.5 (observe que esse SM não é nem mesmo observável).

Figura 5.5 - SM não observável associado ao sistema de 14 barras do IEEE.

Fortalecimento somente com medidas fasoriais sincronizadas

A tabela 5.10 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para o fortalecimento do SM da figura 5.5, fazendo uso apenas de MFSs, com diversos critérios técnicos e considerando a medida de injeção nula na barra 7.

Sistema IEEE14 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	2	-	300 UM	300 UM	300 UM	0	50/50
Tipo 2	-	-	-	2	4	825 UM	827,5 UM	845 UM	5,5	34/50
Tipo 3	-	-	-	3	5	1115 UM	1173,8 UM	1255 UM	63,6	14/50

Tabela 5.10 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 14 barras).

Na figura 5.6 é apresentado o SMC, no qual o fortalecimento foi feito exclusivamente com MFSs, encontrado após a execução do algoritmo.

Figura 5.6 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, com injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.5 (IEEE 14 barras).

A tabela 5.12 mostra, para fins de comparação, os resultados obtidos por outros métodos encontrados na literatura. Assim como no teste anterior, os resultados não permitem tirar muitas conclusões, pois, todos os métodos encontraram o mesmo custo.

Sistema IEEE14 barras						
Métodos	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Com inj.	Sem inj.	Com inj.	Sem inj.	Com inj.	Sem inj.
	0	0	0	0	0	0
(KAVASSERI; SRINIVASAN, 2011)	300 UM	-	-	-	-	-
(ESMAILI et al., 2013)	300 UM	-	-	-	-	-
AERS+ (PROPOSTA)	300 UM	440 UM	825 UM	840 UM	1115 UM	1255 UM

Tabela 5.12 - Comparação entre métodos para fortalecimento de SMs com MFSs (IEEE 14 barras).

5.2 Testes com o Sistema de 30 Barras do IEEE

5.2.1 Projeto de SMC

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para projeto de um novo SM, considerando agora o sistema de 30 barras do IEEE. Inicialmente será considerada a existência apenas de medidas convencionais e depois apenas MFSs.

Somente com medidas convencionais

A tabela 5.13 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SM tipo 1, 2, 3 e 4 apenas com medidas convencionais. Analisando a tabela tem-se que houve um aumento dos desvios padrão para o SM tipo 3 o que é esperado quando aumenta-se o sistema. Esse efeito não ocorre com SM tipo 4, pois, a utilização da heurística construtiva restringe o espaço de busca ao instalar as UTRs necessárias no início da análise. Independente do aumento do desvio padrão para o SM isento de CCM, seu valor percentual corresponde a menos de 5% do custo total do SM.

O SM tipo 4 obtido é apresentado na figura 5.8.

Figura 5.8 - SMC obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 30 barras).

Sistema IEEE 30 barras										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	25	4	10	-	-	1130,5 UM	1130,5 UM	1130,5 UM	0	50/50
Tipo 2	23	9	10	-	-	1144 UM	1147,69 UM	1157,5 UM	3,5	18/50
Tipo 3	27	15	18	-	-	1989 UM	2010,51 UM	2093,5 UM	37,1	15/50
Tipo 4	21	15	21	-	-	2262 UM	2275,5 UM	2265,96 UM	4,46	23/50

Tabela 5.13 - SMC obtido pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 30 barras).

A tabela 5.14 mostra, para fins de comparação, os resultados obtidos por outros métodos. Observe que a metodologia, para todos os critérios técnicos testados, encontrou um

SM com menor custo e para alguns casos com redução bem significativa. Assim como no sistema de 14 barras, é possível ver a grande evolução que a metodologia proposta teve quando comparado com a metodologia base do trabalho proposto por Vigliassi et. al. (2009).

Sistema IEEE 30 barras				
Métodos	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
(COSER et al., 2006)	-	-	-	2980 UM
(VIGLIASSI et al., 2009)	-	-	-	2338,5 UM
(ROCHA et al., 2010b)	1130,5 UM	1165,5 UM	1993,5 UM	2280 UM
AERS+ (PROPOSTA)	1130,5 UM	1144 UM	1989 UM	2257,5 UM

Tabela 5.14 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais (IEEE 30 barras).

A figura 5.9 mostra o gráfico com a evolução do *fitness*, em escala logarítmica, para obtenção do SM tipo 4 ilustrado pela figura 5.8. Percebe-se que o processo de convergência do AERS+ para o sistema de 30 barras é maior do que para o sistema de 14 barras, porém, a saturação aconteceu em aproximadamente 300 gerações, o que corresponde a 60% do número de gerações adotada como critério de parada.

Figura 5.9 - Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 30 barras com 50 indivíduos).

Somente com medidas convencionais considerando UI como critério técnico

A tabela 5.15 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico.

Sistema IEEE30 barras										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 4	71	3	30	-	-	3333 UM	3346,5 UM	3342,36 UM	4,48	25/50

Tabela 5.15 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais e UI como critério técnico (IEEE 30 barras).

Mesmo com o espaço de busca menor, devido a estratégia utilizada para obtenção de SM com medidas de baixo UI, aumentando-se o sistema teste nota-se alteração no desvio padrão (σ), conforme tabela 5.15. Comparando o desvio padrão do resultados desconsiderando o UI, tabela 5.13, com o desvio padrão do resultado considerando o UI, tabela 5.15, percebe-se que houve ligeira alteração. A frequência com que o melhor resultado foi encontrado também se manteve próximo,

A tabela 5.16 mostra, para fins de comparação, o resultado encontrado por (BENEDITO et al., 2013). Percebe-se que a metodologia proposta encontrou um custo maior que o encontrado por (BENEDITO et al., 2013), porém, os valores dos UIs das medidas do SM encontrado pelo AERS+ ficaram muito abaixo dos UI das medidas do SM em comparação. Analisando-se a tabela fica evidente a capacidade do AERS+ em obter SMCs com medidas com baixo UI, sendo que a metodologia se mostrou mais eficiente, pois, o maior UI e o desvio padrão encontrado é muito inferior aos obtidos por (BENEDITO et al., 2013).

Sistema IEEE30 barras - CCM					
Métodos	Custo	Menor UI	Maior UI	Média	O
(BENEDITO et al., 2013)	3233 UM	0,2849	2,1755	0,8846	0,43
AERS+ considerando UI	3333 UM	0,3368	1,2373	0,8079	0,15
AERS+ desconsiderando UI	2262 UM	0,7994	17,0937	4,2271	3,93

Tabela 5.16 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs convencionais considerando UI como critério técnico (IEEE 30 barras).

Todas as medidas e os respectivos UIs, encontrado pela metodologia e por (BENEDITO et al., 2013), estão nas tabelas B4, B5 e B6, respectivamente, do Anexo.

O SMC encontrado pelo AERS+ sem considerar UI das medidas

Medidas fasoriais sincronizadas

A tabela 5.17 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs fasoriais, com diversos critérios técnicos e considerando as medidas de injeção nula.

Sistema IEEE30 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	3	4	1005 UM	1130 UM	1025,6 UM	45,1	38/50
Tipo 2	-	-	-	4	10	1925 UM	2070 UM	1960,6 UM	40,1	2/50
Tipo 3	-	-	-	10	10	2770 UM	2915 UM	2803 UM	51,3	18/50

Tabela 5.17 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).

Sistema IEEE30 barras sem injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	6	4	1405 UM	1655 UM	1484,1 UM	76,8	11/50
Tipo 2	-	-	-	8	8	2240 UM	2605 UM	2385,8 UM	106,8	8/50
Tipo 3	-	-	-	12	12	3305 UM	3465 UM	3358,8 UM	62,5	2/50

Tabela 5.18 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 30 barras).

Ao comparar-se a tabela 5.17 e 5.18 tem-se que na presença de medidas de injeção os desvios padrão encontrados são menores. Isso acontece porque as medidas de injeção, devido a sua característica de relacionar as variáveis de estado das " n_d " barras adjacentes

à barra onde ela foi considerada, permite obter mais variáveis de estados equivalente o que resulta em SMs com número menor de UMFs.

A tabela 5.19 mostra, para fins de comparação, os resultados obtidos por outros métodos encontrados na literatura. Os resultados mostram que a metodologia proposta se mostrou inferior na obtenção de SM tipo 1, porém, ela possui a vantagem de ser mais flexível, pois, permite a obtenção de SMs considerando outros aspectos técnicos.

Sistema IEEE30 barras						
Métodos	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0
(CHAKRABARTI et al., 2009)	-	1500 UM	-	-	-	-
(KOUTSOUKIS et al., 2013)	1025 UM	-	-	-	-	-
(WANG et al., 2012)	900 UM	-	-	-	-	-
(HUI-LING et al., 2013)	880 UM	-	-	-	-	-
AERS+ (PROPOSTA)	1005 UM	1405 UM	1925 UM	2240 UM	2770 UM	3305 UM

Tabela 5.19 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 30 barras).

Figura 5.10 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 30 barras).

As figuras 5.10 e 5.11 ilustram os SMs fasoriais com e sem medida de injeção nula, respectivamente, encontrados pelo AERS+.

Figura 5.11 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 30 barras).

