BRENO CRESPO ZEBA

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL EM REDES ELÉTRICAS PARA A DEPURAÇÃO DE ERROS NOS DADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA.

Orientadores: Prof. Julio Cesar Stacchini de Souza Prof. Milton Brown Do Coutto Filho

> Niterói 2018

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

Z41 Zeba, Breno Crespo Alocação otimizada de unidades de medição fasorial em redes elétricas para a depuração de erros nos dados / Breno Crespo Zeba. – Niterói, RJ : [s.n.], 2018. 78 f. Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, 2018. Orientadores: Julio Cesar Stacchini de Souza, Milton Brown Do Coutto Filho. 1. Estimação de estado (Energia elétrica). 2. Sistema elétrico de potência. 3. Medição fasorial. 4. Otimização. I. Título. CDD 621.3191

BRENO CRESPO ZEBA

ALOCAÇÃO OTIMIZADA DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL EM REDES ELÉTRICAS PARA A DEPURAÇÃO DE ERROS NOS DADOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA.

Aprovada em 6 de Março de 2018.

BANCA EXAMINADORA
AirAn
Prof Julio Cesar Stacchini de Souza D. Sc. Orientador
Universidade Federal Fluminense
Milton Fron Ohn
Prof. Milton Brown Do Coutto Filho, D. Sc Orientador
Universidade Federal Fluminense
Prof. José Viterbo Filho D. Sc.
Universidade Federal Fluminense
Ad Do C
- elano prove more funally
Prof. Marcio Andre Ribeiro Guimaraens, D.Sc.
Universidade Federal Fluminense
- Couraile

Profa. Marley Maria Bernardes Rebuzzo Vellasco, Ph. D. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro

> Niterói 2018

RESUMO

A Estimação de Estado (EE) é responsável por processar medidas usualmente obtidas de subestações equipadas com unidades de medição remotas. A EE com base no método dos mínimos quadrados ponderados tornou-se uma função bem estabelecida em centros de operação de sistemas. Por meio do processamento e depuração de medidas convencionais (ex: magnitudes de tensão, fluxos e injeções de potência), providas por Unidades Terminais Remotas (UTRs), a EE leva em consideração imprecisões e erros, inerentes a qualquer sistema de medição, de modo a estimar o estado de operação mais provável do sistema. Diversos tópicos relacionados à EE têm sido intensamente estudados para melhorar a confiabilidade dos resultados do processo de estimação. Mesmo com tais esforços, a EE pode ser considerada uma função em construção.

Diversas questões relacionadas a avanços no processo de estimação são tópicos de pesquisa atuais, dentre estes, o uso de todos os dados disponíveis para processamento aparece de forma recorrente. Recentemente, medidas de Unidades de Medição Fasorial (UMFs) têm sido apontadas como um importante complemento àquelas provenientes de UTRs. Muitos esforços vêm sendo dedicados à alocação de UMFs de forma a se ter completa observabilidade da rede. Entretanto, não é razoável imaginar que uma quantidade suficiente de UMFs para observação de toda a rede estará disponível em um futuro próximo. Além disso, o emprego de medidas de UMFs para melhorar a capacidade de depuração de erros grosseiros (EGs) nos dados pela EE se apresenta como muito mais importante, uma vez que a observabilidade da rede já é geralmente proporcionada pelas medidas convencionais disponíveis na rede. Recentemente, a EE contando com o auxílio de sincrofasores (PHASE – sigla em inglês para *phasor aided-state estimation*) mostrou-se efetiva para a depuração de EGs, em medidas convencionais, caso tais medidas estejam localizadas em partes da rede também supervisionadas por medidas de UMFs.

Este trabalho propõe um método que emprega uma meta-heurística para a alocação estratégica de UMFs, de modo a melhorar a capacidade de tratamento de EGs nos dados processados pela função EE. Considera-se que uma quantidade limitada de UMFs estejam disponíveis, devendo ser alocadas de modo a supervisionar regiões da rede que contenham o maior número possível de medidas de UTRs. A possibilidade de ocorrência de reconfigurações da rede também é considerada na alocação ótima das UMFs. Resultados de simulações obtidos com sistemas-teste do IEEE são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: alocação de medição, depuração de dados, estimação de estado, otimização.

ABSTRACT

State estimation (SE) provides the most likely estimate of the system operating state, for a given network configuration. SE processes the available data commonly obtained at the substations equipped with remote terminal units (RTUs). Centralized single-scan weighted least squares estimation has become a well-established application program of energy management systems. Processing and debugging available conventional measurements (e.g., voltage magnitude, power flows and injections), SE considers inaccuracies and bad data (BD), inherent to any metering system, to acquire the most likely operating state of the system. Several topics related to SE have been intensively studied, so as to improve the reliability of the estimation process results. Regardless, SE can still be considered a function under construction.

Many issues involving marked improvements in the estimation process are in the research agenda of the field. Among them, the use of all data available for processing has been pointed out recurrently. Recently, the measurements of Phasor Measurement Units (PMUs) have been indicated as an important complement to those obtained by RTUs. Many efforts have been devoted to PMU placement to attain full network observability. However, it is not likely that plenty of PMUs to guarantee system observability will be available in the near feature. Besides, using PMU data to enhance SE data debugging capability is far more important, as the system observability is in general already assured by conventional measurements available in current metering plans. Recently, a phasor-aided state estimation (PHASE) approach has shown its effectiveness in debugging BD in conventional measurements, provided that they are located in a region of the system already supervised by PMUs.

This Dissertation proposes a method that employs a metaheuristic to strategically place PMUs, in view of enhancing SE capability to deal with BD. It is considered that a limited number of PMUs are available and that they should be placed aiming to supervise system regions that contains as many conventional measurements as possible. The possibility of network reconfigurations during system operation is also taken into account when optimally placing the PMUs. Simulation results obtained using IEEE benchmark systems are presented and discussed.

Keywords: meter placement, data debugging, state estimation, optimization.

LISTA DE SIGLAS

- Cconj Conjunto Crítico
- Cmed(s) Medida(s) Crítica(s)
- EE Estimação de Estado
- EGs Erros Grosseiros
- FASE Forecast-aided State Estimation
- IEDs inteligent electronic devices
- IEEE -- Institute of Electrical and Electronics Engineers
- ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PHASE Phasor-aided State Estimation
- $P_i Injeção$ de potência na barra i
- P_{i-j} Fluxo de potência entre a barra i e j
- SCADA Supervisory Control and Data Acquisition
- UMF Unidade de Medição Fasorial
- UTR Unidade Terminal Remota

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1: Matriz Jacobiano Ha	14
Figura 3.3.1: Diagrama de blocos PHASE	19
Figura 3.2: Vetor de alocação e Matriz de Conectividade	20
Figura 4.1 - Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 14	24
Figura 4.2 - Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 9	27
Figura 4.3 - Sistema IEEE 14 barras, sem o ramo 2-4,	
Figura 4.4 - Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 14; conju	ntos críticos
assinalados com linhas tracejadas	
Figura 4.5 - Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 9; conjun	ntos críticos
assinalados com linhas tracejadas	
Figura 4.6 – Operador de cruzamento empregado no AE	
Figura 4.7 – Operador de mutação empregado no AE	
Figura 4.8 – Busca local aplicada ao indivíduo elite no AE	
Figura 5.1: Sistema IEEE 14 barras	44
Figura 5.2 – IEEE 14 barras: 1 UMF alocado na barra 2	46
Figura 5.3 – IEEE 14 barras: 2 UMFs alocados nas barras 6 e 9	46
Figura 5.4 – IEEE 14 barras: 3 UMFs alocados nas barras 2, 6 e 9	47
Figura 5.5 – IEEE 14 barras: abordagem sem (esq.) e com (dir.) criticalidade co	om 2 UMFs
disponíveis para alocação	49
Figura 5.6: Sistema IEEE 30 barras	
Figura 5.7 – IEEE 30 barras: 5 UMFs alocadas nas barras 2, 6, 10, 12 e 24 (Tabela	ı 5.6)52
Figura 5.8 – IEEE 30 barras: 5 UMFs alocadas nas barras 2, 4, 6, 12 e 19 (Tabela :	5.8)54
Figura 5.9 – IEEE 118 barras: 10 UMFs – Aptidão Gruimaraes	63
Figura 5.10 – IEEE 118 barras: 10 UMFs – Aptidão Metodologia Proposta	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Validação de dados e diagnóstico PHASE	19
Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na meta-heurística	43
Tabela 5.2 – IEEE 14 barras (alocação caso-base)	45
Tabela 5.3 – IEEE 14 barras (alocação considerando 20 topologias)	47
Tabela 5.4 – IEEE 14 barras (caso base, depuração de criticalidades)	48
Tabela 5.5 – IEEE 14 barras (20 topologias, com depuração de criticalidade)	49
Tabela 5.6 - IEEE 30 barras (alocação para o caso base)	51
Tabela 5.7 - IEEE 30 barras (alocação considerando 32 topologias)	52
Tabela 5.8 - IEEE 30 barras (caso-base, depuração de criticalidades)	53
Tabela 5.9 - IEEE 30 barras (32 topologias, depuração de criticalidades)	54
Tabela 5.10 – IEEE 57 barras (caso base)	56
Tabela 5.11 – IEEE 57 barras (alocação considerando 80 topologias)	57
Tabela 5.12 – IEEE 57 barras (caso base, depuração de criticalidades)	58
Tabela 5.13 – IEEE 57 barras (80 topologias com depuração de criticalidades)	60
Tabela 5.14 – IEEE 118 barras (caso base)	61
Tabela 5.15 – Análise comparativa sistema IEEE 118	62

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução	. 1
1.1 Considerações Gerais	.1
1.2 Objetivos	.4
1.3 Estrutura da Dissertação	.5
1.4 Publicações	.6
Capítulo 2 Estimação de Estado	.7
2.1 Introdução	.7
2.2 Etapas	.8
2.3 Análise de Observabilidade	.9
2.4 Obtenção do Estado da Rede1	0
2.5 Análise de Resíduos1	2
2.6 Modelo Linear1	.3
Capítulo 3 – Sincrofasores na Estimação de Estado1	6
3.1 Introdução1	6
3.1 Introdução	6
 3.1 Introdução	6 6 20
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2	16 16 20 21
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2	16 16 20 21 23
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2	16 16 20 21 23
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2 4.2 Formulação do Problema 3	16 16 20 21 23 23
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2 4.2 Formulação do Problema 3 4.3 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos 3	16 16 20 21 23 23 30 32
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2 4.2 Formulação do Problema 3 4.3 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos 3 4.4 Tratamento de EGs em Dados Críticos 3	16 20 21 23 30 32 33
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2 4.2 Formulação do Problema 3 4.3 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos 3 4.4 Tratamento de EGs em Dados Críticos 3 4.5 Algoritmo para Alocação de UMFs 3	16 20 21 23 23 30 32 33 34
3.1 Introdução	16 16 20 21 23 23 30 32 33 34 35
3.1 Introdução 1 3.2 Formulação do Problema 1 3.3 Observabilidade da Rede com Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 3.4 Informações sobre Sincrofasores 2 Capítulo 4 - Metodologia Proposta 2 4.1 Barras Observadas por Medidas de UMFs 2 4.2 Formulação do Problema 3 4.3 Consideração de Múltiplos Cenários Topológicos 3 4.4 Tratamento de EGs em Dados Críticos 3 4.5 Algoritmo para Alocação de UMFs 3 4.5.1 Codificação 3 4.5.2 Operadores evolucionários 3	16 16 20 21 23 30 32 33 34 35 35

4.6 Avaliação do Desempenho da Metodologia	40
Capítulo 5 Testes e Resultados	42
5.1 Descrição da Simulação	42
5.2 IEEE 14 barras	43
5.3 IEEE 30 barras	
5.4 IEEE 57 barras	55
5.5 IEEE 118 barras	61
Capítulo 6 – Conclusões	64
6.1 Considerações Finais	64
6.2 Trabalhos Futuros	66

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A sociedade contemporânea utiliza a energia elétrica de múltiplas formas, em praticamente todos os setores da vida moderna, traduzindo-se em desenvolvimento econômico e social. Em países considerados desenvolvidos, estima-se atualmente que mais de 30% da energia consumida seja na forma de elétrica. Provavelmente, nada se compara ao impacto positivo sobre a facilitação da vida trazido pelo uso da energia elétrica. Isto faz com que os sistemas de potência, provedores dessa energia, tenham sido considerados recentemente como uma das mais complexas criações da atividade humana.

Sistemas de potência são compostos por inúmeros equipamentos e instalações, que cobrem extensas regiões geográficas, tendo por objetivo principal a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica. Os processos executados em um sistema de potência destinamse a permitir que os consumidores tenham acesso à energia elétrica na quantidade desejada, ao mínimo custo financeiro e ambiental possível, observados critérios de qualidade de fornecimento. Tais critérios referem-se à capacidade de o sistema atender os consumidores com confiabilidade, respeitados certos valores padronizados de tensão e frequência. Do exposto, vislumbra-se a necessidade de operar os sistemas de potência da melhor forma possível, com acompanhamento pari passu, para manter a qualidade e continuidade de serviço desejada.