5.2.2 Fortalecimento de SM

Na continuidade serão expostos resultados obtidos para fortalecimento do SM apresentado na figura 5.12 (observe que esse SM não é nem mesmo observável).

Fortalecimento somente com medidas fasoriais sincronizadas

A tabela 5.20 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para o fortalecimento do SM da figura 5.12, fazendo uso exclusivamente de MFSs, com diversos critérios técnicos e considerando as medidas de injeções nulas.

Sistema IEEE30 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	3	1	590 UM	600 UM	591,6 UM	3,6	42/50
Tipo 2	-	-	-	4	5	1270 UM	1400 UM	1293,4 UM	46,6	38/50
Tipo 3	-	-	-	8	8	2225 UM	2355 UM	2235,6 UM	24,8	12/50

Tabela 5.20 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).

Na figura 5.13 é apresentado o SMC com medidas de injeção nulas, no qual o fortalecimento foi feito exclusivamente com MFSs, encontrado após a execução do algoritmo.

Figura 5.12 - SM não observável associado ao sistema de 30 barras do IEEE.

Na figura 5.14 é apresentado o SMC sem medidas de injeções nulas, no qual o fortalecimento foi feito exclusivamente com MFSs, encontrado após a execução do algoritmo.

Figura 5.14 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, sem injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 30 barras).

5.3 Testes com o Sistema de 57 Barras do IEEE

5.3.1 Projeto de SMC

A seguir serão mostrados os resultados obtidos para projeto de um novo SM, considerando agora o sistema de 57 barras do IEEE.

Somente com medidas convencionais

A tabela 5.22 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs com diversos critérios técnicos. Como esperado, os desvios padrão apresentaram um leve aumento, porém, ficam dentro da faixa de variação de 2% a 4% dos custos totais dos SMs encontrados. O SMC obtido é apresentado na figura 5.15.

Figura 5.15 - SMC obtido considerando apenas medidas convencionais (IEEE 57 barras).

Sistema IEEE 57 barras										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	14	42	19	-	-	2152 UM	2252 UM	2184 UM	46,6	34/50
Tipo 2	18	50	19	-	-	2206 UM	2424 UM	2241,7 UM	50,1	2/50
Tipo 3	26	54	28	-	-	3160 UM	3578 UM	3294,72 UM	82,2	2/50
Tipo 4	36	33	33	-	-	3610,5 UM	3828,5 UM	3680,9 UM	76,5	9/50

Tabela 5.22 - SMC obtido pela metodologia proposta considerando apenas medidas convencionais (IEEE 57 barras).

A figura 5.16 mostra o gráfico com a evolução do *fitness*, em escala logarítmica, para obtenção do SM tipo 4 ilustrado pela figura 5.15.

Figura 5.16- Evolução do fitness para projeto de SMC (IEEE 57 barras com 50 indivíduos).

Medidas fasoriais sincronizadas

As tabelas 5.23 e 5.24 apresentam os resultados encontrados pela metodologia para a obtenção de SMs fasoriais, com diversos critérios técnicos e considerando e desconsiderando as medidas de injeção nula, respectivamente. Novamente nota-se um leve aumento dos desvios padrão, entretanto, eles continuam com um valor percentual de até 5% dos custos totais.

Sistema IEEE57 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	9	2	1590 UM	2115 UM	1855 UM	138,2	2/50
Tipo 2	-	-	-	12	8	2810 UM	3325 UM	3072,8 UM	160,6	4/50
Tipo 3	-	-	-	12	21	4560 UM	5200 UM	4812,3 UM	143,7	2/50

Tabela 5.23 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 57 barras).

Sistema IEEE57 barras sem injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	12	5	2415 UM	3180 UM	2791,5 UM	172,8	1/50
Tipo 2	-	-	-	20	10	4200 UM	4930 UM	4430,2 UM	168	2/50
Tipo 3	-	-	-	21	22	5975 UM	6505 UM	6286,6 UM	111,4	1/50

Tabela 5.24 - Resultado dos SMs obtidos pela metodologia proposta considerando apenas MFSs sem injeção nula (IEEE 57 barras).

As figuras 5.17 e 5.18 ilustram os SMs fasoriais com e sem medida de injeção nula, respectivamente, encontrados pelo AERS+.

Figura 5.17 - SM obtido considerando MFSs com injeção nula (IEEE 57 barras).

A tabela 5.25 mostra, para fins de comparação, os resultados obtidos por outros métodos encontrados na literatura. Os resultados mostram, além da mencionada flexibilidade

do AERS+, a superioridade da metodologia quando comparado com os demais métodos, encontrado o menor custo para os testes.

Sistema IEEE57 barras						
Métodos	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0
(CHAKRABARTI et al., 2009)	-	2485 UM	-	-	-	-
(KAVASSERI; SRINIVASAN, 2011)	2025 UM	2465 UM	-	-	-	-
(KOUTSOUKIS et al., 2013)	1615 UM	-	-	-	-	-
(WANG et al., 2012)	1615 UM	-	-	-	-	-
AERS+ (PROPOSTA)	1590 UM	2415 UM	2810 UM	4200 UM	4560 UM	5975 UM

Tabela 5.25 - Comparação entre métodos para obtenção de SMs fasoriais (IEEE 57 barras).

Figura 5.18 - SM obtido considerando MFSs sem injeção nula (IEEE 57 barras).

5.3.2 Fortalecimento de SM

Abaixo serão mostrados os resultados obtidos para fortalecimento do SM apresentado na figura 5.19 (observe que esse SM não é nem mesmo observável).

Figura 5.19 - SM não observável associado ao sistema de 57 barras do IEEE.

Fortalecimento somente com medidas fasoriais sincronizadas

A tabela 5.26 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para o fortalecimento do SM da figura 5.19, fazendo uso de MFSs, com diversos critérios técnicos e considerando as medidas de injeções nulas.

Na figura 5.20 é apresentado o SMC, no qual o fortalecimento foi feito exclusivamente com MFSs, encontrado após a execução do algoritmo.

Sistema IEEE57 barras com injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	6	2	1145 UM	1530 UM	1287,2 UM	107,2	6/50
Tipo 2	-	-	-	7	8	2100 UM	2475 UM	2282 UM	96,4	2/50
Tipo 3	-	-	-	12	14	3605 UM	4140 UM	3784,8 UM	142	3/50

Tabela 5.26 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 57 barras).

Figura 5.20 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, com injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 57 barras).

A tabela 5.27 apresenta os resultados encontrados pela metodologia para o fortalecimento do SM da figura 5.20, fazendo uso de MFSs, com diversos critérios técnicos e considerando a medida de injeção nula na barra 7.

Sistema IEEE57 barras sem injeção nula										
SM	Medidas					Custos				
	Convencionais			Fasoriais Sincr.		Mín.	Max.	Méd.	O	Freq.
	Fluxo	Injeção	UTR	Barra	Ramo					
Tipo 1	-	-	-	7	7	1975 UM	2720 UM	2221,4 UM	197,3	4/50
Tipo 2	-	-	-	18	4	3145 UM	3960 UM	3546 UM	178	2/50
Tipo 3	-	-	-	22	13	4915 UM	5545 UM	5215,2 UM	177,5	4/50

Tabela 5.27 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs sem injeção nula presente (IEEE 57 barras).

Na figura 5.21 é apresentado o SMC, no qual o fortalecimento foi feito exclusivamente com MFSs, encontrado após a execução do algoritmo.

Figura 5.21 - SMC obtido através do fortalecimento com MFSs, sem injeção nula, do SM apresentado na Figura 5.13 (IEEE 30 barras).

Sistema IEEE57 barras						
Métodos	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0	Com inj. 0	Sem inj. 0
(ESMAILI et al., 2013)	1190 UM	-	-	-	-	-
(KAVASSERI; SRINIVASAN, 2011)	1185 UM	-	-	-	-	-
AERS+ (PROPOSTA)	1145 UM	1975 UM	2100 UM	3145 UM	3605 UM	4915 UM

Tabela 5.28 - Comparação entre métodos para fortalecimento de SMs com MFSs (IEEE 57 barras).

Analisando a tabela 5.28, percebe-se que mais uma vez a metodologia proposta encontrou um SM com custo menor que os demais métodos encontrados na literatura.

Capítulo 6

6. Conclusões

6.1 Análise dos Resultados

Os resultados obtidos nos testes apresentados no capítulo anterior demonstram a eficiência da metodologia proposta nesta dissertação de mestrado, tendo em vista os resultados coerentes a que todos chegaram. As tabelas contendo todos os medidores, UTRs e UMFs instaladas em todos os testes encontram-se no Apêndice desta dissertação.

Em todos os testes considerando apenas medidas convencionais, os resultados obtidos pela metodologia proposta foram superiores aos obtidos pelos métodos encontrados na literatura. Já para os testes considerando apenas MFSs, apenas no sistema de 30 barras que a metodologia se mostrou inferior a dois métodos encontrados na literatura.

É importante destacar que o AERS+ permite a instalação de UMFs de ramo e barra, portanto é claro que em alguns testes essa diferença de custos, quando se comparou com outros métodos, pode ser atribuído a essa flexibilidade, porém, caso seja de interesse o AERS+ pode ser utilizado para instalar somente MFSs de barra ou de ramo.

Vale ressaltar que a metodologia proposta possibilita a obtenção de SMCs com custos menores que os obtidos pela metodologia que foi utilizada como base para o seu desenvolvimento, a metodologia AERS proposta em (VIGLIASSI et al., 2009). Essa melhora de desempenho na capacidade de obtenção de melhores soluções deve-se a três modificações propostas nesse trabalho. São elas: (i) Primeira, em (VIGLIASSI et al., 2009) as medidas dos cromossomos eram alocados nas suas respectivas H^T de tal forma que as medidas de uma mesma UTR ficavam próximas uma das outras. Já o AERS+ os medidores são dispostos independente da UTR a qual eles pertencem, sendo a ordem das colunas a ordem das medidas no indivíduo, para após reorganizar a matriz conforme a figura 4.2; (ii) A segunda modificação, como mencionada no capítulo anterior, ocorre na correspondência entre as barras do SEP e as linhas da matriz H^T . Portanto, para um indivíduo qualquer do AE a

primeira linha da sua matriz H^T pode corresponder a barra 1 do SEP, assim como, para outro indivíduo a primeira linha da sua matriz H^T pode corresponder a n ésima barra do SEP; (iii) A terceira e mais importante modificação é a inclusão de uma heurística construtiva para auxiliar no tratamento de UTRs. A heurística construtiva irá instalar medidas, de injeção, fluxo ou corrente, de forma que todas as barras do SEP apresentem, no mínimo, duas UTRs/UMFs redundantes, sendo estas UTRs/UMFs de duas barras adjacentes ou uma de sua própria barra e outra de uma adjacente. Lembrando que, para que o SM seja efetivamente isento de UTRs Críticas é necessária a análise da H_{Δ}^T , portanto, para SMs convencionais a heurística construtiva irá apenas auxiliar o método.

Para validar tais modificações utilizar-se-á da tabela 6.1, onde foram feitos diversos testes, com as alterações propostas nesse trabalho, no sistema IEEE 30 barras. É possível visualizar as significativas melhoras de resultados ao acrescenta-se tais modificações.

Sistema IEEE 30 – SMC convencional						
Alterações		Custos				
		Mín.	Max.	Méd.	σ	Freq.
Sem troca de linhas	Sem Heurística Construtiva	2275,5 UM	2493,5 UM	2307,13 UM	46,5	6/50
	Com Heurística Construtiva	2262 UM	2280 UM	2267,75 UM	4,9	6/50
Com troca de linhas	Sem Heurística Construtiva	2271 UM	2302,5 UM	2280,72 UM	6,38	9/50
	Com Heurística Construtiva	2262 UM	2275,5 UM	2265,96 UM	4,06	23/50

Tabela 6.1 - Resultado para fortalecimento do SM utilizando apenas MFSs com injeção nula presente (IEEE 30 barras).

Através da tabela é possível perceber que acrescentando-se somente a troca de linhas da H^T o melhor resultado encontrado apresenta uma redução de 4,5 UM. Apesar de ser uma singela redução, o mais importante da troca de linhas é que ela proporciona uma melhor estabilidade para o AE, sendo vista através dos desvios padrão. Já, somente no acréscimo da heurística construtiva o melhor resultado encontrado apresenta uma redução de 13,5 UM, muito mais significativa que a troca de linhas. Porém, o mais importante é a utilização das duas modificações para então terem-se grandes reduções de custos e melhora na estabilidade do AE.

6.2 Considerações Finais

Com o objetivo de tornar mais confiável o processo de EESEP, ao longo das últimas décadas diversas metodologias têm sido desenvolvidas para projeto de novos SMs e para análise e adequação (ou fortalecimento) de SMs já existentes. Porém constatou-se a falta de uma metodologia que englobasse todos os tipos de tecnologias de medição e diferentes critérios técnicos, dessa forma, dando mais flexibilidade e confiabilidade ao projeto de SMs.

Afim de superar tal limitação, o problema de obtenção de SMCs para efeito de estimação de estado foi estudado em detalhe, principalmente os métodos desenvolvidos que fazem uso da matriz H_{Δ}^T (LONDON JR et al., 2002; VIGLIASSI et al., 2009). Através desse embasamento teórico foi possível atingir o primeiro objetivo desta dissertação de mestrado, isto é, desenvolveu-se uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs convencionais, híbridos ou fasoriais, que fazem uso da matriz H_{Δ}^T e de um AE projetado especialmente para aproveitar as características dessa matriz.

A última etapa desta dissertação refere-se ao objetivo dois, ou seja, ao desenvolvimento de uma metodologia para projeto e fortalecimento de SMs confiáveis que, além de considerar os critérios técnicos de confiabilidade para efeito de estimação de estado (observabilidade e ausência de MCs, CCMs e UTRs críticas), considera também o índice UI das medidas (BENEDITO et al., 2013). A respeito, importa destacar que já foram realizados estudos iniciais sobre o índice UI, bem como da importância do mesmo para projeto de SMs, conforme apresentado em Benedito (2011) e Benedito et al. (2013), contudo havia a necessidade de se estudar formas mais eficientes e melhores para a obtenção de SMCs.

Por fim, o trabalho desenvolvido possibilitou uma compreensão ampla do problema de obtenção de SMC para estimação de estado em SEP, sendo que a metodologia desenvolvida obteve ótimos resultados quando comparada com a literatura e, desse modo, revelou-se uma ferramenta muito promissora.

6.3 Perspectivas Futuras

Como mencionado, a metodologia desenvolvida obteve ótimos resultados, porém, nos estudos e implementações realizados, foram identificadas algumas limitações que o AERS+ apresenta quanto ao tratamento do UI como critério técnico.

Assim, uma das perspectivas futuras é o desenvolvimento e implementação de um Algoritmo Evolutivo Multiobjetivo (BENAYOUN et al., 1971) baseado em tabelas de subpopulações onde cada critério técnico e tipos de SMs corresponderá a uma tabela, em que

o UI das medidas do SM será calculado para cada indivíduo. Com o intuito de alcançar esse objetivo, algumas mudanças devem ocorrer no AE desenvolvido neste trabalho, tais como na representação do indivíduo, que deverá ser binária.

Para reduzir o esforço computacional no cálculo do UI das medidas, poderá ser usada a afirmação de que o UI possui uma fraca dependência com as variáveis de estado estimada (BENEDITO, 2011). Portanto, o cálculo das variáveis de estado pode ser feito rodando o fluxo de carga com todas as medidas disponíveis apenas uma vez. Ao obter esses valores, o custo computacional para o cálculo do UI será baixo, assim, permitindo ser calculado para cada indivíduo em todas as gerações.

6.4 Artigos Publicados e Aceitos para Publicação

Bozz, A. A. C., Vigliassi, M. P., Borges, H. F., & London Jr., J. B. A. (2013). Metodologia para Projeto de Sistemas de Medições Híbridos Confiáveis para Efeito de Estimação de Estado Via Algoritmos Evolutivos e Matriz HAT. *XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente – SBAI*.

Bozz, A. A. C., Vigliassi, M. P., & London Jr., J. B. A. (2014). Metering System Planning for State Estimation via Evolutionary Algorithm and HAT Matrix Considering SCADA and PMU measurements. 2014 IEEE PES General Meeting.

Bozz, A. A. C., Vigliassi, M. P., & London Jr., J. B. A. (2014). Metodologia para Planejamento de Sistemas de Medição Híbridos Confiáveis para Estimação de Estado. *XX Congresso Brasileiro de Automática - CBA*.

REFERÊNCIAS

- ABBASY, N. H.; ISMAIL, H. M. A Unified Approach for the Optimal PMU Location for Power System State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, n. 2, p. 806–813, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4839066>>. .
- ALBUQUERQUE, A.; COSTA, A. S. Tratamento de Erros Grosseiros em Estimadores de Estado Híbridos Multi-Estágios com Capacidade de Processamento de Medidas Fasoriais. **XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (XII SEPOPE)**, p. 10, 2012. Rio de Janeiro.
- ALBUQUERQUE, R.; COELHO, A. L. M.; OLIVEIRA, D. Q.; LIMA, S. L.; SANTOS, I. S. Algoritmo genético canônico modificado aplicado na alocação ótima de unidades de medição fasorial sincronizada para análise de observabilidade r. **XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, , n. 2012, 2013.
- ALBUQUERQUE, R.; PAUCAR, V. Evaluation of the PMUs Measurement Channels Availability for Observability Analysis. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, n. 3, p. 2536–2544, 2013. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6468148>. Acesso em: 10/12/2013.
- ALLAGUI, B.; ARIBIA, H. BEN; HADJ ABDALLAH, H. Optimal placement of Phasor Measurement Units by genetic algorithm. **Renewable Energies and Vehicular Technology (REVET), 2012 First International Conference on**, p. 434–439, 2012.
- AL-MOHAMMED, A. H.; ABIDO, M. A.; MANSOUR, M. M. Optimal Placement of Synchronized Phasor Measurement Units Based on Differential Evolution Algorithm. p.1–9, 2011.
- ANTONIO, A. B.; TORREAO, J. R. A.; COUTTO FILHO, M. B. DO. Meter placement for power system state estimation using simulated annealing. **Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto**, v. 3, p. 5 pp. vol.3, 2001.
- ARROYO, J. E. C. **Heurísticas e Metaheurísticas para Otimização Combinatória Multiobjetivo**, 2002. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- AZIZI, S.; GHAREHPETIAN, G. B.; DOBAKHSHARI, A. S. Optimal Integration of Phasor Measurement Units in Power Systems Considering Conventional Measurements. **Smart Grid, IEEE Transactions on**, p. 1–9, 2013.
- BALDWIN, T. L.; MILI, L.; BOISEN, M. B.; ADAPA, R. Power system observability with minimal phasor measurement placement. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 8, n. 2, p. 707–715, 1993. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=260810>>. .
- BENAYOUN, R.; MONTGOLFIER, J.; TERGNY, J.; LARITCHEV, O. Linear programming with multiple objective functions: Step method (stem). **Mathematical**

Programming, v. 1, n. 1, p. 366–375, 1971. Springer-Verlag. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF01584098>>. .