Para garantir a operação segura e confiável de um sistema elétrico, muitos dados devem ser coletados e adequadamente processados, o que usualmente se realiza através de um sistema de controle supervisório e aquisição de dados, conhecido pela sigla SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Entre outros, os dados de maior interesse, que caracterizam uma condição de operação em regime de equilíbrio estável entre carga e geração, são os de configuração atual da rede elétrica sob supervisão e medições em tempo real de grandezas elétricas, tais como: tensões nas barras da rede (nós elétricos); correntes nos ramos da rede; assim como fluxos e injeções de potência ativa/reativa.

Tal como em qualquer atividade complexa da atualidade, para operação de sistemas de potência torna-se essencial lançar mão de aplicativos computacionais para sua supervisão e controle. Um sistema de gerenciamento de energia (SGE), instalado em um Centro de Operação, assemelha-se ao sistema nervoso central do organismo humano e cumpre o papel de efetuar uma série de funções inteligentes que podem ser classificadas em três categorias: aquisição de dados e processamento; otimização operativa; supervisão da segurança e controle.

As condições de operação de um sistema variam a todo momento, sendo assim primordial manter o sistema em um estado normal-seguro. O sistema ocupa um estado normal se todas as cargas forem por ele providas sem a violação de qualquer restrição operativa (limites de fluxos e perfis de tensão); estará na condição normal-seguro se permanecer no estado normal caso ocorra uma contingência dentre aquelas listadas como críticas para a operação; do contrário, será reconhecido como normal-inseguro, caso venha a se tornar vulnerável com relação a alguma(s) das contingências selecionadas. Ao ser identificada a condição de insegurança, ações preventivas devem ser tomadas para o não agravamento desta condição, evitando assim o estado de emergência. Dependendo da gravidade da situação operativa, no estado de emergência ações corretivas são tomadas para evitar que o sistema entre em colapso (alívio de estresse dos elementos sobrecarregados), passando então a ocupar um estágio de restauração à normalidade. Este tratamento dado ao sistema recebe o nome de análise da segurança operativa.

Para acompanhar de perto a operação do sistema, medidas de grandezas elétricas que revelam seu comportamento são realizadas a todo momento e em todas as partes da rede, devendo ser processadas para que se determine o estado do sistema. As medidas elétricas são, em sua maioria, analógicas (tensões, correntes, fluxos), sendo que as digitais (status 0 ou 1) correspondem à indicação aberto ou fechado de dispositivos que seccionam a rede. As subestações da rede (barras ou nós elétricos) são equipadas com as chamadas de unidades terminais remotas (UTRs), recentemente substituídas por dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs – inteligent electronic devices), que coletam estas várias medidas e as transmitem através de canais de comunicação do campo para o Centro de Operação, onde são recebidas pelo sistema SCADA. O processamento das medidas recebidas realiza-se por meio de uma função conhecida como Estimação de Estado (EE).

A EE em sistemas de potência foi proposta por (Schweppe e Wildes, 1970), com o objetivo de criar uma base de dados completa e confiável; faz parte de um conjunto de aplicativos computacionais do SGE, estando descrita em detalhes em (Abur e Exposito, 2004) (Monticelli, 2000).

O processo de estimação deve ser realizado em tempo real (e.g., escala de poucos minutos), nas janelas de intervalos tempo de recebimento dos dados, atendendo a certos requisitos, supostamente presentes antes da sua execução, tais como: erros normais (estatisticamente pequenos) inerentes a qualquer medição; perfeito conhecimento da configuração atual da rede e seus parâmetros elétricos; quantidade adequada de dados, diversificados e distribuídos por toda a rede, de modo a observá-la completamente (redundância). Quando tais requisitos não estão presentes, a tarefa realizada pela função EE

torna-se muito mais árdua, podendo até mesmo ser seriamente comprometida, notadamente no que diz respeito à confiabilidade dos seus resultados. Os problemas advindos de erros na configuração da rede e seus parâmetros elétricos não serão tratados nesta Dissertação.

Usualmente, a EE processa através do método dos mínimos quadrados ponderados (MQP) os dados redundantes recebidos, sendo teoricamente capaz de reduzir o nível de incerteza das medidas (filtragem). Entretanto, na presença de erros grosseiros (EGs) de medição, muitas vezes pode apresentar dificuldades na sua depuração. Isto se deve em grande parte ao chamado efeito de espalhamento de EGs, causador da contaminação das estimativas de medidas que se relacionam através do estado com aquelas portadoras de tais erros – ou seja, embora essas medidas apresentem valores crus (de campo) corretos, suas estimativas (obtidas após a EE, aplicando a estimação do estado da rede para o cálculo da estimação das medidas) são colocadas sob suspeição, pois violam limites estatísticos de normalidade de erros que fazem com que sejam confundidas como portadoras de EGs.

A redundância qualificada de medidas – caracterizada não apenas pela quantidade, mas também pela diversidade de tipos de medidores e sua localização na rede elétrica – desempenha papel significativo no tratamento do problema de EGs na EE. Com um nível adequado de redundância, a EE pode lidar com o problema da detecção, identificação e eliminação de EGs, além de permitir que a indisponibilidade de medidas não comprometa a qualidade e confiabilidade das estimativas produzidas. Sistemas de medição altamente redundantes são sempre desejáveis. Entretanto, uma vez que a quantidade de dados está diretamente relacionada ao investimento financeiro em equipamentos de medição e transmissão de dados, a redundância oferecida pode sofrer redução, por cortes originados na revisão gerencial de alocação de fundos. Por outro lado, durante a operação dos sistemas, mudanças na configuração da rede ou um funcionamento temporariamente inadequado do sistema de aquisição de dados reduzem o nível de redundância para a EE. Até mesmo níveis críticos podem ser alcançados, caracterizando situações de perda iminente de observabilidade e desempenho inadequado de rotinas de processamento de EGs.

Felizmente, com a evolução tecnológica, unidades de medição fasorial (UMFs) tornaramse disponíveis comercialmente para diversas aplicações. De interesse para a EE, estas proveem medidas de tensão complexas nas barras e correntes nos ramos da rede elétrica, sincronizadas pelo sistema de posicionamento global (GPS - global positional system), conhecidas por sincrofasores. Os conceitos que envolvem fasores podem ser encontrados em (Steinmetz, 1893). Usadas na EE, as UMFs permitem a observação direta do estado do sistema em regime de equilíbrio (chamado também de estado estático), representado pelas tensões complexas das barras (módulo e ângulo). Apesar de suas características extremamente favoráveis (em termos de precisão, taxa de amostragem, sincronização de medidas), devido ao custo financeiro relativamente elevado, as UMFs vêm sendo gradualmente utilizadas em sistemas de potência para diversas aplicações (Phadke e Thorp, 2008). Assim sendo, até que seja viável financeiramente fazer uso das UMFs na EE para observar como um todo a rede que deseja supervisionar, medidas convencionais (SCADA) e de sincrofasores irão coexistir.

Medidas de sincrofasores podem ser úteis na EE, considerando-as como adicionais àquelas fornecidas pelo sistema SCADA. Uma possível forma de utilizá-las consiste em submetê-las a um processo de estimação próprio, independente, criando-se assim um estimador de sincrofasores (aqui designado por Sync), para se obter valores filtrados (estimativas a posteriori) do estado e, consequentemente, de medidas. Isto significa que não apenas as medidas de sincrofasores, mas também as convencionais, podem ser estimadas a partir do estado filtrado obtido pelo Sync. Resulta disto que os resíduos de estimação (diferenças entre valores medidos e filtrados) oriundos do Sync referentes às medidas convencionais são não correlacionados. Em outras palavras, as estimativas de medidas convencionais produzidas pelo Sync ao serem cotejadas com seus valores crus (antes da filtragem) por meio de seus resíduos, não serão afetadas por EGs que possam estar presentes em outras medidas SCADA – não ocorrerá o mencionado efeito de espalhamento de EGs.

Nesta Dissertação, propõe-se um método para a alocação estratégica de UMFs, de modo a melhorar a capacidade de tratamento de EGs nos dados processados pela função EE. Considera-se a disponibilidade limitada de UMFs a serem alocadas para supervisionar regiões da rede que contenham o maior número possível de medidas convencionais. A seguir, os objetivos estabelecidos para a Dissertação são detalhados.

1.2 OBJETIVOS

Neste período caracterizado pela transição tecnológica de UTRs para UMFs, a pesquisa sobre EE vem sendo conduzida na direção de melhorar a precisão e confiabilidade dos resultados alcançados por diversos algoritmos, buscando-se explorar o uso de sincrofasores para lidar principalmente com os seguintes problemas: observabilidade e criticalidade da rede sob supervisão; erros de medição; erros em parâmetros elétricos e configuração da rede.

O arcabouço matemático da teoria da estimação contém diversas ferramentas necessárias ao tratamento de uma ampla gama de problemas de integração de dados. Por exemplo, a disponibilidade de um banco de dados históricos, onde estejam armazenadas as condições de operação de um sistema sob supervisão, permite a extração de informações necessárias à produção de previsões de estado e medidas (estimativas a priori), que podem ser incorporadas à função EE de modo a aperfeiçoá-la. Em (Do Coutto Filho e Souza, 2009), encontra-se uma revisão de esquemas de integração de dados desta natureza, conhecidos como FASE (forecasting-aided state estimation), seguida de um exemplo de sua aplicação descrito em (Do Coutto Filho, Souza e Freund, 2009).

A combinação da estimação e previsão de estado tem sido apontada como sendo uma forma promissora para o tratamento de EGs. Na mesma linha de raciocínio, a utilização de medidas de sincrofasores em adição às medidas convencionais são benéficas, como demonstrou a pesquisa relatada em (Guimaraens, 2015) que propôs um processo de estimação denominado PHASE (phasor-aided state estimation). Esta Dissertação dá continuidade à pesquisa com PHASE, estabelecendo os objetivos descritos a seguir.

Considerando que a utilização de UMFs na EE tende a se intensificar, o planejamento de um sistema de medição fasorial que seja favorável à depuração de EGs usando PHASE tornase o foco central da presente pesquisa. Isto será realizado através do posicionamento estratégico de UMFs, que permita a máxima cobertura da área contendo medidores convencionais, tendo em conta uma quantidade pré-determinada de UMFs disponíveis. Além disto, outros aspectos incluídos no plano de medição com UMFs são a análise de alterações na configuração da rede elétrica (critério conhecido como n - 1) e de criticalidade de medidas, i.e., aquelas imprescindíveis para a observabilidade da rede. O problema tratado caracteriza-se como de otimização combinatória, adequado ao emprego de meta-heurísticas. Aqui, propõe-se a aplicação de um algoritmo evolucionário (AE) para realizar a alocação otimizada de UMFs, que levará a uma utilização abrangente do PHASE na depuração de EGs.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. Segue-se a esta Introdução, no Capítulo 2, uma descrição dos aspectos básicos da EE em sistemas elétricos de potência, contendo: a formulação do problema; etapas normalmente presentes em um estimador; análise de observabilidade do estado correspondente a uma determinada configuração da rede; análise estatística dos resíduos de estimação das medidas; utilização do PHASE. O Capítulo 3 contém,

de forma resumida, aspectos básicos do uso de sincrofasores na estimação. O Capítulo 4 descreve a metodologia utilizada para a otimização de um plano de medição contendo UMFs que busca aperfeiçoar a depuração de EGs pela função EE. O Capítulo 5 dedica-se à descrição das simulações realizadas com sistemas do IEEE e respectivos resultados. Por fim, encontram-se no Capítulo 6 as conclusões atingidas com a presente pesquisa, bem como propostas para trabalhos futuros.

1.4 PUBLICAÇÕES

Os seguintes artigos resultam da pesquisa aqui desenvolvida:

- ZEBA, B. C., GUIMARAENS, M. A. R., STACCHINI DE SOUZA, J. C., DO COUTTO FILHO, M. B. Alocação ótima de unidades de medição fasorial em redes elétricas para a depuração de erros nos dados. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Blumenau, Ago. 2017.
- ZEBA, B. C., GUIMARAENS, M. A. R., STACCHINI DE SOUZA, J. C., DO COUTTO FILHO, M. B. Estratégicas heurísticas para posicionamento de unidades de medição fasorial. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Niterói, Mai. 2018 (aceito).

CAPÍTULO 2 ESTIMAÇÃO DE ESTADO

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo reúne aspectos básicos da estimação de estado em sistemas de potência (EE), aqui incluídos para facilitar a leitura e compreensão dos aspectos atinentes ao problema do planejamento de sistemas de medição, destinados à facilitação do processamento de erros grosseiros (EGs). Tópicos tradicionalmente concernentes à EE são cobertos em mais detalhe em (Abur e Exposito, 2004) (Monticelli, 1999).