BENEDITO, R. A. DE S. **Índice de não-detecção de Erros Grosseiros no Processo de Estimacao de Estado em Sistemas Elétricos de Potência**, 2011. Dissertação, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado em Sistemas Eletricos de Potência.

BENEDITO, R. A. S.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G.; LONDON, J. B. A. Power System State Estimation: Undetectable Bad Data. **International Transactions on Electrical Energy Systems (ETEP1744)**, 2013. Disponível em: <wileyonlinelibrary.com>. .

BORGES, G. P. **Análise de Observabilidade e Identificação de Medidas Críticas para Sistemas de Medição Formados por Medidas Convencionais e Faroriais Sincronizadas**, 2011. Dissertação, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-08062011-150636/publico/Guilherme.pdf>>. Acesso em: 28/11/2012.

BRUENI, D. J.; HEATH, L. S. The PMU Placement Problem. **SIAM J. Discrete Math**, p. 744–761, 2005.

BRUNO, C.; CANDIA, C.; FRANCHI, L.; et al. Possibility of enhancing classical weighted least squares State Estimation with linear PMU measurements. **PowerTech, 2009 IEEE Bucharest**, p. 1–6, 2009.

CHAKRABARTI, S.; KYRIAKIDES, E.; ELIADES, D. G. Placement of Synchronized Measurements for Power System Observability. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 1, p. 12–19, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4729806>>. .

CHEN, J.; ABUR, A. Placement of PMUs to Enable Bad Data Detection in State Estimation. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1608–1615, 2006.

CIPRIANI, E.; COSTA, A. J. A. S. **Análise de Observabilidade e Criticidade de Medidas na Estimacao de Estados em Sistemas de Potência considerando Medições Fasoriais Sincronizadas. XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, , n. 2008, 2010.

CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ, G. R.; DAVIS, P. W. Power System State Estimation Residual Analysis: An Algorithm Using Network Topology. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-100, n. 4, p. 1779–1787, 1981.

CLEMENTS, K. A.; KRUMPHOLZ, G. R.; DAVIS, P. W. State Estimator Measurement System Reliability Evaluation -- An Efficient Algorithm Based on Topological Observability Theory. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-101, n. 4, p. 997–1004, 1982.

COSER, J.; COSTA, A. S.; ROLIM, J. G. Metering Scheme Optimization With Emphasis on Ensuring Bad-Data Processing Capability. **Power Systems, IEEE Transactions on. Anais...** v. 21, p.1903–1911, 2006.

COSTA, A. S.; MEYER, B. T.; DECKER, I. C. Análise dos Benefícios de Medições Fasoriais Sincronizadas quanto ao Desempenho da Estimação de Estado em Sistemas de Potência. **XVII Congresso Brasileiro de Automática**, 2008.

COUTTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S. DE; MEZA, E. B. M. Application os Genetic Algorithms for planning metering systems in state estimation. **15th Power Systems Computation Conference**, , n. August, p. 22–26, 2005. Disponível em: <http://www.psc-central.org/uploads/tx_ethpublications/fp12.pdf>. Acesso em: 21/11/2012.

DY LIACCO, T. E. Real-time computer control of power systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 884–891, 1974. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1451471>>. .

EMAMI, R.; ABUR, A. Robust measurement design by placing synchronized phasor measurements on network branches. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 25, n. 1, p. 38–43, 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5353622>. Acesso em: 10/12/2013.

ESMAILI, M.; GHARANI, K.; SHAYANFAR, H. A. Redundant Observability PMU Placement in the Presence of Flow Measurements Considering Contingencies. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, p. 1–9, 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/iel7/59/4374138/06515130.pdf?arnumber=6515130>>. Acesso em: 31/10/2013.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1989.

GUIMARAENS, M. A. R.; COUTTO FILHO, M. B. D.; SOUZA, J. C. . Utilização de Sincrofasores Para Monitoramento do Estado Operativo de Sistemas de Potência. **XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (XII SEPOPE)**, p. 11, 2012. Rio de Janeiro.

HOLLAND, J. H. **Adaption in Natural and Artificial Systems**, 1975. University of Michigan Press.

HUI-LING, Z.; YUAN-XIU, D.; XIAO-PAN, Z.; HUAN, Q.; CHENG-XUN, H. Hybrid of MST and Genetic Algorithm on Minimizing PMU Placement. **2013 Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications**, , n. 2, p. 820–823, 2013. Ieee. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6455745>>. Acesso em: 31/10/2013.

KAVASSERI, R.; SRINIVASAN, S. K. Joint Placement of Phasor and Power Flow Measurements for Observability of Power Systems. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, n. 4, p. 1929–1936, 2011. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5756472>>. .

KETABI, A.; NOSRATABADI, S. M.; SHEIBANI, M. R. Optimal PMU Placement Based on Mean Square Error Using Differential Evolution Algorithm. **Power Quality Conference (PQC)**, p. 1–6, 2010.

- KORRES, G. N.; CONTAXIS, G. C. A reduced model for bad data processing in state estimation. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 550–557, 1991.
- KORRES, G. N.; CONTAXIS, G. C. A tool for the evaluation and selection of state estimator measurement schemes. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 2, p. 1110–1116, 1994.
- KORRES, G. N.; MANOUSAKIS, N. M. State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements. **Electric Power Systems Research**, v. 81, n. 7, p. 1514–1524, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779611000769>>. .
- KOUTSOUKIS, N. C.; MANOUSAKIS, N. M.; GEORGILAKIS, P. S.; KORRES, G. N. Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive Tabu search method. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, n. 4, p. 347–356, 2013. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-gtd.2012.0377>>. Acesso em: 31/10/2013.
- KRUMPHOL, G. R.; CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Power system observability: a practical algorithm using network topology. , , n. 4, p. 1534–1542, 1980.
- KRUMPHOLZ, G. R.; CLEMENTS, K. A.; DAVIS, P. W. Power System Observability: A Practical Algorithm Using Network Topology. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-99, n. 4, p. 1534–1542, 1980.
- LONDON, J. B. A.; BRETAS, N. G.; ALBERTO, L. F. C. Analysis of measurement set qualitative characteristics for state estimation purposes. **IET Generation, Transmission & Distribution**, p. 39–45 Vol. 1, 2007.
- LONDON, J. B. A.; PIERETI, S. A. R.; BENEDITO, R. A. S.; BRETAS, N. G. Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 24, n. 3, p. 1629–1630, 2009.
- LONDON JR, J. B. A.; ALBERTO, L. F. C.; BRETAS, N. G. Identificação do nível de redundância das medidas para efeito de estimação de estado em sistema de potência. **Revista Controle & Automação**, v. 12, n. 2, p. 141–147, 2001.
- LONDON JR, J. B. A.; BRITO, G. L. R.; BRETAS, N. G. Método para locação de medidores e UTRs para efeito de estimação de estado. **XIV Congresso Brasileiro de Automática**, p. 629–635, 2002.
- MAGNAGO, F. H.; ABUR, A. A unified approach to robust meter placement against loss of measurements and branch outages. Power Industry Computer Applications, 1999. PICA '99. Proceedings of the 21st 1999 IEEE International Conference. **Anais...** p.3–8, 1999.
- MANOUSAKIS, N. M.; KORRES, G. N.; GEORGILAKIS, P. S. Taxonomy of PMU Placement Methodologies. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 27, n. 2, p. 1070–1077, 2012.
- MICHALEWICZ, Z. **Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs**. New York: Springer-Verlag, 1996.

- MILI, L.; CUTSEM, T. VAN; RIBBENS-PAVELLA, M. Hypothesis Testing Identification: A New Method For Bad Data Analysis In Power System State Estimation. **Power Engineering Review, IEEE**, v. PER-4, n. 11, p. 31–32, 1984.
- MILI, L.; PHANIRAJ, V.; ROUSSEEUW, P. J. Least median of squares estimation in power systems. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 511–523, 1991.
- MONTICELLI, A. **State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach**. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- MORAES, R. M. DE. **Sincrofasores em sistemas de potência: aplicações na estimação de Estado**, 2009. Tese, Universidade Federal Fluminense.
- PHADKE, A. G. Synchronized phasor measurements-a historical overview. **Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES**, v. 1, p. 476–479 vol.1, 2002.
- PHADKE, A. G.; PICKETT, B.; ADAMIAK, M.; et al. Synchronized sampling and phasor measurements for relaying and control. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 1, p. 442–452, 1994.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; KARIMI, K. J. State Estimation with Phasor Measurements. **Power Engineering Review, IEEE**, v. PER-6, n. 2, p. 48, 1986.
- ROCHA, H. R. O.; SOUZA, J. C. S. DE; FILHO, M. B. D. C. Construção de Planos de Medição Robustos para a Estimação de Estado em Sistemas de Potência via Metaheurística Colônia de Formigas. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, p. 4567–4572, 2010a.
- ROCHA, H. R. O.; SOUZA, J. C. S. DE; FILHO, M. B. D. C. Construção de Planos de Medição Robustos para a Estimação de Estado em Sistemas de Potência via Metaheurística Colônia de Formigas. **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**, 2010b. Disponível em: <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/CBA2010/Artigos/65594_1.pdf>. Acesso em: 10/12/2013.
- SCHWEPPE, F. C.; HANDSCHIN, E. J. Static state estimation in electric power systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 62, n. 7, p. 972–982, 1974.
- SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-89, n. 1, p. 120–125, 1970.
- SOUZA, J. C. S. DE; COUTTO FILHO, M. B. DO; SCHILLING, M. T.; CAPDEVILLE, C. DE. Optimal metering systems for monitoring power networks under multiple topological scenarios. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 20, n. 4, p. 1700–1708, 2005.
- TAFUR, J. E. V.; ROCHA, H. R. O.; OCHI, L. S.; et al. Heurística Grasp Aplicada ao Planejamento de Sistemas de Medição para a Supervisão de Redes Elétricas. **VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2007. Disponível em: <<http://fei.edu.br/sbai/SBAI2007/docs%5C60100002.pdf>>. Acesso em: 31/10/2013.

THORP, J. S.; PHADKE, A. G.; KARIMI, K. J. Real Time Voltage-Phasor Measurement For Static State Estimation. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-104, n. 11, p. 3098–3106, 1985.

VIGLIASSI, M. P. **Projeto de sistemas de medição confiáveis para efeito de estimação de estado via algoritmos evolutivos e matriz $H\Delta t$** . (B, Ed., K, Tran.), f., 2009. Dissertação, São Carlos, j: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-04012010-101933/>>. Acesso em: 4/9/2012.

VIGLIASSI, M. P.; E.M., M.; DELBEM, A. C. B.; et al. Metodologia para Projeto de sistemas de medição para efeito de estimação de estado via Algoritmos Evolutivos. **Anais do V Seminário Nacional de Controle e Automação**, p. 6, 2007.

VIGLIASSI, M. P.; LONDON, J. B. A.; DELBEM, A. C. B.; BRETAS, N. G. Metering system planning for state estimation via evolutionary algorithm and $H\Delta t$ matrix. **PowerTech, 2009 IEEE Bucharest**, p. 1–6, 2009.

WANG, J.; CHUANDONG, L.; ZHANG, J. Optimal Phasor Measurement Unit Placement by an Improved PSO Algorithm. **Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific**, p. 1–4, 2012.

XU, B.; ABUR, A. Observability analysis and measurement placement for systems with PMU. Proc. IEEE Power Eng. Soc. Power Systems Conf. Expo. p.10–13, 2004. Nova Iorque.

YEHIA, M.; JABR, R.; EL-BITAR, R.; WAKED, R. A PC based state estimator interfaced with a remote terminal unit placement algorithm. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 16, n. 2, p. 210–215, 2001.

ZHOU, M.; CENTENO, V. A.; THORP, J. S.; PHADKE, A. G. An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 21, n. 4, p. 1930–1937, 2006.

ZHU, J.; ABUR, A. Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation. Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE. **Anais...** p.1–5, 2007.

APÊNDICE A

Apêndice A. Tabelas com Dados e Resultados dos SMs encontrados sem considerar UI

Sistemas de medição convencionais

Sistemas	Medidas Instaladas			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
14 barras	I2	I2	I1	I2
	I6	I6	I3	I4
	F2-1	I7	I6	I5
	F9-14	I9	I7	I6
	F6-13	F2-1	I8	I7
	F7-9	F6-12	I9	I8
	F6-12	F6-11	I13	I9
	F9-10	F9-7	F3-2	I11
	F9-4	F2-5	F1-2	I13
	F6-11	F9-10	F11-10	F2-3
	F7-8	F2-4	F11-6	F5-1
	F2-5	F7-8	F1-5	F9-10
	F2-4	F6-13	F13-12	F6-12
		F2-3	F7-8	F11-6
		F9-14	F9-10	F13-14
		F6-5	F13-14	F8-7
			F3-4	
			F7-4	

A. 1 - Medidas dos sistemas de medição convencionais obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 14 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
30 barras	I9	I2	I2	I1
	I18	I6	I3	I2
	I24	I9	I7	I3
	I25	I10	I8	I5
	F2-6	I12	I9	I6
	F10-20	I18	I10	I8
	F4-6	I23	I12	I9
	F4-3	I25	I13	I10
	F12-16	I27	I15	I11
	F10-21	F10-20	I16	I12
	F30-29	F12-13	I19	I13
	F24-23	F6-28	I22	I15
	F6-28	F25-26	I24	I16
	F18-15	F3-1	I25	I18
	F25-27	F6-8	I27	I19
	F6-7	F6-7	F3-1	I22
	F10-17	F3-4	F15-23	I24
	F12-15	F23-24	F25-27	I25
	F6-8	F12-16	F27-30	I26
	F30-27	F18-15	F10-6	I27
	F10-22	F9-11	F22-21	I29
	F6-9	F2-1	F2-6	F10-20
	F2-1	F27-30	F7-6	F15-14
	F12-13	F12-4	F16-17	F16-17
	F10-6	F2-5	F12-14	F22-21
	F24-25	F25-24	F12-4	F3-1
	F4-12	F10-22	F12-13	F27-30
	F2-5	F10-21	F25-26	F18-19
	F12-14	F12-14	F8-6	F8-6
		F10-17	F9-11	F5-7
		F18-19	F27-29	F25-27
		F27-29	F19-20	F9-11
			F10-9	F15-23
			F3-4	F12-13
			F8-28	F29-27

			F2-5	F26-25
			F10-20	
			F7-5	
			F19-18	
			F26-25	
			F29-30	
			F11-9	

A. 2 - Medidas dos sistemas de medição convencionais obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 30 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas			
	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4
57 barras	I1	I1	I1	I1
	I4	I6	I3	I2
	I9	I9	I5	I4
	I11	I15	I10	I6
	I20	I19	I11	I9
	I22	I21	I12	I11
	I27	I24	I18	I12
	I29	I29	I20	I15
	I36	I30	I22	I19
	I38	I32	I24	I20
	I50	I36	I27	I22
	I53	I38	I29	I24
	I56	I39	I30	I26
	I57	I40	I32	I28
	F47-48	I41	I35	I29
	F15-45	I46	I38	I30
	F27-28	I51	I39	I31
	F4-3	I53	I40	I32
	F9-12	F6-5	I41	I33
	F20-21	F32-33	I45	I35
	F32-31	F30-25	I46	I36
	F30-25	F27-28	I48	I38
	F22-38	F6-4	I50	I39
	F38-44	F9-10	I53	I41
	F57-39	F32-31	I55	I45
	F9-13	F38-37	I56	I46
	F11-41	F15-14	F20-19	I47
	F1-15	F24-25	F11-41	I50
	F36-37	F29-52	F22-23	I51
	F38-37	F41-56	F3-2	I53
	F50-49	F6-8	F1-15	I54
	F9-8	F9-11	F30-31	I56
	F24-25	F21-20	F45-15	I57
	F32-34	F32-34	F48-49	F11-13
	F24-26	F15-45	F35-36	F9-13

	F15-13	F41-42	F8-6	F22-21
	F30-31	F53-54	F29-7	F2-3
	F15-14	F9-13	F12-16	F1-16
	F56-42	F51-50	F24-26	F24-23
	F1-16	F27-26	F40-26	F9-8
	F15-3	F38-48	F39-57	F50-49
	F36-40	F46-14	F56-40	F12-17
	F47-46	F19-20	F55-54	F15-3
	F4-5	F36-35	F32-31	F4-5
	F11-43	F53-52	F5-4	F19-18
	F24-23	F21-22	F24-25	F4-18
	F22-23	F39-37	F8-7	F35-34
	F56-41	F30-31	F48-49	F11-43
	F29-7	F38-22	F11-13	F28-27
	F9-55	F1-2	F3-15	F30-52
	F1-17	F41-43	F1-16	F53-52
	F53-52	F40-26	F12-13	F46-17
	F38-49	F1-16	F56-42	F56-42
	F32-33	F38-49	F5-6	F26-27
	F29-52	F15-3	F46-47	F1-17
	F4-6	F24-23	F50-51	F29-52
		F46-47	F11-43	F38-44
		F1-17	F50-49	F54-55
		F9-55	F45-44	F45-44
		F9-12	F29-28	F38-48
		F29-7	F35-34	F20-21
		F15-13	F39-37	F57-39
		F36-37	F48-47	F47-46
		F38-44	F12-10	F6-5
		F51-10	F8-9	F36-40
		F24-26	F22-38	F32-33
		F39-57	F30-25	F32-34
		F19-18	F27-26	F51-10
			F32-34	F6-7
			F53-54	
			F32-33	