Os sistemas SCADA fornecem em tempo real diversos dados adquiridos remotamente, tais como, o estado aberto/fechado de chaves/disjuntores que refletem a configuração atual da rede elétrica e valores de medidas de grandezas elétricas de interesse para a operação da rede elétrica supervisionada. A partir destes dados, uma série de funções avançadas contidas em sistemas de gerenciamento de energia (SGEs) são executadas, iniciando-se pela EE, seguindo-se aquelas destinadas à segurança e otimização.

Os valores de medidas de grandezas elétricas fornecidos pelo sistema SCADA estão sujeitos a erros estatisticamente de pequena magnitude (corriqueiros, inerentes à medição) e outros grosseiros, estes introduzidos pelo funcionamento inadequado de elementos que compõem o processo de medição. Detectar, identificar e recuperar/remover medidas portadoras de EGs são problemas que impõem desafios teóricos e práticos aos processos de EE.

Entende-se por estado operativo de sistema de potência aquele plenamente caracterizado por um número mínimo de grandezas elétricas referentes a uma determinada configuração de rede elétrica, ou seja, pelas tensões complexas de cada barra (nó), usualmente expressas na forma polar (módulo e ângulo). Uma vez conhecido o estado do sistema, grandezas elétricas dele dependentes podem ser determinadas (correntes, fluxos e injeções de potência).

Fred Schweppe (Schweppe e Wildes 1970) foi pioneiro ao trazer para a área de sistemas de potência a EE, inicialmente enfrentando questionamentos sobre a real necessidade de se ter tal função. Desde então, muitos trabalhos de pesquisa em EE foram realizados, encontrando-se principalmente em dois livros material consolidado sobre o assunto (Abur, Expósito, 2004), (Monticelli, 1999). Após quase 50 anos desde a sua introdução, a função EE tem sido considerada como fundamental à operação em tempo real, estando sempre presente em Centros de Operação.

A função EE cumpre o papel de permitir a construção de uma base de dados, completa e confiável, essencial à operação de sistemas de potência em tempo real, como será visto ao longo deste capítulo.

2.2 ETAPAS

Usualmente, no processo de EE em sistemas de potência quatro etapas encadeadas são estabelecidas, como a seguir descrito.

a) Pré-Filtragem – Verificam-se os valores das grandezas medidas (dados crus) frente a limites, evitando assim que valores superiores à capacidade operativa dos equipamentos de medição sejam levados em consideração no restante do processo de estimação. Diversos testes de consistência também são aplicados: comparação entre o valor medido em determinado instante com valor padrão de uma grandeza ou referente a instante anterior; atendimento às leis de Kirchhoff; plausibilidade de valores medidos nos dois extremos de um ramo da rede; confrontação entre valores analógicos medidos e a posição (aberta/fechada) de chaves e disjuntores.

b) Observabilidade – Avalia-se o conjunto de dados pré-filtrados disponíveis, no que diz respeito a sua capacidade de permitir a realização do processo de EE em toda rede ou apenas em parte dela (ilhas observáveis), caso em que são identificadas as medições (pseudomedidas) necessárias para tornar a rede completamente observável. Como será visto adiante, a avaliação de criticalidades de medidas ou grupos de medidas também pode ser incluída nesta etapa.

c) Filtragem – Estima-se o estado do sistema utilizando o conjunto de medidas disponíveis e a configuração atual da rede. Nesta etapa, na maioria das vezes adota-se o método dos Mínimos Quadrados Ponderados.

d) Análise de Resíduos – Através da análise estatística dos resíduos da estimação (diferença entre valores medidos e estimados), são identificados possíveis EGs nas grandezas medidas ou erros de configuração/parâmetros da rede elétrica, não eliminados previamente.

2.3 ANÁLISE DE OBSERVABILIDADE

Antes de se estimar o estado de um determinado sistema, deve-se avaliar se há condições de observá-lo como um todo através das medidas disponíveis que atendam a: variedade de tipos de medidores (tensões, fluxos, injeções e correntes); quantidade suficiente (redundância); distribuição uniforme por toda a rede elétrica sob supervisão (sem deixar barras descobertas pela medição).

A análise de observabilidade pode ser realizada através de métodos numéricos ou topológicos. A análise topológica (com base na teoria dos grafos) envolve métodos combinatórios complexos e procedimentos lógicos, não influenciados por problemas numéricos. Os métodos numéricos, inicialmente propostos em (Monticelli e Wu, 1985), baseiam-se em aritmética de ponto flutuante, como por exemplo, os que utilizam a fatoração da matriz Jacobiano ou matriz de Ganho, que fazem parte do processo de EE, como será visto na Seção 2.4.

Os dois métodos citados para avaliação da observabilidade podem ser construídos de forma acoplada ou desacoplada. A primeira forma possui a desvantagem de não possuir solução única, de modo que a forma desacoplada é mais frequentemente adotada. O desacoplamento deve-se à alta sensibilidade do grupo de medidas de potência ativa em relação ao ângulo de fase da tensão (P- θ), tal como o de medidas de potência reativa em relação à magnitude de tensão (Q-V). Desta forma, pode-se fazer a análise apenas pelo conjunto $P - \theta$, adotando algumas simplificações (Abur e Exposito, 2004) (Monticelli, 1999). A observabilidade de um sistema se verifica quando a matriz de Ganho, presente em (2.6), for inversível, ou seja, pela ausência de pivôs nulos durante sua fatoração através do método da Eliminação de Gauss.

Diferentes graus de observabilidade ou níveis de criticalidade podem ser identificados, considerando-se individualmente cada medida e também grupos de medidas (Do Coutto Filho, Souza e Tafur, 2013). Define-se como crítica (Cmed) aquela medida que, caso se torne indisponível para processamento, levar o sistema à inobservabilidade. Já um grupo de medidas não críticas será considerado como conjunto crítico (Cconj), quando a ausência de qualquer medida deste conjunto tornar as medidas nele remanescentes Cmeds. O processo de identificação de Cmeds e Cconjs usualmente adotados baseiam-se em bem conhecidas propriedades numéricas dos resíduos da estimação – resíduos de Cmeds são sempre nulos e totalmente não correlacionados, i. e., sua matriz de covariância é identicamente nula; resíduos de medidas pertencentes a Cconjs são sempre numericamente iguais e totalmente correlacionados.

A confiabilidade do processo de estimação está relacionada ao nível de criticalidade das medidas processadas. Se uma Cmed for portadora de EG, tal erro não será detectado. Se alguma medida pertencente a um Cconj contiver EG, este será detectado, porém não poderá ser identificado. Portanto, pode-se afirmar que o nível de redundância das medidas disponíveis para processamento é fundamental para a EE.

2.4 OBTENÇÃO DO ESTADO DA REDE

A parte central da EE encontra-se efetivamente na etapa de filtragem, em que as medidas com maior exatidão preponderam na obtenção de uma estimativa do estado em relação às demais medidas, de acordo com o método dos mínimos quadrados ponderados (MQP).

A relação entre medidas e estado do sistema é descrita pela seguinte equação:

$$z = h(x) + \varepsilon \tag{2.1}$$

sendo:

- z vetor das medidas (observações) do sistema, oriundas de UTRs e complementarmente de UMFs, dimensão m × 1, em que m corresponde ao nº total de medidas.
- h(.) vetor das equações de fluxo de potência, de dimensão igual ao vetor z.
- *x* − vetor de estado, dimensão *n* = 2*nb* − 1, em que *nb* representa o nº de barras do sistema.
- ε vetor de erros associados a cada medida com distribuição Gaussiana, com média zero e matriz de covariância *R*.

O método MQP aplicado ao problema ocupa-se de minimizar a seguinte função objetivo:

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{m} \varepsilon_i^2 \cdot \alpha_i = \sum_{i=1}^{m} (z_i - h(x_i))^2 \cdot \alpha_i$$
(2.2)

sendo:

• J(x) – função objetivo a ser minimizada

• α_i – peso associado a medida i

Utilizando em (2.2) a notação matricial:

$$J(\mathbf{x}) = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\widehat{\mathbf{x}})]$$
(2.3)

Assim para realizar a EE obtendo uma estimativa do estado \hat{x} , deve-se minimizar J(x) que atenda à seguinte condição:

$$\left. \frac{\partial J(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x} = \hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{0}$$
(2.4)

Aplicando (2.4) em (2.3), vêm:

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{H}^T \cdot \mathbf{R}^{-1} \cdot [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}})]$$
(2.5)

onde:

$$H = H(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x}\Big|_{x=\hat{x}}$$
 – matriz Jacobiano do sistema.

Para resolver (2.5), aplica-se normalmente o processo iterativo do método de Newton-Raphson, com valor inicial $x^{(k)}$, obtendo-se:

$$\boldsymbol{x}^{(k+1)} = \boldsymbol{x}^{k} + [\boldsymbol{G}^{-1}\boldsymbol{H}^{T}\boldsymbol{R}^{-1}]^{(k)}[\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}^{(k)})]$$
(2.6)

onde:

- k contador de iterações
- **G** matriz de ganho, $\mathbf{G} = \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}$, avaliada em $\mathbf{x} = \mathbf{x}^{(k)}$

A cada iteração, verifica-se o processo de convergência pela diferença entre os estados obtidos nas iterações (k + 1) e(k), tal como a seguir:

$$\left|\Delta \boldsymbol{x}^{(k)}\right| = \left|\boldsymbol{x}^{(k+1)} - \boldsymbol{x}^{(k)}\right| < toler\hat{a}ncia \tag{2.7}$$

Com a estimação obtida nesta etapa, segue-se a análise de resíduos para a detecção e identificação de EGs.

2.5 ANÁLISE DE RESÍDUOS

Esta é etapa da EE em que se busca verificar a consistência dos resultados obtidos pelo processo de estimação. Assim, o vetor de resíduos da estimação é calculado como segue:

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{z} - \hat{\boldsymbol{z}} \tag{2.8}$$

$$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\hat{\boldsymbol{x}}) \tag{2.9}$$

sendo:

- *z* vetor que contém os valores medidos
- \hat{z} vetor de estimativas das medidas
- *r* vetor de resíduos da estimação

O vetor de resíduos (normalizado) r_N é submetido então a um teste estatístico de normalidade, assumindo-se o valor médio zero e matriz de covariância E, dada por:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{R} - \boldsymbol{H} (\boldsymbol{H}^T \boldsymbol{R}^{-1} \boldsymbol{H})^{-1} \boldsymbol{H}^T$$
(2.10)

$$r_n(i) = \frac{|r(i)|}{\sigma_E(i)} \le \lambda \tag{2.11}$$

onde: $\sigma_E(i) = \sqrt{E(i,i)}$ – desvio da *i*-ésima componente do vetor de resíduo; λ – limite que indica se alguma anormalidade está presente no processo de EE (usualmente, de valor igual a três). Com o limite não violado, o processo termina nesta etapa. Caso contrário, o surgimento de resíduos fora deste limite pode indicar que EGs estão presentes no sistema de medição.

Nesta etapa, comumente, podem surgir situações difíceis para a detecção/identificação de EGs simples (aquele que ocorre em apenas uma medida). Uma destas diz respeito a contingências na rede elétrica que podem tornar o sistema com menor redundância de medidas, tendo por consequência a ocorrência de criticalidades. A depender da quantidade de EGs presentes e de sua localização na rede, a existência de Cmeds e Cconjs pode tornar mais difícil ou até mesmo impossível a tarefa de detectar/identificar tais EGs. As Cmeds, por não possuírem correlação com nenhuma outra medida (matriz de covariância nula), efetivamente não

participam do processo de EE, bastar lembrar que seus resíduos apresentam sempre valores nulos. Assim, caso uma Cmed seja espúria, esta condição não será detectada. Já com os Cconjs, o que se torna difícil é a identificação de EGs entre a medidas que integram tais conjuntos. Isto porque as medidas que formam um Cconj apresentam sempre resíduos normalizados de igual valor e coeficientes de correlação unitários. Como são 100% correlacionadas, todas as medidas de um Cconj sob suspeita igualmente ultrapassarão o limite de detecção. Neste caso, a identificação dos EGs será impossível através do teste dos resíduos normalizados.

Outra situação bastante desfavorável ao processamento de EGs, já mencionada no Capítulo 1, diz respeito ao efeito de espalhamento de erros. Resíduos de diversas medidas sãs apresentam valores elevados, tal como se EGs fossem, por conta da contaminação de componentes do vetor de estado que foram estimadas erroneamente sob a influência das medidas com EGs. Assim sendo, com o estado contaminado, medidas sãs são estimadas erroneamente, tornando seus resíduos com valores além do limite estabelecido para a detecção de EGs. O efeito de espalhamento se grava, quando mais de uma medida for espúria. Com isto, vários ciclos de eliminação de EGs conjugada com a análise de resíduos devem ser realizados na tentativa de resolver o problema, tomando-se inicialmente uma medida por vez ou combinação de medidas (pares, trincas, etc.).