			F56-57	
			F55-9	
			F18-4	
			F12-17	
			F27-28	
			F46-14	
			F20-21	
			F53-52	
			F33-32	

A. 3 - Medidas dos sistemas de medição convencionais obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 57 barras).

Sistemas de medição fasoriais sincronizadas

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
14 barras	PMUb2	PMUb2	PMUb1	PMUb1	PMUr1-2	PMUb1
	PMUr8-7	PMUb6	PMUb3	PMUb3	PMUb3	PMUr3-10
	PMUb10	PMUb9	PMUb6	PMUb6	PMUb5	PMUb4
	PMUb13		PMUr8-7	PMUb8	PMUb7	PMUb6
			PMUb9	PMUr10-11	PMUr8-7	PMUb8
			PMUr11-10	PMUr13-12	PMUb10	PMUr10-9
			PMUb13	PMUr14-9	PMUr11-6	PMUr11-10
					PMUr12-6	PMUr12-13
					PMUr13-12	PMUb14
					PMU14b	

A. 4 - Medidas dos sistemas de medição fasoriais sincronizados obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 14 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
30 barras	PMUb1	PMUr1-3	PMUb2	PMUr1-2	PMUr1-2	PMUr1-2
	PMUr7-5	PMUr5-7	PMUb3	PMUr3-4	PMUb3	PMUb3
	PMUb10	PMUb10	PMUr7-5	PMUb10	PMUr4-2	PMUb5
	PMUb11	PMUb12	PMUr8-28	PMUr13-12	PMUb5	PMUb6
	PMUb12	PMUr18-19	PMUb10	PMUr14-15	PMUr7-6	PMUr11-9
	PMUr18-9	PMUr23-24	PMUr11-9	PMUb16	PMUb8	PMUr12-13
	PMUr23-24	PMUb27	PMUr13-12	PMUr18-15	PMUb9	PMUr13-12
	PMUb26		PMUr14-15	PMUr19-20	PMUr11-9	PMUb14
	PMUr28-8		PMUb15	PMUr21-22	PMUr12-13	PMUr16-17
	PMUb29		PMUr16-17;	PMUr23-24	PMUr13-12	PMUb17
			PMUb19	PMUr25-26	PMUb14	PMUb18
			PMUr21-22	PMUb27	PMUb16	PMUr19-20
			PMUb24	PMUr29-30	PMUr17-10	PMUb20
			PMUb26		PMUr18-15	PMUr21-10
			PMUb27		PMUr19-18	PMUr22-21
			PMUr30-29		PMUb20	PMUr23-15
					PMUb21	PMUb24
					PMUr22-24	PMUb26
					PMUb23	PMUr29-30
					PMUb25	PMUb30
					PMUb26	
					PMUr28-6	
					PMUb29	
					PMUr30-27	

A. 5 - Medidas dos sistemas de medição fasoriais sincronizados obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 30 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
57 barras	PMUb1	PMUb1	PMUr2-3	PMUr2-3	PMUr2-1	PMUb2
	PMUb4	PMUb3	PMUb4	PMUb6	PMUb3	PMUr5-4
	PMUb9	PMUb9	PMUb6	PMUr10-51	PMUb5	PMUb7
	PMUb20	PMUb19	PMUb9	PMUb14	PMUb7	PMUb9
	PMUb23	PMUb25	PMUr12-13	PMUb16	PMUb8	PMUr10-51
	PMU25-30	PMUb29	PMUb14	PMUb17	PMUb10	PMUb15
	PMUb27	PMUb32	PMUr16-1	PMUb19	PMUb11	PMUb16
	PMUr29-7	PMUb38	PMUr17-1	PMUr25-24	PMUb14	PMUb17
	PMUb32	PMUb42	PMUb19	PMUr28-27	PMUb16	PMUr18-4
	PMUb36	PMUr51-50	PMUb21	PMUr30-31	PMUb17	PMUb19
	PMUr39-57	PMUr54-53	PMUb23	PMUb32	PMUr18-4	PMUb21
	PMUb41		PMUb25	PMUb33	PMUr19-18	PMUr23-24
	PMUb45		PMUb27	PMUb38	PMUr20-19	PMUr25-30
	PMUb47		PMUb29	PMUb41	PMUb21	PMUr26-27
	PMUr49-38		PMUb33	PMUr45-44	PMUb23	PMUb28
	PMUr50-51		PMUb31	PMUb50	PMUb25	PMUr30-31
	PMUb53		PMUr34-35	PMUb52	PMUr26-24	PMUr31-30
			PMUb36	PMUr54-53	PMUr27-26	PMUr32-33
			PMUb39	PMUr55-9	PMUb28	PMUb33
			PMUr40-26	PMUb56	PMUr30-31	PMUr34-35
			PMUb42		PMUr31-32	PMUr39-57
			PMUb43		PMUr32-33	PMUr42-41
			PMUr44-38		PMUr33-32	PMUr43-11
			PMUr45-15		PMUr34-32	PMUr44-45
			PMUb47		PMUr35-34	PMUb46
			PMUb49		PMUb36	PMUr48-49
			PMUb51		PMUb38	PMUr50-49
			PMUr52-53		PMUb39	PMUr51-50
			PMUb54		PMUb40	PMUr52-53
			PMUr57-56		PMUb42	PMUr53-52
					PMUr43-41	PMUr54-53
					PMUr44-45	PMUr55-54
					PMUr45-15	PMUb56
					PMUr46-47	
					PMUb47	

				PMUb49	
				PMUr50-49	
				PMUr51-10	
				PMUb52	
				PMUr53-54	
				PMUr54-55	
				PMUr55-9	
				PMUr57-56	

A. 6 - Medidas dos sistemas de medição fasoriais sincronizados obtidos pelo AERS+ sem considerar UIs das medidas (sistema de 57 barras).

Sistemas de medição híbridos

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
14 barras	PMUb2	PMUb4	PMUb2	PMUr3-2	PMUb1	PMUr1-2
	PMUb7	PMUb13	PMUb4	PMUb5	PMUb3	PMUr3-2
	PMUb13		PMUb8	PMUb8	PMUr4-2	PMUb4
			PMUb11	PMUr11-10	PMUb6	PMUb6
			PMUr12-13	PMUr12-13	PMUb7	PMUr8-7
			PMUr14-13	PMUr14-13	PMUb8	PMUr10-11
					PMUr10-11	PMUr12-13
					PMUr12-13	PMUb14
					PMUb14	

A. 7 - Medidas fasoriais sincronizadas instaladas pelo AERS+ para fortalecimento dos sistemas de medição sem considerar UIs das medidas (sistema de 14 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
30 barras	PMUb6	PMUr5-2	PMUb2	PMUb2	PMUr1	PMUb1
	PMUb10	PMUb10	PMUr7-5	PMUb10	PMUr5	PMUr5-7
	PMUb12	PMUb12	PMUr8-28	PMUb13	PMUr6	PMUb6
	PMUb27	PMUb30	PMUb10	PMUr14-12	PMUr8-28	PMUr12-13
			PMUr11-9	PMUr16-17	PMUr10	PMUr13-12
			PMUr13-12	PMUr20-19	PMUr11-9	PMUb14
			PMUr14-12	PMUr22-21	PMUr12	PMUb16
			PMUr16-17	PMUb27	PMUr13-12	PMUr17-10
			PMUr20-19	PMUr30-29	PMUr14-12	PMUb19
			PMUr22-21		PMUr16-17	PMUr20-19
			PMUb25		PMUr17-16	PMUr21-22
			PMUb27		PMUr18-19	PMUr22-21
			PMUr29-30		PMUr20-19	PMUb24
					PMUr21-22	PMUb26
					PMUr24	PMUb29
					PMUr26-25	PMUr30-27
					PMUr27	
					PMUr29-27	
					PMUr30-29	

A. 8 - Medidas fasoriais sincronizadas instaladas pelo AERS+ para fortalecimento dos sistemas de medição sem considerar UIs das medidas (sistema de 30 barras).

Sistemas	Medidas Instaladas					
	Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0	Sem Inj. 0	Com Inj. 0
57 barras	PMUb2	PMUb1	PMUb1	PMUr1-16	PMUb2	PMUr2-1
	PMUb6	PMUb4	PMUb2	PMUr2-3	PMUb4	PMUb3
	PMUb12	PMUb9	PMUb4	PMUb6	PMUr5-4	PMUr5-6
	PMUr19-20	PMUb25	PMUb7	PMUb12	PMUb7	PMUr8-7
	PMUb24	PMUb33	PMUb9	PMUr19-20	PMUr8-6	PMUb10
	PMUr28-27	PMUr42-41	PMUb12	PMUr28-27	PMUb10	PMUr13-11
	PMUb32	PMUr49-50	PMUb20	PMUb30	PMUb13	PMUb16
	PMUb37	PMUb52	PMUr23-24	PMUr33-32	PMUb15	PMUb17
	PMUb41		PMUb25	PMUb38	PMUb16	PMUb18
	PMUr45-44		PMUb27	PMUb42	PMUb17	PMUr20-19
	PMUr47-46		PMUb32	PMUr43-11	PMUr19-18	PMUb24
	PMUr50-49		PMUr33-32	PMUr47-46	PMUb20	PMUr27-28
	PMUr53-52		PMUb36	PMUb51	PMUr21-20	PMUb29
	PMUr55-9		PMUb38	PMUr52-53	PMUb23	PMUb30
			PMUb42	PMUb55	PMUb25	PMUb32
			PMUb43		PMUr26-27	PMUr33-32
			PMUr45-44		PMUr27-26	PMUr42-41
			PMUb46		PMUr28-27	PMUr43-11
			PMUb50		PMUr31-30	PMUr44-45
			PMUb52		PMUb32	PMUr46-14
			PMUr54-55		PMUr33-32	PMUr49-48
			PMUr57-39		PMUb35	PMUb50
					PMUb37	PMUr52-53
					PMUr40-36	PMUr54-53
					PMUb41	PMUb55
					PMUr42-56	PMUb56
					PMUr43-11	
					PMUb44	
					PMUb46	
					PMUb48	
					PMUb50	
					PMUb52	
					PMUr54-53	
					PMUb55	
					PMUb57	

A. 9 - Medidas fasoriais sincronizadas instaladas pelo AERS+ para fortalecimento dos sistemas de medição sem considerar UIs das medidas (sistema de 57 barras).

APÊNDICE B

Apêndice B. Tabelas com Dados e Resultados dos SMs encontrados considerando o UI das medidas

Metodologia Proposta AERS+ desconsiderando o UI – IEEE 14 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
IA: 2	15,4019	IR: 2	17,2305		
IA: 4	11,3695	IR: 4	11,8529		
IA: 5	6,9767	IR: 5	7,1170		
IA: 6	3,2050	IR: 6	3,1275		
IA: 7	-----	IR: 7	-----		
IA: 8	-----	IR: 8	1,0000		
IA: 9	22,1631	IR: 9	22,7417		
IA: 11	6,2886	IR: 11	6,0152		
IA: 13	5,0362	IR: 13	5,0513		
FA: 2-3	6,1533	FR: 2-3	2,7430		
FA: 5-1	2,3744	FR: 5-1	6,7482		
FA: 6-12	1,8856	FR: 6-12	1,2276		
FA: 8-7	-----	FR: 8-7	1,7825		
FA: 9-10	8,8238	FR: 9-10	1,0000		
FA: 11-6	1,2651	FR: 11-6	8,7729		
FA: 13-14	7,1568	FR: 13-14	7,2419		
Medidas de Injeção		Medidas de Fluxo		UTRs	Custos
9		7		9	972 UM

B. 10 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado pelo AERS+ desconsiderando o UIs das medidas (sistema de 14 barras).

Metodologia Proposta AERS+ considerando o UI – IEEE 14 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
FA:1-5	1,0503	FR:1-5	1,0386	V:1	0,9522
FA:5-1	0,9096	FR:5-1	1,0351	V:2	0,9742
FA:2-3	1,0465	FR:2-3	1,0710		
FA:3-2	0,9213	FR:3-2	1,0082		
FA:2-4	1,0537	FR:2-4	1,0231		
FA:4-2	0,9330	FR:4-2	1,0089		
FA:2-5	1,0393	FR:2-5	1,0067		
FA:5-2	0,9523	FR:5-2	0,9958		
FA:4-7	0,9972	FR:4-7	0,9673		
FA:7-4	0,9972	FR:7-4	1,0409		
FA:4-9	0,9935	FR:4-9	1,0029		
FA:9-4	0,9935	FR:9-4	1,0109		
FA:6-11	1,0123	FR:6-11	1,0128		
FA:11-6	0,9875	FR:11-6	0,9877		
FA:6-12	1,0166	FR:6-12	1,0111		
FA:12-6	0,9830	FR:12-6	0,9896		
FA:7-8	-----	FR:7-8	0,9491		
FA:8-7	-----	FR:8-7	1,0537		
FA:9-14	1,0216	FR:9-14	1,0186		
FA:14-9	0,9779	FR:14-9	0,9828		
FA:10-11	0,9943	FR:10-11	0,9945		
FA:11-10	1,0056	FR:11-10	1,0056		
FA:12-13	1,0064	FR:12-13	1,0027		
FA:13-12	0,9936	FR:13-12	0,9973		
FA:13-14	1,0174	FR:13-14	1,0106		
FA:14-13	0,9823	FR:14-13	0,9901		
Medidas de Injeção		Medidas de Fluxo		UTRs	
0		26		14	
				1526 UM	

B. 11 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado pelo AERS+ considerando o UIs das medidas (sistema de 14 barras).

BENEDITO, 2011 – IEEE 14 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
IA:1	0,395	IR:1	0,8727	V:1	0,1666
IA:3	0,4835	IR:3	1,7276	V:2	0,1699
IA:7	-----	IR:7	-----	V:4	0,1722
IA:8	-----	IR:8	0,4715	V:5	0,1718
IA:9	1,5469	IR:9	1,4409	V:6	0,1788
IA:10	0,6476	IR:10	0,7424		
IA:13	0,958	IR:13	0,8739		
FA:1-2	0,4848	FR:1-2	0,513		
FA:2-1	0,4692	FR:2-1	0,7701		
FA:1-5	0,2915	FR:1-5	1,1586		
FA:2-4	0,375	FR:2-4	1,9125		
FA:2-5	0,4801	FR:2-5	1,8022		
FA:5-2	0,4738	FR:5-2	1,7931		
FA:4-3	1,9962	FR:4-3	0,841		
FA:4-5	0,8824	FR:4-5	0,5079		
FA:5-4	0,8949	FR:5-4	0,5102		
FA:4-7	0,4204	FR:4-7	0,9967		
FA:5-6	0,7261	FR:5-6	0,7954		
FA:6-5	0,7261	FR:6-5	1,5527		
FA:6-13	0,628	FR:6-13	0,6306		
FA:13-6	0,6199	FR:13-6	0,6679		
FA:7-8	-----	FR:7-8	0,4565		
FA:8-7	-----	FR:8-7	0,4712		
FA:7-9	0,4203	FR:7-9	0,79		
FA:9-7	0,4203	FR:9-7	0,979		
FA:10-9	1,7789	FR:10-9	1,3778		
FA:10-11	0,9342	FR:10-11	0,9708		
FA:11-10	0,9442	FR:11-10	0,9815		
FA:12-13	1,0027	FR:12-13	0,9848		
FA:13-12	0,99	FR:13-12	1,0061		
FA:13-14	0,9565	FR:13-14	0,9294		
FA:14-13	0,9255	FR:14-13	1,0282		
Medidas de Injeção		Medidas de Fluxo		UTRs	
7		25		14	
				Custos	
				1566,5 UM	

B. 12 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado por BENEDITO, 2011 (sistema de 14 barras).

Metodologia Proposta AERS+ desconsiderando o UI – IEEE 30 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
IA:1	2,8563	IA:1	3,0624		
IA:2	4,4719	IA:2	4,6649		
IA:3	12,8677	IA:3	13,0689		
IA:5	3,1744	IA:5	3,4407		
IA:6	-----	IA:6	-----		
IA:8	5,3638	IA:8	5,5496		
IA:9	-----	IA:9	-----		
IA:10	17,0937	IA:10	16,8206		
IA:11	-----	IA:11	1,1633		
IA:12	9,3849	IA:12	8,9869		
IA:13	-----	IA:13	1,0196		
IA:15	3,8659	IA:15	3,8212		
IA:16	5,8192	IA:16	5,5369		
IA:18	1,9125	IA:18	1,9164		
IA:19	12,1035	IA:19	11,8452		
IA:22	-----	IA:22	-----		
IA:24	7,2318	IA:24	6,9175		
IA:25	-----	IA:25	-----		
IA:26	0,9491	IA:26	0,9422		
IA:27	-----	IA:27	-----		
IA:29	2,3243	IA:29	2,3056		
FA:3-1	0,8222	FR:3-1	1,0225		
FA:5-7	2,7483	FR:5-7	2,9508		
FA:8-6	3,9311	FR:8-6	4,0749		
FA:9-11	-----	FR:9-11	0,8584		
FA:10-20	3,1617	FR:10-20	3,1062		
FA:12-13	-----	FR:12-13	0,9691		
FA:15-14	2,5990	FR:15-14	2,5971		
FA:15-23	3,4759	FR:15-23	3,3709		
FA:16-17	3,4395	FR:16-17	3,2907		
FA:18-19	1,0630	FR:18-19	1,0544		
FA:22-21	5,7503	FR:22-21	5,6350		
FA:26-25	0,9491	FR:26-25	0,9422		
FA:25-27	1,1957	FR:25-27	1,1782		
FA:29-27	0,7994	FR:29-27	0,8123		
FA:27-30	1,4443	FR:27-30	1,4509		
Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo		UTRs	Custos	

7	25	14	1566,5 UM
---	----	----	-----------

B. 13 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado pelo AERS+ desconsiderando o UIs das medidas (sistema de 14 barras).