Por fim, situações que correspondam à presença de múltiplos EGs (i.e., aqueles que ocorrem simultaneamente em várias medidas), envolvendo medidas que apresentem criticalidades com cardinalidade superior a 2 (*k*-tuplas de medidas, k > 2), não serão cobertas nesta Dissertação.

2.6 MODELO LINEAR

Usualmente, as análises numéricas de observabilidade e criticalidade adotam o modelo linear de estimação, admitindo que as medidas sejam tomadas aos pares (potência ativa e reativa), com simplificações adicionais, visto que tais análises são de natureza estrutural. Assim as seguintes considerações são feitas:

a) adota-se somente a parte $P - \theta$ das equações de fluxo de potência. A equação das medidas, a partir de (2.1), fica representada por

$$\mathbf{z}_a = \mathbf{H}_a \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{v}_a \tag{2.12}$$

sendo θ – vetor de estado (ângulos de fase das tensões das barras), dimensão $(nb - 1) \times 1$; \mathbf{z}_a – vetor das medidas ativas do sistema, de dimensão $(m \times 1)$; \mathbf{H}_a – matriz Jacobiano em relação a parte $(P - \theta)$; \mathbf{v}_a – vetor de erro das medidas ativas (de média zero e matriz de covariância idêntica à identidade).

b) em relação aos parâmetros de rede, adotam-se os seguintes valores: unitários para todas as susceptâncias; nulos para as resistências; ramos em derivação são desconsiderados.

c) quanto à matriz Jacobiano H_a , os valores dos elementos referentes às medidas de fluxo de potência e de injeção ativa estão registrados na Figura 2.1, a seguir.

	- θ,	Θ_{i}	θ_k	θι		θ_n	٦
M₁→INJ;	n	1	0	1		0	
$M_2 \rightarrow FLX_{ij}$	1	-1	0	0		0	
M ₃ →FLX _{jk}	0	1	-1	0	•••	0	
•	•	•	•	•		•	
•	•	•	•	•		•	
•	Ŀ·	•	•	•		•	_

 $n = n^{o}$ de ramos ligados à barra *i* Figura 2.1 – Matriz Jacobiano Ha

Usando (2.12), com o método MPQ, vem:

$$G_a \,\hat{\theta} = H_a^T z_a \tag{2.13}$$

sendo $G_a = H_a^T H_a$ é a matriz de ganho

A estimação do ângulo de fase θ será obtida por:

$$\hat{\theta} = (H_a^T H_a)^{-1} H_a^T z_a \tag{2.14}$$

E a estimação do vetor das medidas ativas através de:

$$\hat{z}_a = H_a \hat{\theta} \tag{2.15}$$

$$r_a = z_a - \hat{z}_a \tag{2.16}$$

Usando (2.14) e (2.15) em (2.16), resulta:

$$r_a = [\mathbb{I} - H_a (H_a^T H_a)^{-1} H_a^T] z_a$$
(2.17)

onde I é matriz identidade de dimensão ($n_a \times n_a$), sendo n_a a quantidade de medidas ativas do sistema.

Sendo a matriz de covariância de resíduos dada por $E_a = [\mathbb{I} - H_a (H_a^T H_a)^{-1} H_a^T]$, podese reescrever (2.17) como:

$$r_a = E_a z_a \tag{2.18}$$

O valor do *i*-ésimo resíduo normalizado obtém-se da seguinte forma:

$$r_{aN}(i) = \frac{|E_a(i)|}{\sqrt{E_a(i,i)}}$$
(2.19)

Calcula-se o coeficiente de correlação γ_{ij} entre os resíduos das medidas *i* e *j* pela seguinte expressão:

$$\gamma_{ij} = \frac{|E_a(i,j)|}{\sqrt{E_a(i,i)E_a(j,j)}}$$
(2.20)

CAPÍTULO 3 – SINCROFASORES NA ESTIMAÇÃO DE ESTADO

3.1 INTRODUÇÃO

Dentre as formas de utilização de sincrofasores na EE, este capítulo apresenta os principais aspectos da estimação de estado com o auxílio de fasores, denominada PHASE (phasor-aided state estimation), detalhada em (Guimaraens, 2015).

Conforme mencionado no Capítulo de Introdução, as ideias exploradas em PHASE tiveram origem na estimação de estado auxiliada por previsões, conhecida pelo acrônimo FASE (*forecast-aided state estimation*). Inicialmente proposta em (Silva, Do Coutto Filho e Queiroz, 1983), encontra-se um panorama sobre esta forma de EE em (Do Coutto Filho e Souza, 2009) e uma aplicação real no Centro de Operação da empresa de eletricidade LIGHT que atua no Rio de Janeiro em (Do Coutto Filho, Souza e Freund, 2009).

Para uma abordagem alternativa, que usa medidas convencionais e fasoriais integradas a um conjunto de dados único a ser processado pela função EE, recomenda-se a leitura de (Phadke, Thorp e Karimi, 1986), (Bi, Qin e Yang, 2008), (Valverde et al., 2011).

3.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A abordagem PHASE compõe-se de dois estimadores que utilizam o método MPQ, aqui denominados de Sync e Conv, associados a cada tipo de medida que processam, ou seja, sincrofasores e convencionais, originárias de UMFs e do sistema SCADA, respectivamente.

Cabe aqui estabelecer a notação utilizada na Dissertação, necessária principalmente à identificação dos processos de estimação individualizados, i.e., para os que tratarem apenas de medidas convencionais (Conv) e para aqueles destinados às medidas de sincrofasores (Sync). Quando necessário, outros símbolos serão introduzidos ao longo do desenvolvimento do texto.

 z_{conv} – vetor $m_{\text{conv}} \times 1$ composto apenas por medidas convencionais (SCADA).

 P_{i-j}, Q_{i-j} — medidas convencionais de fluxo de potência ativa/reativa (da barra *i* para barra *j*).

P_i,Q_i – medidas convencionais de injeção de potência ativa/reativa (na barra *i*).

 $|V_i|$ — medida convencional de magnitude de tensão na barra *i*.

 z_{sync} – vetor m_{sync}×1 composto somente por medidas de sincrofasores.

 \overline{V}_i — medida do fasor tensão na barra *i*.

 $|\overline{V_i}| \ge \theta_i$ – magnitude, ângulo de fase de $\overline{V_i}$.

 \bar{I}_{i-i} — medida do fasor corrente do ramo *i-j*.

 $\bar{I}_{real_{i-i}}$ – componente real de \bar{I}_{i-i} .

 $\bar{I}_{imag_{i-i}}$ – componente imaginária de \bar{I}_{i-i} .

- $\hat{x}^{(\text{conv})}$ vetor *n*×1 de estado estimado convencionalmente.
- $\hat{x}^{(\text{sync})}$ vetor *n*×1 de estado estimado por meio de fasores apenas.
- $(.)_{conv}^{(conv)}$ vetor/matriz relacionado às medidas convencionais, avaliado com $\hat{x}^{(conv)}$.
- $(.)_{\text{sync}}^{(\text{conv})}$ vetor/matriz relacionado às medidas fasoriais, avaliado com $\hat{x}^{(\text{conv})}$.
- $(.)_{conv}^{(sync)}$ vetor/matriz relacionado às medidas convencionais, avaliado com $\hat{x}^{(sync)}$.
- $(.)_{sync}^{(sync)}$ vetor/matriz relacionado às medidas fasoriais, avaliado com $\hat{x}^{(sync)}$.

Com Sync, obtém-se o estado estimado $\hat{x}^{(sync)}$ e a matriz de covariância de erro na estimação $S^{(sync)}$, processando-se as medidas \mathbf{z}_{sync} com sua matriz de covariância do \mathbf{R}_{sync} . Utilizando $\hat{x}^{(sync)}$, o vetor de medidas convencionais estimado será $\hat{\mathbf{z}}_{conv}^{(sync)} = \mathbf{h}_{conv}(\hat{\mathbf{x}}^{(sync)})$ e sua matriz de covariância de erro será calculada por:

$$\boldsymbol{M}_{conv}^{(sync)} = \left[\boldsymbol{H}_{conv}^{(sync)}\right] \boldsymbol{S}^{(sync)} \left[\boldsymbol{H}_{conv}^{(sync)}\right]^{T}$$
(3.1)

sendo $[H_{conv}^{(sync)}]$ a matrix Jacobiano das medidas convencionais, avaliada com $\hat{x}^{(sync)}$.

No vetor de resíduos, o i-ésimo elemento é dado por:

$$\boldsymbol{r}_{conv}^{(sync)}(i) = \boldsymbol{z}_{conv}(i) - \hat{\boldsymbol{z}}_{conv}^{(sync)}(i)$$
(3.2)

Calcula-se a matriz de covariância do vetor $r_{conv}^{(sync)}$ somando-se a matriz de covariância de erros do vetor de medidas convencionais $R_{conv} \operatorname{com} M_{conv}^{(sync)}$, obtendo-se $V_{conv}^{(sync)} = R_{conv} + M_{conv}^{(sync)}$. Para normalização do vetor de resíduos e seu respectivo teste estatístico, os seguintes cálculos são realizados:

$$r_{Nconv}^{(sync)}(i) = \frac{\left|r_{conv}^{(sync)}(i)\right|}{\sigma_{V_{conv}^{(sync)}}(i)} \le \lambda$$
(3.3)

sendo $\sigma_{V_{conv}^{(sync)}}(i) = \sqrt{V_{conv}^{(sync)}(i,i)} e \lambda$ o valor limite para se suspeitar sobre a presença de EG.

Agora com o estimador Conv, procedimento semelhante ao realizado no estimador Sync deve ser realizado, tendo como entrada medidas convencionais (z_{conv} ; R_{conv}). Assim, obtémse $\hat{z}_{conv}^{(conv)} = h_{conv}(\hat{x}^{(conv)})$ e sua matriz de covariância de erro:

$$\boldsymbol{T}_{conv}^{(conv)} = \left[\boldsymbol{H}_{conv}^{(conv)}\right] \boldsymbol{S}^{(conv)} \left[\boldsymbol{H}_{conv}^{(conv)}\right]^{T}$$
(3.4)

Usando o estado estimado $\hat{x}^{(conv)}$ e sua matriz de covariância de erro S_{conv} , calcula-se o resíduo das medidas convencionais por:

$$\boldsymbol{r}_{conv}^{(conv)}(i) = \boldsymbol{z}_{conv}(i) - \hat{\boldsymbol{z}}_{conv}^{(conv)}(i)$$
(3.5)

A matriz de covariância dos resíduos é dada por $V_{conv}^{(conv)} = R_{conv} + M_{conv}^{(conv)}$ e utilizada no cálculo do *i*-ésimo resíduo normalizado como indicado a seguir:

$$r_{Nconv}^{(conv)}(i) = \frac{\left|r_{conv}^{(conv)}\right|}{\sigma_{U_{conv}^{conv}}(i)} \le \lambda$$
(3.6)

sendo $\sigma_{U_{conv}^{(conv)}}(i) = \sqrt{U_{conv}^{(conv)}(i,i)}.$

Simplificadamente, a Figura 3.1 exibe um fluxograma dos cálculos realizados nos estimadores Sync e Conv.



Figura 3.1 – Diagrama de blocos PHASE

Com os resíduos $r_{Nconv}^{(conv)}$ e $r_{Nconv}^{(sync)}$, originados pelos estimadores Sync e Conv, segue-se a etapa de validação ou diagnóstico, ilustrado da Figura 3.1. O tratamento de EGs ocorre de acordo com a análise de resíduos normalizados, sendo que com PHASE existem dois resíduos a analisar. Assim, quatro situações podem ocorrer, como mostra a Tabela 3.1, a seguir.

Violaçõe de de r _{Nconv}	s do Limite etecção r _{Nconv}	Diagnose
Sim	Sim	EG em medidas SCADA: erro em z _{conv} dentro da área observável por UMFs
Sim	Não	EG em medidas de UMFs
Não	Sim	Sem EGs
Não	Não	EG em medidas SCADA: erro em z _{conv} , fora da área observável por UMFs

Tabela 3.1: Validação de dados e diagnóstico PHASE

As medidas convencionais que poderão ter resíduos calculados através do estimador Sync e, portanto, que estarão livres do efeito de espalhamento de EGs, dependerá do posicionamento na rede elétrica das UMFs disponíveis. Como existem limitações financeiras para a ampla instalação de UMFs, um processo de alocação otimizada para benefício do processamento de EGs deverá ser proposto. O Capítulo 4 descreve como isto poderá ser alcançado por meio de algoritmos evolucionários. No Capítulo 5, se encontra uma série de estudos de simulação que evidenciam o funcionamento da metodologia proposta na Dissertação.

3.3 OBSERVABILIDADE DA REDE COM SINCROFASORES

Com a tendência de se ampliar a instalação de UMFs, em breve futuro, será possível observar por completo a rede elétrica de interesse, com a distribuição homogênea de medidores. Encontra-se em (Bei, Yoon e Abur, 2005) uma análise do observabilidade com a alocação de sincrofasores.

Nesta Dissertação, utiliza-se uma abordagem numérica para o problema da observabilidade de uma rede supervisionada pela EE, conforme se descreve a seguir.

Inicialmente, considere o vetor binário, de dimensão n (número de barras da rede), que define a presença de UMFs em determinada:

$$x = \begin{cases} 1, & se \ a \ barra \ possui \ medidor \ alocado \\ 0, & caso \ contrário \end{cases}$$
(3.7)

$$x = \begin{bmatrix} 1/0\\ 1/0\\ \vdots\\ 1/0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & 1 & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 3.2 – Vetor de alocação e Matriz de Conectividade

Define-se também uma matriz de conectividade A ($n \times n$), ilustrada na figura 3.2 e obtida pela seguinte expressão:

$$A = \begin{cases} 1, & se \ a \ barra \ i \ e \ j \ estão \ conectadas, ou \ i = j \\ 0, & caso \ contrário \end{cases}$$
(3.8)

A verificação da observabilidade será feita através do vetor **b** obtido por:

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{A} \cdot \boldsymbol{x} \tag{3.9}$$

Os valores dos elementos de \boldsymbol{b} que forem maiores ou iguais a 1, indicam que as barras associadas estão sendo observadas pelo sistema de medição fasorial. Caso contrário, aqueles com valores nulos, não correspondem as barras observadas por UMFs. Assim uma rede sem elementos de \boldsymbol{b} nulos, será totalmente observada pelo sistema de medição fasorial.

Outras análises podem ser feitas, como por exemplo, obter qual a distribuição de UMFs, dentro de um limite pré-estabelecido de unidades, que propiciará uma maior cobertura das medidas convencionais alocadas na rede. Esta Dissertação propõe uma metodologia para se obter uma resposta à indagação posta anteriormente em que se otimiza a distribuição de UMFs em benefício do enfoque PHASE.

3.4 INFORMAÇÕES SOBRE SINCROFASORES

As UMFs podem ser aplicadas em diversos problemas, tanto naqueles que envolvem o regime permanente de operação, quanto nos de regime transitório (Phadke e Thorp, 2008).

As pesquisas iniciais sobre UMFs tiveram origem na Universidade Virginia Tech, no começo dos anos 1980. A primeira UMF comercial foi apresentada em 1991 pela Macrodyne. A padronização a ser adotada por fabricantes de UMFs teve início com a norma IEEE Std 1344-1995 (IEEE, 1995), passando por seguidas atualizações: IEEE Std C37.118-2005 (IEEE, 2006); IEEE Std C37.118.1-2011 (IEEE, 2011a) e IEEE Std C37.118.2-2011 (IEEE, 2011b).

Como métrica para a avaliação da qualidade final da estimação de fasores, foi introduzido o cálculo do erro vetorial total (EVT), composto por valores obtidos teoricamente, através de uma representação de um sincrofasor com sinal senoidal, e valores obtidos pelo próprio medidor. Assim, obtém-se o EVT através da seguinte expressão:

$$EVT(n) = \sqrt{\frac{\left(\hat{X}_r(n) - X_r(n)\right)^2 + \left(\hat{X}_i(n) - X_i(n)\right)^2}{X_r^2(n) + X_i^2(n)}}$$
(3.10)

sendo: $\hat{X}_r(n) \in \hat{X}_i(n)$ – sequências da parte real e imaginária, respectivamente, de medidas de uma UMF sob teste; $X_r(n) \in X_i(n)$ – sequências de valores teóricos. As sequências são as diversas amostras obtidas em testes correspondentes a diferentes (*n*) instantes de tempo. De acordo com a norma IEEE, o limite de qualidade de 1% é estabelecido, ou seja, EVT = 0,01. Para um sistema na frequência de 60 Hz, o erro de fase será de 0,057°.

No Brasil, o ONS através do submódulo 11.8 em (ONS, 2017) faz uma descrição sobre a arquitetura e os requisitos de mínimos para o sistema de medição sincrofasorial, define que as medições devem estar sincronizadas por algum tipo de sistema de navegação global por satélite (e.g., GPS) e transmitidas a uma taxa de 60 amostras por segundo. A entrega dos dados deve ser realizada pelos agentes através de concentradores de dados fasoriais, utilizando os protocolos estabelecidos em norma no processo de transmissão dos dados.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA PROPOSTA

O planejamento de sistemas de medição para a estimação de estado é um trabalho laborioso, no qual certos requisitos de redundância devem ser satisfeitos de modo a: permitir a observabilidade de toda a rede elétrica sob supervisão; evitar o surgimento de dados críticos; garantir a confiabilidade do processo de depuração de erros nos dados (incluindo as etapas de detecção, identificação e supressão de erros grosseiros simples ou múltiplos) e ser capaz de suportar a indisponibilidade de medidores ou ramos de transmissão. Apesar de desejável, o atendimento a requisitos de redundância que garantam todas estas características nem sempre é possível devido a restrições no custo do investimento a ser realizado no sistema de medição.

Os sistemas SCADA usualmente coletam medidas convencionais, obtidas com o auxílio de unidades terminais remotas (UTRs), para posterior processamento pela função EE. Recentemente, com o advento do sistema de posicionamento global, medidas de sincrofasores, obtidas por unidades de medição fasorial, se tornaram disponíveis para processamento por funções avançadas de análise e controle. Porém, devido aos seus custos de instalação, uma quantidade limitada de UMFs são instaladas na rede. Logo, a questão central que este trabalho busca atacar é a determinação das localizações mais adequadas para a instalação de UMFs de modo a trazer o maior benefício possível para o processamento de erros grosseiros em medidas convencionalmente processadas pelo estimador de estado, aqui referidas como medidas convencionais (aquelas disponibilizadas pelas UTRs). Para tal, será considerado o processamento de erros via PHASE, discutido no Capítulo 3.

4.1 BARRAS OBSERVADAS POR MEDIDAS DE UMFS

Considerando a alocação de UMFs e a consequente presença de medidas de sincrofasores, é possível determinar quais barras da rede serão observadas por tais medidas utilizando-se a expressão (4.1):

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{Y} \times \boldsymbol{x} \tag{4.1}$$

Onde Y representa a matriz de conectividade da rede (de dimensão igual ao número de barras da rede) e x é um vetor binário, sendo seus elementos definidos como:

$$Y(i,k) = \begin{cases} 1 & se \ i = k \\ 1 & se \ as \ barras \ i \ e \ k \ est \ \tilde{a}o \ conecta das \\ 0 & nos \ outros \ casos \end{cases}$$
(4.2)

$$\boldsymbol{x}(i) = \begin{cases} 1 & se \ uma \ UMF \ est{``a} \ instalada \ na \ barra \ i \\ 0 & em \ caso \ contr\'ario \end{cases}$$
(4.3)

As barras observadas por medidas de sincrofasores são aquelas associadas a elementos não nulos do vetor b. Assume-se aqui que uma UMF forneça medidas de sincrofasores (valores de magnitude e ângulo) de tensão da barra em que está instalada esta UMF e correntes dos ramos que se conectam à referida barra.

De modo a ilustrar a cobertura de UMFs em relação à obtenção de estimativas de medidas SCADA pelo estimador Sync (ver Seção 3.2), considere o exemplo da Fig. 4.1 a seguir em que se utiliza o sistema IEEE 14-barras. Considerando a análise de observabilidade tratada na Seção 2.6, a rede elétrica é observada plenamente por 19 medidas convencionais, a saber: 5 de injeção de potência; 14 de fluxo de potência. Já o sistema de medição fasorial possui 3 UMFs instaladas nas barras 2, 6 e 14.



Figura 4.1 – Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 14

Legenda:



UTR:

(●) fluxos de potência, (▲) injeções de potência, (■) magnitudes de tensão

UMF:

(\bigcirc) Tensão (módulo, ângulo) da barra, Correntes (módulo/ângulo) de ramos Para o exemplo em questão, usando (4.1) – (4.3), obtém-se:

Matriz Y:

ſ	-1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0т	
	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	
	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	
	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	
I	-0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1]	
Vetor <i>x</i> : Vetor											or b	:			
	$\begin{bmatrix} 0\\ 0\\ 1\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 0\\ 1\\ 1 \end{bmatrix}$													1 1 1 1 2 1 2 1 0 0 1 1 0 0 1 1 1 2 1	

Note que o vetor b calculado através de (4.1) apresenta componentes com valores nulos referentes às barras 7, 8 e 10, indicando assim que os estados de tais barras não estão cobertos UMFs.

A UMF da barra 2 permite que sejam cobertos os estados das barras 1, 2, 3, 4 e 5, o que implica na obtenção de estimativas (pelo estimador Sync) das medidas SCADA contidas na área assinalada na Fig. 4.1. Note que as medidas fasoriais de corrente nos ramos relacionam os estados de suas barras terminais. А medida de fluxo de potência 4-7 não está coberta pelo sistema fasorial, pois o estado da barra 7 não será alcancado. O mesmo acontece com os fluxos 7-8 e 8-7. Na parte superior da Fig. 4.1, as medidas de injeção de potência nas barras 9 e 10, bem como o fluxo de potência 9-10, não estão cobertas, já que o estado da barra 10 não foi alcançado por uma UMF. Interessante notar que a injeção de potência na barra 13 para ser coberta depende da presença de duas UMFs; as que estão nas barras 6 e 14. Em resumo, das 19 medidas convencionais presentes, 6 delas não serão estimadas pelo estimador Sync, o que representa uma falta de cobertura equivalente a aproximadamente 31,5 %. Caso medidas não cobertas estejam contaminadas por EGs, haverá espalhamento de erros grosseiros o que dificultará o processo de depuração da EE.

Ainda explorando a mesma configuração de medidas convencionais da Fig.4.1, suponha agora que a UMF inicialmente alocada na barra 14 tenha sido realocada para a barra 9, como mostra a Fig. 4.2 a seguir. O vetor **b** indica que apenas a barra 8 não será observada por UMF. Com isto, as medidas de fluxo de potência 7-8 e 8-9 não serão cobertas (assinaladas na Fig. 4.2), o que equivale a cerca de 10,5 % do total de medidas SCADA disponíveis.


Figura 4.2 – Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 9

Continuando a explorar o mesmo exemplo, passa-se a ilustrar a influência da configuração da rede na capacidade de cobertura do sistema de medição fasorial. Para tal, suponha que o ramo 2-4 torne-se indisponível, como mostra a Fig. 4.3. O vetor b indica as barras 4, 7, 8 e 10 como não alcançadas pelo sistema de medição fasorial. Com isto, 8 medidas (assinaladas na Fig. 4.3) não serão cobertas (cerca de 42 %).



Figura 4.3 – Sistema IEEE 14 barras, sem o ramo 2-4, com UMFs nas barras 2, 6 e 14

Por fim, ilustra-se o efeito de criticalidades (ver Seção 2.5) na avaliação do benefício que se pode alcançar com a alocação estratégica de UMFs, no que diz respeito ao processamento de EGs. Considere o sistema ilustrado na Fig. 4.1 que apresenta as seguintes criticalidades:

- Nenhuma medida crítica;
- 4 conjuntos críticos, a saber, CConj1 = { P_{1-2} , P_{1-5} }; CConj2 = { P_{2-3} , P_3 , P_6 }; CConj3 = { P_{4-7} , P_9 }; CConj4 = { P_{7-8} , P_{8-7} }.



Na Fig. 4.4 a seguir, tais conjuntos encontram-se representados.

Figura 4.4 – Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 14; conjuntos críticos assinalados com linhas tracejadas

Caso EGs estejam presentes em medidas pertencentes aos conjuntos Cconj1 e Cconj2, estes poderão ser detectados e identificados usando-se o estimador Sync, o que constitui um real benefício proveniente da utilização de UMFs na EE. Já as medidas de Cconj3 e Cconj4, como não estão cobertas, caso estejam contaminadas por EGs, estes serão detectados, mas não poderão ser identificados. Se a UMF da barra 14 for transferida para a barra 9, o referido benefício será ampliado, pois neste caso apenas as medidas do Cconj4 não estarão cobertas, como indica a Fig. 4.5 a seguir.



Figura 4.5 – Sistema IEEE 14 barras com UMFs nas barras 2, 6 e 9; conjuntos críticos assinalados com linhas tracejadas

A seguir, o problema de alocação otimizada de UMFs com o objetivo de favorecer o processamento de medidas portadoras de EGs será formulado. A maximização do atendimento aos requisitos de eliminação do efeito de espalhamento de erros e de detecção e identificação de EGs, mesmo em medidas convencionais críticas ou participantes de conjuntos críticos, para diferentes configurações da rede elétrica, será tratada pela metodologia proposta.