Metodologia Proposta AERS+ considerando o UI – IEEE 30 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
IA:9	-----	IR:9	-----		
IA:13	0,7071	IR:13	0,7162		
IA:26	0,7007	IR:26	0,7008		
FA:1-2	0,9981	FR:1-2	1,2373		
FA:2-1	0,9075	FR:2-1	1,2217		
FA:1-3	0,6273	FR:1-3	0,6839		
FA:3-1	0,5886	FR:3-1	0,7861		
FA:2-4	0,5729	FR:2-4	0,5543		
FA:4-2	0,5414	FR:4-2	0,5914		
FA:2-5	0,6523	FR:2-5	0,8295		
FA:5-2	0,5916	FR:5-2	0,7264		
FA:2-6	0,6663	FR:2-6	0,7721		
FA:6-2	0,6087	FR:6-2	0,6739		
FA:3-4	0,9942	FR:3-4	0,9749		
FA:4-3	0,9556	FR:4-3	0,9869		
FA:4-12	0,7879	FR:4-12	0,8413		
FA:12-4	0,7879	FR:12-4	0,8625		
FA:5-7	0,8422	FR:5-7	0,8609		
FA:7-5	0,8611	FR:7-5	0,8145		
FA:6-7	0,9394	FR:6-7	0,9214		
FA:7-6	0,9062	FR:7-6	0,9339		
FA:6-8	1,0036	FR:6-8	0,9927		
FA:8-6	0,9897	FR:8-6	1,0039		
FA:6-9	0,6546	FR:6-9	0,7072		
FA:9-6	0,6546	FR:9-6	0,7083		
FA:6-10	0,3368	FR:6-10	0,3525		
FA:8-28	0,9267	FR:8-28	0,9633		
FA:28-8	0,9279	FR:28-8	0,9264		
FA:9-11	-----	FR:9-11	0,9099		
FA:11-9	-----	FR:11-9	1,0199		
FA:10-20	0,8615	FR:10-20	0,8591		
FA:20-10	0,8384	FR:20-10	0,8377		
FA:10-17	0,9683	FR:10-17	0,9729		
FA:17-10	0,9624	FR:17-10	0,9598		
FA:10-21	0,8290	FR:10-21	0,8318		
FA:21-10	0,8150	FR:21-10	0,8127		
FA:10-22	0,3475	FR:10-22	0,3480		
FA:22-10	0,3435	FR:22-10	0,3430		

FA:12-13	-----	FR:12-13	0,6890		
FA:13-12	-----	FR:13-12	0,7162		
FA:12-14	0,7997	FR:12-14	0,7951		
FA:14-12	0,7774	FR:14-12	0,7820		
FA:12-16	0,8217	FR:12-16	0,8243		
FA:16-12	0,8052	FR:16-12	0,8088		
FA:14-15	0,7727	FR:14-15	0,7629		
FA:15-14	0,7648	FR:15-14	0,7601		
FA:15-18	0,8388	FR:15-18	0,8330		
FA:18-15	0,8220	FR:18-15	0,8242		
FA:15-23	0,9390	FR:15-23	0,9359		
FA:23-15	0,9227	FR:23-15	0,9172		
FA:16-17	0,8410	FR:16-17	0,8520		
FA:17-16	0,8359	FR:17-16	0,8448		
FA:18-19	0,9400	FR:18-19	0,9371		
FA:19-18	0,9341	FR:19-18	0,9345		
FA:19-20	0,9780	FR:19-20	0,9783		
FA:20-19	0,9863	FR:20-19	0,9853		
FA:21-22	0,9800	FR:21-22	0,9798		
FA:22-21	0,9807	FR:22-21	0,9810		
FA:23-24	0,8816	FR:23-24	0,8755		
FA:24-23	0,8745	FR:24-23	0,8659		
FA:24-25	0,8062	FR:24-25	0,8073		
FA:25-24	0,8118	FR:25-24	0,7909		
FA:25-26	0,7197	FR:25-26	0,7200		
FA:26-25	0,7007	FR:26-25	0,7008		
FA:25-27	0,9127	FR:25-27	0,9183		
FA:27-25	0,9299	FR:27-25	0,9213		
FA:27-29	0,8073	FR:27-29	0,8022		
FA:29-27	0,7733	FR:29-27	0,7849		
FA:27-30	0,6027	FR:27-30	0,5944		
FA:30-27	0,5676	FR:30-27	0,5790		
FA:28-27	0,7897	FR:28-27	0,8208		
FA:27-28	0,7897	FR:27-28	0,7722		
FA:29-30	0,7603	FR:29-30	0,7505		
FA:30-29	0,7394	FR:30-29	0,7440		
Medidas de Injeção		Medidas de Fluxo		UTRs	
3		71		30	
				3333 UM	

B. 14 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado pelo AERS+ considerando o UIs das medidas (sistema de 30 barras).

BENEDITO, 2011 – IEEE 30 barras					
Medidas de Potência Ativa		Medidas de Potência Reativa		Medidas de Magnitude de Tensão	
Medidas	UI	Medidas	UI	Medidas	UI
IA:1	0,4029	IR:1	0,9311	V:1	0,116
IA:5	0,3645	IR:5	0,9454	V:3	0,1149
IA:6	-----	IR:6	-----	V:5	0,116
IA:7	1,2107	IR:7	0,4716	V:7	0,1171
IA:8	0,7281	IR:8	1,0499	V:13	0,1165
IA:9	-----	IR:9	-----	V:21	0,1199
IA:11	-----	IR:11	0,5284	V:26	0,124
IA:13	-----	IR:13	0,7162		
IA:14	0,9537	IR:14	1,4018		
IA:17	1,1095	IR:17	0,6936		
IA:19	1,051	IR:19	1,2244		
IA:21	0,6675	IR:21	0,5241		
IA:22	-----	IR22:	-----		
IA:24	0,9358	IR:24	0,793		
IA:25	-----	IR:25	-----		
IA:26	0,8434	IR:26	0,8381		
IA:27	-----	IR:27	-----		
IA:28	-----	IR:28	-----		
FA:1-2	0,4926	FR:1-2	0,3635		
FA:2-1	0,4607	FR:2-1	0,5782		
FA:1-3	0,3404	FR:1-3	1,3752		
FA:3-1	0,3251	FR:3-1	2,1755		
FA:2-4	0,5792	FR:2-4	0,8971		
FA:2-5	0,2849	FR:2-5	1,9054		
FA:2-6	0,4467	FR:2-6	0,8355		
FA:3-4	0,8403	FR:3-4	2,032		
FA:4-3	0,8117	FR:4-3	0,6699		
FA:4-6	0,4743	FR:4-6	0,5777		
FA:4-12	0,3451	FR:4-12	0,6696		
FA:5-7	1,3783	FR:5-7	0,429		
FA:6-7	0,4178	FR:6-7	0,9434		
FA:7-6	0,4086	FR:7-6	1,0417		
FA:6-8	0,6009	FR:6-8	0,7457		
FA:6-9	0,3782	FR:6-9	0,6578		
FA:6-10	0,3715	FR:6-10	0,5968		
FA:6-28	0,4065	FR:6-28	0,9426		
FA:8-28	0,8517	FR:8-28	0,3708		
FA:9-11	-----	FR:9-11	0,4911		

FA:11-9	-----	FR:11-9	0,5284		
FA:9-10	0,3905	FR:9-10	1,0168		
FA:10-20	1,5213	FR:10-20	1,751		
FA:10-17	1,0472	FR:10-17	1,8909		
FA:10-21	0,5154	FR:10-21	0,3761		
FA:10-22	0,4869	FR:10-22	0,8691		
FA:12-13	-----	FR:12-13	0,689		
FA:13-12	-----	FR:13-12	0,7162		
FA:12-14	0,6334	FR:12-14	0,6764		
FA:12-15	0,757	FR:12-15	0,9986		
FA:12-16	1,5145	FR:12-16	1,9083		
FA:14-15	1,1871	FR:14-15	0,6612		
FA:15-18	1,3749	FR:15-18	1,5972		
FA:15-23	1,4948	FR:15-23	2,0574		
FA:16-17	2,0773	FR:16-17	1,4774		
FA:18-19	0,9253	FR:18-19	0,7744		
FA:19-18	0,9196	FR:19-18	0,7726		
FA:19-20	1,0307	FR:19-20	1,1583		
FA:21-22	1,4845	FR:21-22	1,2628		
FA:22-24	0,58	FR:22-24	0,9458		
FA:23-24	1,5292	FR:23-24	1,0715		
FA:24-25	1,0819	FR:24-25	0,9423		
FA:25-26	0,8696	FR:25-26	0,8636		
FA:25-27	1,187	FR:25-27	0,9232		
FA:27-29	0,665	FR:27-29	0,9749		
FA:27-30	0,444	FR:27-30	0,654		
FA:28-27	0,42	FR:28-27	0,4386		
FA:29-30	0,9682	FR:29-30	0,8468		
FA:30-29	0,9358	FR:30-29	0,8398		
Medidas de Injeção	Medidas de Fluxo	UTRs		Custos	
18	49	29		3233 UM	

B. 15 - Medidas e seus respectivos valores de UI do sistema de medição convencional encontrado por BENEDITO, 2011 (sistema de 30 barras).