4.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A metodologia proposta neste trabalho emprega um algoritmo evolucionário (AE) para otimizar a alocação de uma quantidade pré-definida de UMFs em uma rede elétrica na qual já estão previamente instaladas UTRs, que fornecem medidas convencionais coletadas pelo sistema SCADA e garantem a observabilidade completa da rede. Logo, conforme previamente mencionado, a alocação de UMFs buscará otimizar o desempenho do modelo PHASE no processamento de erros grosseiros.

Conforme mostra (Guimaraens, 2015), o processamento de erros quando se emprega o modelo PHASE é totalmente confiável, no que diz respeito à detecção e identificação de EGs simples ou múltiplos em medidas convencionais. Tais medidas devem estar localizadas em

áreas da rede que sejam supervisionadas por medidas de sincrofasores, ou seja, o estado das barras destas áreas podem ser determinados empregando-se apenas as medidas provenientes de UMFs. Logo, considerando que erros em medidas convencionais localizadas em regiões supervisionadas por UMFs podem ser depurados por PHASE, este benefício será tão maior quanto mais medidas convencionais sejam alcançadas por PHASE. Em outras palavras, para uma dada quantidade de UMFs, deseja-se que as áreas da rede supervisionadas por estas contenham o maior número possível de medidas convencionais.

Pode-se então formular um problema de otimização no qual o número de medidas convencionais localizadas nas áreas supervisionadas por medidas de sincrofasores (oriundas de UMFs) seja a quantidade a ser maximizada. Este problema pode ser representado como:

...

$$\operatorname{Max}\sum_{k=1}^{NI} m_k \tag{4.4}$$

$$s.a. \quad n_{UMF} = N \tag{4.5}$$

onde NI é o número de ilhas da rede que podem ser observadas utilizando-se apenas medidas provenientes de UMFs, aqui referida como ilha observável por UMF. O número de medidas convencionais contidas na k-ésima ilha observada por UMF é representada por m_k . A restrição de igualdade indica a quantidade de UMFs, n_{UMF} , que serão instaladas. Tal quantidade é pré-definida e representada pelo valor N, que pode ou não ser suficiente para a observação da rede como um todo, o que geralmente não se sabe a priori, uma vez que a quantidade de UMFs disponíveis é usualmente limitada. Vale estressar aqui que o problema de otimização abordado aqui, se caracteriza como aquele em que se deseja maximizar um certo indicador de desempenho (aqui sendo o número de medidas convencionais cujos erros podem ser processados via PHASE), sujeito indiretamente a uma restrição de investimento. Porém, a restrição de investimento refere-se a um investimento pré-definido e não passível de otimização, justificando assim a existência de uma restrição de igualdade e não de desigualdade. No problema em tela, considerando a tendência de inserção paulatina de UMFs na rede, a hipótese de conhecimento prévio do investimento que será realizado em um dado momento é perfeitamente plausível.

A solução ótima obtida quando se resolve o problema representado por (4.4) e (4.5) deve indicar as barras nas quais as UMFs devem ser instaladas de modo a se ter ilhas observáveis por UMF nas quais esteja contido o maior número possível de medidas convencionais, fornecendo dessa maneira também a aplicação do modelo PHASE.

4.3 CONSIDERAÇÃO DE MÚLTIPLOS CENÁRIOS TOPOLÓGICOS

Uma rede elétrica pode apresentar diferentes configurações durante sua operação, fruto de chaveamentos que resultam na conexão ou desconexão de linhas de transmissão. Sabe-se da teoria de estimação de estado que a ocorrência de alterações topológicas tem impacto sobre a observabilidade da rede e também sobre a capacidade de tratar erros nos dados, independentemente da mudança topológica ter resultado ou não em variação do plano de medição (com consequente redução ou acréscimo da quantidade de medidas). Sendo assim, em redes cuja topologia varia frequentemente é importante que tal característica seja levada em consideração quando se planeja o investimento no plano de medição.

No caso da alocação de UMFs de modo a otimizar o desempenho de PHASE no processamento de EGs, é possível que uma alteração topológica resulte em alterações também nas ilhas observáveis por UMF, as quais podem ser reduzidas. Neste caso, a capacidade de tratamento de EGs via PHASE seria também reduzida na condição de rede alterada. Logo, em redes nas quais alterações topológicas devem ser consideradas, a alocação das UMFs deve ser tal que o maior número possível de medidas convencionais estejam inseridas nas áreas observáveis por UMFs tanto no cenário topológico base como nas condições de rede alterada.

A função objetivo (4.4) pode ser substituída por aquela descrita a seguir em (4.6) de modo a otimizar o desempenho do modelo PHASE considerando não apenas um cenário topológico, mas sim a possibilidade de ocorrência de outros cenários topológicos que a rede pode experimentar durante a operação do sistema elétrico. A informação sobre a ocorrência de tais cenários topológicos pode ser extraída da base de dados histórica de uma empresa, na qual estejam registradas diferentes condições de operação.

$$\operatorname{Max}\sum_{t=1}^{NT} \left(\sum_{k=1}^{NI_t} m_{tk}\right) \tag{4.6}$$

$$s.a. \quad n_{UMF} = N \tag{4.7}$$

onde NT representa o número de diferentes cenários topológicos que devem ser considerados quando da alocação ótima de UMFs, enquanto m_{tk} é o número de medidas convencionais contidas na k-ésima ilha observável por UMF quando a rede opera no t-ésimo cenário topológico. NI_t é o número de ilhas observáveis por UMFs no cenário "t".

Destaca-se que a solução a ser buscada para o objetivo representado em (4.6) será aquela em que o número total de medidas convencionais cujos erros podem ser depurados por PHASE é máximo, considerando-se todos os cenários topológicos simultaneamente.

4.4 TRATAMENTO DE EGS EM DADOS CRÍTICOS

Os objetivos descritos em (4.4) e (4.6) buscam maximizar a quantidade de medidas convencionais inseridas em ilhas observáveis por UMFs. Logo, espera-se que as UMFs sejam alocadas de modo a formarem ilhas observáveis que contenham muitas medidas convencionais. Em outras palavras, áreas da rede onde existe uma maior concentração de medidas convencionais tendem a ser privilegiadas pela alocação de UMFs. Por outro lado, áreas da rede com a presença de poucas medidas convencionais não serão consideradas prioritárias segundo os objetivos propostos. Tais áreas possuem menor redundância de medidas e em algumas situações podem conter medidas críticas ou pertencentes a conjuntos críticos. Conforme anteriormente discutido, EGs em tais medidas não podem ser identificados e, em alguns casos, sequer detectados pela análise convencional de resíduos da estimação. Tal situação é indesejável e pode ser resolvida com o emprego do modelo PHASE, como anteriormente discutido. Logo, é desejável que além de se maximizar a quantidade de medidas convencionais que podem ser depuradas com o auxílio de PHASE, dentre elas estejam também eventuais medidas críticas ou pertencentes a conjuntos críticos presentes no plano de medição. Para tal, uma modificação pode ser realizada na função objetivo apresentada em (4.6), a qual passa agora a ser composta por três termos, conforme indicado na expressão (4.7).

$$\operatorname{Max}\sum_{t=1}^{NT} \left[\sum_{k=1}^{NI_t} \left(\alpha \, \frac{m_{tk}}{Nm_t} + \beta \, \frac{Nmc_{tk}}{Nmc_t} + \gamma \, \frac{Nmconj_{tk}}{Nmconj_t} \right) \right]$$
(4.8)

$$s.a. \quad n_{UMF} = N \tag{4.9}$$

onde:

 m_{tk} – quantidade de medidas convencionais presentes em ilhas observáveis por UMF na tésima topologia

 Nm_t – quantidade total de medidas convencionais presentes na t-ésima topologia Nmc_{tk} - quantidade de medidas convencionais críticas presentes na k-ésima ilha observável por UMF na t-ésima topologia

 Nmc_t – quantidade total de medidas convencionais críticas presentes na t-ésima topologia $Nmconj_{tk}$ – quantidade de medidas convencionais de conjuntos críticos presentes na k-ésima ilha observável por UMF na t-ésima topologia

 $Nmconj_t$ – quantidade total de medidas convencionais de conjuntos críticos presentes na tésima topologia Os parâmetros α , β , γ são os pesos associados a cada termo de (4.7). É interessante que tais pesos sejam ajustados de modo a garantir que o segundo e o terceiro termo se anulem durante a busca pela solução ótima. Isto busca garantir uma situação em que a alocação de UMFs permita o tratamento de EGs via PHASE na maior quantidade de medidas convencionais possível, mas sem deixar de fora aquelas que representam criticalidades para a EE.

A exigência de que EGs em medidas críticas e conjuntos críticos possam ser depurados pelo modelo PHASE faz com que exista uma tendência de que a quantidade total de medidas convencionais presentes nas áreas observáveis por UMFs seja menor que a obtida quando tal exigência não é imposta. Isto se deve ao fato de que medidas críticas e conjuntos críticos geralmente ocorrem em regiões da rede elétrica associadas a uma menor redundância de medidas.

4.5 ALGORITMO PARA ALOCAÇÃO DE UMFS

Esta seção descreve a aplicação de um AE para a otimização da alocação de UMFs, por meio da maximização de uma função aptidão que pode ser descrita por (4.4), (4.6) ou (4.8), dependendo do objetivo desejado. Tais funções são representadas em (4.10), (4.11) e (4.12) por conveniência.

$$FA_1 = \sum_{k=1}^{NI} m_k \tag{4.10}$$

$$FA_{2} = \sum_{t=1}^{NT} \left(\sum_{k=1}^{NI_{t}} m_{tk} \right)$$
(4.11)

$$FA_{3} = \sum_{t=1}^{NT} \left[\sum_{k=1}^{NI_{t}} \left(\alpha \frac{m_{tk}}{Nm_{t}} + \beta \frac{Nmc_{tk}}{Nmc_{t}} + \gamma \frac{Nmconj_{tk}}{Nmconj_{t}} \right) \right]$$
(4.12)

Importante notar que a restrição expressa em (4.5) não é explicitamente representada na função aptidão, uma vez que a quantidade de UMFs a serem alocadas é pré-definida e todos os indivíduos de uma dada população do AE sempre consideram a alocação de *N* UMFs.

4.5.1 CODIFICAÇÃO

Em cada população as soluções candidatas são codificadas em um cromossomo que é representado por um vetor binário ($nb \times 1$), onde nb é o número de barras elegíveis para a instalação de UMFs. Caso todas as barras sejam elegíveis, nb será igual ao número total de barras na rede. O cromossomo está em correspondência com o vetor x em (4.1) e cada um de seus genes é definido como:

$$x(i) = \begin{cases} 1, & se \ ocorrer \ a \ instalação \ do \ UMF \ a \ barra \ b \\ 0, & caso \ contrário \end{cases}$$

O processo evolutivo conduzido pelo AE emprega operadores de mutação, cruzamento e elitismo, conforme será descrito a seguir.

4.5.2 OPERADORES EVOLUCIONÁRIOS

Neste trabalho foram utilizados operadores de cruzamento e de mutação, além de uma busca local. Em todos os casos foi sempre considerada a restrição de que a quantidade prédefinida de UMFs presentes em uma dada solução (indivíduo) deve ser respeitada.

Considerando os indivíduos da população como vetores coluna, o operador de cruzamento utilizado inicialmente particiona cada um deles ao meio, ou seja, o ponto de corte é tal que as cadeias de genes superior e inferior ao ponto de corte possuem a mesma dimensão. Em caso de uma quantidade total ímpar de genes, tem-se um gene a mais na cadeia superior. Tal procedimento utiliza somente duas partes no processo de divisão dos indivíduos, devido a complexidade de se gerar mais partes e garantir de imediato a restrição imposta na quantidade de medidores UMFs disponíveis para a alocação. Iniciando pelo primeiro indivíduo, identificase a quantidade N_1 de UMFs (na Fig.4.6 representado por N_{PMU} P1 com "valores" x, y, x, w e c) que são propostas para alocação nos genes que compõe a cadeia superior (contagem de genes com valores iguais a 1). Sendo N a quantidade de UMFs pré-definida para alocação, percorrese cada um dos indivíduos restantes buscando aqueles cujos genes da cadeia inferior indicam a alocação de (N- N1) UMFs (na Fig. 4.6 indicado por NPMU P2 com "valores" N-x, N-y, N-x, N*w* e *N*-*c*). Sempre que um indivíduo com tal característica é encontrado, a sua cadeia de genes inferior é combinada com a cadeia de genes superior do primeiro indivíduo para gerar um novo indivíduo (filho), como indicado na Fig. 4.6 pelas partes superior do primeiro indivíduo e parte inferior do terceiro indivíduo. O mesmo procedimento é repetido para o segundo indivíduo da população e assim por diante. É estabelecido também um limite para a quantidade de novos

indivíduos a serem gerados por este cruzamento (arbitrado em Q vezes o tamanho da população). Como exemplo, para um sistema de 10 barras e com disponibilidade para alocação de 4 UMFs, considerando que um hipotético indivíduo que possua medidores localizados nas barras 1, 3, 5, e 8, a partição em duas partes iguais com uma para as 5 primeiras barras (1 a 5) e outra com as 5 restantes (6 a 10). A primeira parte que possui 3 medidores (nas barras1, 3 e 5) formará elementos com aquelas segundas partes (barras 6 a 10) dos indivíduos que possuem um medidor alocado. A segunda parte deste indivíduo hipotético, formará elementos com as primeiras 1 a 5) dos indivíduos que possuem 3 medidores alocados.



 $n_{PMU} = N$

Figura 4.6 – Operador de cruzamento empregado no AE

Os indivíduos da população que sofrerão mutação são selecionados aleatoriamente, mesmo ocorrendo para a definição de quantas UMFs serão realocadas em cada indivíduo selecionado. A seleção das barras nas quais as UMFs serão realocadas é feita de forma probabilística, sendo tal probabilidade proporcional à quantidade de ramos conectados a cada barra (Tafur et al, 2007) e/ou à quantidade de medidas de UTRs a ela associadas. As barras elegíveis para a realocação são aquelas nas quais uma UMF ainda não está alocada, conforme Fig. 4.7.



Figura 4.7 – Operador de mutação empregado no AE

No caso da busca local, a ideia é explorar uma certa vizinhança onde se procura ter uma melhoria da solução com a realocação de UMFs. Inicialmente escolhe-se aleatoriamente uma quantidade entre 1 e 3 UMFs a serem realocadas no indivíduo elite (melhor indivíduo da população corrente). A realocação de cada UMF é realizada individualmente, tomando-se como base o número da barra onde ela está atualmente alocada (seta vermelha na Fig. 4.8). A partir de então faz-se a realocação nas barras de numeração superior, até a barra imediatamente anterior a uma outra com UMF já alocada, bem como nas barras de numeração inferior, também até a barra imediatamente anterior a uma outra com UMF já alocada (setas azuis na Fig. 4.8).



Figura 4.8 – Busca local aplicada ao indivíduo elite no AE

Após a aplicação dos operadores de cruzamento e mutação e da busca local, forma-se a próxima população, com a mesma quantidade de indivíduos da população anterior. Tal população é formada pelo indivíduo elite e os melhores indivíduos observados após se realizar as operações genéticas e a busca local.

4.5.3 ALGORITMO

A partir do conhecimento sobre a topologia (ou topologias) de interesse da rede elétrica, das medidas de UTRs do plano de medição existente e a quantidade de UMFs a serem alocadas, é possível executar a metodologia proposta empregando os algoritmos descritos nesta seção. O Algoritmo 1 emprega a técnica de seleção proporcional (Back, 1996). Este algoritmo é utilizado para a formação da população inicial, como também aplicado no operador de mutação com o ajuste em cada caso para as barras elegíveis.

Algoritmo 1: Função de seleção proporcional

Entradas: tamanho da população a ser gerada, quantidade de UMFs a alocar, Topologia da rede elétrica e plano de medição existente (UTRs)

Saída: População de indivíduos, na forma de uma matriz **X** de dimensão $n \times pop$, onde n = número de barras e pop é o tamanho da população (número de indivíduos) inicialização

para população a ser gerada faça

Definição do peso de cada barra empregando-se um critério de proporcionalidade aleatoriamente escolhido (função da quantidade de ramos conectados a cada barra e/ou da quantidade de medidas de UTRs a ela associadas)

X[:, indice para] = fps(n, Quantidade de UMFs, peso das barras)fim para

A função fps(.) representa a escolha probabilística das barras (genes) a terem uma UMF nelas alocada, feita proporcionalmente aos pesos de cada barra no processo de seleção. Por exemplo, uma barra com seis ramos conectados tem duas vezes mais chance de ser selecionada para alocação de UMF que outra barra com três ramos conectados. O mesmo ocorre quando se considera a quantidade de medidas de UTRs associadas a cada barra. O fator de proporcionalidade de cada barra pode também ser uma função da soma da quantidade de ramos conectado e das medidas de UTRs associadas. Neste trabalho, para cada indivíduo, escolhe-se aleatoriamente o critério de proporcionalidade a ser empregado (função apenas da quantidade de ramos conectados, quantidade de medidas de UTRs associadas ou a soma das duas quantidades). A expressão (4.13) apresenta a probabilidade de uma dada barra *b* ser selecionada.

$$p(b) = \frac{Ne_b}{\sum_{i=1}^n Ne_i} \tag{4.13}$$

onde Ne_b representa a quantidade de elementos sendo considerada para a barra *b* de acordo com o critério de proporcionalidade escolhido (quantidade de ramos conectados, quantidade de medidas de UTRs associadas ou a soma das duas quantidades), enquanto Ne_i representa a quantidade de elementos associados à *i-ésima* barra e *n* indica o número de barras da rede.

Os passos do AE desenvolvido são apresentados a seguir.

Algoritmo 2: Algoritmo evolucionário empregado

Entrada: Topologia da rede (conexões de cada barra), Dados do plano de medição
existente (quantidade de medidores de UTRs associados a cada barra), Parâmetros de
execução do AE (quantidade de gerações, tamanho da população, quantidade de execuções
do AE, quantidade de novos indivíduos obtidos por mutação, porcentagem máxima de
filhos gerados por cruzamento, porcentagem de elitismo, pesos da função aptidão)
Saída: Melhor indivíduo de cada execução do AE (melhor alocação de UMFs)
para cada execução do AE faca:

Formação da população inicial (matriz X)

 $\mathbf{X} = fps(população, quantidade de UMFs, pesos de cada barra)$

para quantidade gerações faça

aplicar a função objetivo (4.8), (4.9) ou (4.10) em \mathbf{X}

operadores:

 $filhos = crossover(\mathbf{X}, taxa de filhos)$

elementos da mutação = $mutação(\mathbf{X}, quantidade de mutação)$

elementos busca local = busca local(mais apto de X)

elite = elitismo()

aplicar a função objetivo novamente em filhos, elementos da mutação e elementos da busca local

X nova = [elite, os mais aptos indicados pela aplicação da função objetivo até atingir o tamanho da população]

fim para gerações

armazenar o melhor resultado da execução

fim para execuções do AE

4.6 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA METODOLOGIA

De modo a se avaliar a qualidade das soluções obtidas empregando-se a metodologia proposta, será empregado um índice para estimar a quantidade de medidas convencionais que podem ser depuradas empregando-se o modelo PHASE. Tal índice, definido como \overline{M}_{UTR} , é apresentado na expressão (4.14). O índice \overline{M}_{UTR} é expresso em termos percentuais e indica a proporção de medidas convencionais (M_t) que pode ser depurada por PHASE em cada uma dos NT cenários topológicos considerados. A expressão (4.15) mostra como M_t é calculado para um determinado cenário topológico t, como a razão entre a quantidade de medidas convencionais que podem ser depuradas por PHASE e a quantidade total de medidas convencionais no cenário topológico em questão (Nm_t).

$$\overline{M}_{UTR} = \frac{\sum_{t=1}^{NT} M_t}{NT} \times 100 \tag{4.14}$$

Onde:

$$M_{t} = \frac{\sum_{k=1}^{NI_{t}} m_{tk}}{Nm_{t}}$$
(4.15)

Nos casos em que se considera a necessidade de que medidas críticas e em conjuntos críticos sejam depuradas por PHASE, a expressão (4.16) indica o sucesso em cumprir tal requisito.

$$\bar{M}_{crit} = \frac{\sum_{t=1}^{NT} Mcrit_t}{NT} \times 100$$
(4.16)

Onde:

$$Mcrit_{t} = \frac{\sum_{k=1}^{NI_{t}} (Nmc_{tk} + Nmconj_{tk})}{(Nmc_{t} + Nmconj_{t})}$$
(4.17)

Em (4.17) tem-se o percentual de criticalidades que fazem parte de áreas observáveis por UMF na t-ésima topologia, enquanto em (4.16) tem-se a quantidade média de criticalidades cujos erros podem ser depurados por PHASE considerando-se todos os cenários topológicos de interesse. No caso de o caso base ser o único cenário topológico de interesse, tem-se NT = 1.

CAPÍTULO 5 TESTES E RESULTADOS

5.1 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO

Diversas simulações foram realizadas utilizando-se os sistemas teste IEEE 14-, 30-, 57e 118-barras, comumente utilizados em estudos da área de estimação de estado. Em todos os casos simulados, assume-se a existência de um sistema de medição contendo exclusivamente medidas convencionais e capaz de observar a rede elétrica como um todo. A metodologia proposta foi testada considerando a necessidade de alocar uma quantidade pré-definida de UMFs (em adição às UTRs já existentes) de modo a otimizar a função objetivo do problema.

Em cada simulação realizada, o AE empregado foi executado 100 vezes, cada qual com uma população de 50 indivíduos e um total de 10 gerações. Estes valores empregados são resultados de diversos testes e consequente verificação que geram resultados adequados. Durante o processo evolutivo, o operador de elitismo foi empregado de modo a preservar o melhor indivíduo de uma população, que é copiado na próxima população sempre que uma nova geração é iniciada. Os operadores de mutação e cruzamento foram implementados conforme descrito na Seção 4.5.2 . Em cada caso, a população inicial foi construída de forma que cada indivíduo estivesse sujeito à função de seleção proporcional, sendo a chance de escolha de uma determinada barra para alocação de UMF diretamente proporcional, para cada topologia do problema, ao número de ramos de transmissão conectados a esta barra e/ou ao número de medidores associados a esta barra.

Testes foram realizados em que, além do cenário topológico referido como caso-base (aquele em que todos os ramos de transmissão estão presentes na rede), outros cenários de interesse foram também considerados, através do critério N - 1, em que cada ramo de transmissão é tornado indisponível, evitando-se o surgimento de ilhamento físico na rede.

As informações de entrada necessárias à execução do algoritmo de alocação ótima de UMFs proposto são:

- A topologia da rede elétrica em que serão alocadas as UMFs. No caso de existir mais de uma topologia de interesse, todas estas topologias devem ser informadas.
- 2- O sistema de medição pré-existente, formado por medidas provenientes de UTRs e que garanta a observabilidade da rede para cada topologia de interesse.
- 3- A quantidade de UMFs disponíveis para alocação.

- 4- As possíveis medidas críticas e em conjuntos críticos para cada topologia de interesse da rede, bem como os pesos a serem considerados em cada termo da função de aptidão (4.10), α, β, γ
- 5- Os parâmetros de execução do AE empregado:
 - a. A quantidade de gerações
 - b. Quantidade de indivíduos da população
 - c. A taxa máxima de filhos gerados pelo crossover
 - d. A porcentagem de elitismo
 - e. Quantidade de iterações
 - f. Quantidade de mutações

Nos testes realizados foram utilizados os valores 2, 7 e 3 para os pesos $\alpha, \beta \in \gamma$, respectivamente. Tais pesos foram arbitrados desta forma pois representam a importância de se cobrir primeiramente as medidas críticas, posteriormente medidas presentes em conjuntos críticos e por fim se buscar alcançar o máximo de medidores convencionais. A quantidade máxima de filhos gerados usando o operador de cruzamento será 3,6 vezes a quantidade de indivíduos da população, sendo este um valor obtido após alguns testes como sendo um valor aceitável mesmo para redes de maior porte. A Tabela 5.1 sumariza os parâmetros utilizados.

Gerações	População	% máxima de filhos	Elitismo (%)	Execuções	Mutações
10	50	360	1	100	50
Pesos	α	β	γ		
	2	7	3	-	

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados na meta-heurística

5.2 IEEE 14 BARRAS

Testes foram realizados com o sistema IEEE 14 barras ilustrado na Figura 5.1, considerando as diferentes funções aptidão apresentadas no Capítulo 4. Conforme mencionado na seção anterior, este sistema possui um plano de medição pré-existente, com UTRs já instaladas, cujas medidas convencionais a elas associadas já permitem a observação da rede elétrica como um todo. O plano de medição apresentado na Figura 5.1 é composto por 39

medidas convencionais, sendo 5 pares de injeção de potência (ativa-reativa), 14 pares de fluxo de potência (ativa-reativa) e uma medida de magnitude de tensão. O plano de medição não possui medidas críticas, porém conjuntos críticos de medidas estão presentes e possuem 9 medidas formando os seguinte conjuntos: Cconj1{P₁₋₂, P₁₋₅}, Cconj2{P₂₋₃, P₃, P₆}, Cconj3{P₄₋₇, P₉} e Cconj4{P₇₋₈, P₈₋₇} (em que P_{i-j} são os fluxos de potência entre a barra i para a barra j, e P_i a injeção de potência na barra i). O processo de simulação das contingências (N - 1), gerou um total de 19 topologias em relação à original. Em nenhuma delas, como resultado da eliminação de uma linha, provocou a perda da observabilidade total do sistema. Em termos de criticalidade, algumas topologias apresentaram uma ou duas medidas críticas e os conjuntos críticos formados de 7 a 13 medidas.



Figura 5.1 – Sistema IEEE 14 barras

As Tabelas 5.2 a 5.5 mostram resultados obtidos após 100 execuções do AE, em que diferentes quantidades de UMFs foram consideradas. Em cada tabela, a primeira coluna indica a quantidade de UMFs alocadas em cada caso, enquanto na segunda coluna são indicadas as barras nas quais as UMFs foram alocadas em relação ao melhor ou um dos conjunto de soluções que geram o melhor resultado. A terceira coluna apresenta o percentual de medidas

^(●) fluxos de potência, (▲) injeções de potência, (■) magnitudes de tensão

convencionais que podem ser depuradas pelo modelo PHASE com a alocação de UMFs proposta pela melhor solução obtida. A quarta coluna apresenta a média do percentual de medidas convencionais que pode ser depurado via PHASE, calculado considerando-se as alocações propostas após as 100 execuções do algoritmo, enquanto a última coluna traz os correspondentes desvios-padrão. Em cada caso, as melhores soluções obtidas são aquelas que maximizam a função aptidão (4.10). O percentual de medidas convencionais alcançadas pelo processo de depuração de erros via PHASE, \overline{M}_{UTR} , é calculado utilizando-se (4.14). A \overline{M}_{UTR} Média corresponde ao cálculo da média dos valores obtidos para \overline{M}_{UTR} em cada uma das 100 execuções do AE. As tabelas que apresentam os resultados dos testes em que se busca também garantir a depuração de erros em medidas críticas e de conjuntos críticos via PHASE, mostram, além das informações apresentadas nas demais tabelas, o percentual de medidas críticas e em conjuntos críticos que podem ser depuradas via PHASE. Tais informações são apresentadas nas duas últimas colunas, sendo valores máximo e médios obtidos a partir dos indicadores calculados utilizando-se (4.16) para 100 execuções do AE.

A Tabela 5.2 apresenta os resultados obtidos quando se considera o interesse de supervisionar um único cenário topológico (caso-base) e sem a preocupação de utilizar PHASE para depurar erros envolvendo medidas críticas ou de conjuntos críticos (função de aptidão (4.8)).

Ouantidade		\overline{M}_{U1}	Desvio Padrão	
de UMFs	Barras	Melhor	Média	(%)
		(%)	(%)	(70)
1	2	28,19	27,21	1,24
2	6,9	61,52	61,52	0
3	2,6,9	89,75	89,75	0
4	2,6,8,9	100	100	0
5	2,4,6,7,9	100	100	0

Tabela 5.2 – IEEE 14 barras (alocação caso-base)

Os resultados mostram que quando a quantidade de UMFs disponíveis para alocação aumenta, o percentual de medidas convencionais que podem ser depuradas por PHASE aumenta significativamente. Com a instalação de 4 UMFs o modelo PHASE pode ser aplicado para depurar todas as medidas convencionais. Este resultado está coerente com o encontrado na literatura, que indica que com a alocação de 4 UMFs pode-se observar toda a rede do sistema IEEE 14 barras. As Figs. 5.2, 5.3 e 5.4 mostram o diagrama IEEE 14 barras com a indicação de como a cobertura dos medidores UMFs é realizada na prática. É possível observar, por exemplo, na Fig. 5.2 em que o medidor fasorial está localizado na barra 2, a medida de fluxo de potência P1-5 entra na cobertura do UMF pois ambas as barras 1 e 5 estão conectados a barra 2. Outro caso interessante de verificar se dá na Fig 5.3, em que UMFs foram alocados nas barras 6 e 9, possibilitando as entradas das medidas de injeção de potência das barras 10 e 13 (P₁₀ e P₁₃).



Figura 5.2 – IEEE 14 barras: 1 UMF alocado na barra 2



Figura 5.3 – IEEE 14 barras: 2 UMFs alocados nas barras 6 e 9



Figura 5.4 – IEEE 14 barras: 3 UMFs alocados nas barras 2, 6 e 9

Por fim, a Fig 5.4 mostra que apenas duas medidas não entraram na cobertura do sistema de medição fasorial ao colocar 3 medidores nas barras 2, 6 e 9. Tais medidas fora de cobertura são de fluxo de potência P_{7-8} e P_{8-7} , e para este caso requerem um UMF localizado em uma destas barras (7 ou 8) pois a barra 8 é terminal.

A Tabela 5.3 apresenta os resultados obtidos quando se considera o interesse de supervisionar 20 diferentes cenários topológicos, dentre eles o caso-base, ainda sem a preocupação de utilizar PHASE para depurar erros envolvendo medidas críticas ou de conjuntos críticos.

Quantidade		\overline{M}_U	\overline{M}_{UTR}		
de UMFs	Barras	Melhor	Média	(%)	
ue onirs		(%)	(%)	(70)	
1	2	26,82	26,72	0,370	
2	6,9	58,95	58,95	0	
3	2,6,9	86,48	86,48	0	
4	2,6,8,9	97,41	96,70	2,3	
5	2,6,7,10,14	98,73	98,73	0	
8	1,3,6,7,9,11,12,14	100	100	0	
10	2,4,5,6,7,8,9,10,11,13	100	100	0	

Tabela 5.3 – IEEE 14 barras (alocação considerando 20 topologias)

Os resultados obtidos mostram que apenas com 8 UMFs disponíveis para alocação foi possível obter uma solução na qual todas as medidas convencionais podem ser depuradas por PHASE para qualquer dos cenários topológicos considerados.

A Tabela 5.4, por sua vez, apresenta os resultados obtidos quando se considera o interesse de supervisionar apenas o cenário topológico correspondente ao caso-base, porém garantindo que medidas críticas e conjuntos críticos possam ser também depuradas por PHASE.

Quantidade		\overline{M}_U	\overline{M}_{UTR}		\overline{M}_{crit}	
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão	Melhor	Média
ut entry		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	2	28,19	28,19	0	86,82	86,82
2	2,7	48,70	49,95	2,20	94,73	94,09
3	2,6,9	89,75	89,11	3,01	94,73	94,73
4	2,6,7,9	100	100	0	100	100
5	2,4,6,7,9	100	100	0	100	100

Tabela 5.4 – IEEE 14 barras (caso base, depuração de criticalidades)

Os resultados da Tabela 5.4 revelam que com 4 UMFs disponíveis para alocação já é possível obter uma solução na qual todas as medidas convencionais serão criticadas por PHASE e que tal solução aponta para as mesmas localizações indicadas na Tabela 5.2. Porém, ao se comparar os resultados obtidos para as aptidões (melhor e média) nas Tabelas 5.4 e 5.2, para uma mesma quantidade de UMFs, é possível perceber que a exigência de que PHASE depure erros que envolvam as criticalidades de medidas convencionais torna o problema mais difícil. Os resultados mostram ainda que, com duas UMFs disponíveis para alocação, a localização ótima foi diferente daquela mostrada na Tabela 5.2. Esta diferença no resultado, conforme apresentado no diagrama da Fig. 5.5, mostra uma maior cobertura do total de medidas convencionais no diagrama da Giguerdo (resultado da Tabela 5.2) representado pela área em vermelho claro e no diagrama direito uma maior cobertura das medidas que fazem parte de conjuntos críticos (representadas pela área em verde).



Figura 5.5 – IEEE 14 barras: abordagem sem (esq.) e com (dir.) criticalidade com 2 UMFs disponíveis para alocação

Por fim, a Tabela 5.5 apresenta os resultados obtidos quando se considera o interesse de supervisionar 20 diferentes cenários topológicos, dentre eles o caso-base, mas agora de modo a garantir que se possa utilizar PHASE para depurar erros envolvendo medidas críticas ou conjuntos críticos.

Quantidade		\overline{M}_{UTR}		Desvio	\overline{M}_{c}	rit
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão	Melhor	Média
ue own's		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1	2	26,82	26,82	0	80,76	80,76
2	2, 6	52,25	52,10	3,03	87,50	87,21
3	2,6,9	86,48	86,48	0	94,63	94,63
4	2,6,7,9	97,42	97,41	0	99,12	99,12
5	2,6,7,10,14	98,73	98,73	0	99,52	99,46
10	1,2,3,8,9,10,11,13,14	100	100	0	100	100

Tabela 5.5 – IEEE 14 barras (20 topologias, com depuração de criticalidade)

Os resultados da Tabela 5.5 revelam que apenas com 10 UMFs disponíveis para alocação é possível obter uma solução na qual todas as medidas convencionais serão depuradas por PHASE. Comparando-se com os resultados obtidos nas Tabelas 5.5 e 5.4, pode-se perceber o aumento de complexidade do problema ao se considerar que todas as criticalidades devem ser tratadas em todos os cenários topológicos.

5.3 IEEE 30 BARRAS

O sistema IEEE 30 barras foi submetido a testes para validação da metodologia apresentada no Capítulo 4. As medidas convencionais consideradas são apresentadas na Figura 5.6, sendo um total de 81 medidas: 29 pares de fluxo de potência (ativa-reativa), 10 pares de injeção de potência (ativa-reativa) e 3 medidores de magnitude de tensão. Este sistema de medição apresenta 7 medidas críticas e 22 medidas fazem parte de conjuntos críticos. Nos testes considerando o atendimento a diferentes configurações topológicas, a alocação de UMFs deve otimizar a depuração de erros via PHASE em um total de 32 topologias diferentes, incluindo o caso base. Em sete das topologias consideradas, existe uma redução do número de medidas em relação ao caso base, com consequente perda de observabilidade. Sabe-se que a quantidade mínima de unidades de medição que tornam este sistema observável na topologia do caso base corresponde a 10 UMFs (Bei, Yoon e Abur, 2005).





(●) fluxos de potência, (▲) injeções de potência, (■) magnitudes de tensão

As Tabelas 5.6 a 5.9 apresentam os resultados obtidos após 100 execuções do AE para a alocação das quantidades pré-definidas de UMFs disponíveis para instalação, também indicadas nas tabelas. Tal como no caso do sistema IEEE 14 barras, os melhores resultados são aqueles que maximizam a função aptidão (4.10), (4.11) ou (4.12), conforme o teste realizado. Como anteriormente mencionado, é possível ter diferentes combinações de alocação da mesma quantidade de UMFs que levem ao mesmo valor da função aptidão. As localizações ótimas apresentadas nas tabelas correspondem a uma destas soluções, arbitrariamente escolhida para exibição.

A Tabela 5.6 apresenta os resultados quando se deseja otimizar a alocação da quantidade de UMFs indicada na primeira coluna considerando o interesse de supervisionar o sistema em um único cenário topológico (caso base). Neste caso, a função aptidão considerada é aquela apresentada em (4.10).

Quantidade		$\overline{M}_{U'}$	TR	Desvio
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão
		(%)	(%)	(%)
5	2,6,10,12,24	70,36	69,63	1,12
7	2,4,6,10,12,24,27	85,21	85,05	0,59
8	2,4,6,10,12,18,24,29	92,58	91,65	1,38
10	2,4,6,9,10,12,19,24,26,27	100	98,77	1,51
15	2,4,6,7,9,10,12,15,17,19,21,24,25,27,28	100	100	0

Tabela 5.6 - IEEE 30 barras (alocação para o caso base)

Os resultados mostram o esperado aumento da quantidade de medidas convencionais presentes na região supervisionada por UMF quando é aumentada a quantidade de UMFs disponíveis para alocação. Ao se considerar a alocação de 10 UMFs, foi possível obter ao menos uma solução em que toda a rede é observada apenas com o uso de UMFs e, consequentemente, o modelo PHASE será capaz de depurar todas as medidas convencionais pré-existentes. Tal resultado é coerente com o encontrado na literatura, em que 10 unidades de medição são suficientes para observar toda a rede do sistema IEEE 30 barras, desde que adequadamente localizadas. O diagrama da Fig 5.7, mostra como a alocação de 5 UMFs nas barras 2, 6, 10, 12 e 24 consegue atingir em termos de cobertura o sistema convencional.



Figura 5.7 – IEEE 30 barras: 5 UMFs alocadas nas barras 2, 6, 10, 12 e 24 (Tabela 5.6)

A Tabela 5.7, por sua vez, apresenta os resultados obtidos quando se considerou a necessidade de otimizar a alocação de UMFs para que se tenha o melhor desempenho possível com o modelo PHASE em um total de 32 diferentes cenários topológicos, dentre estes o caso base.

Quantidade		$\overline{M}_{U'_{1}}$	TR	Desvio
de LIMEs	Barras	Melhor	Média	Padrão
ut owns		(%)	(%)	(%)
5	1,6,10,12,24	69,53	69,33	0,59
7	1,5,6,10,12,18,24	84,38	84,18	0,46
8	1,6,7,10,12,19,24,27	91,65	90,77	1,31
10	2,4,6,9,10,12,19,23,26,27	99,22	97,50	1,44
15	2,3,7,8,9,10,12,13,15,19,22,24,25,27,30	100	99,90	0,06

Tabela 5.7 - IEEE 30 barras (alocação considerando 32 topologias)

A metodologia proposta foi capaz de otimizar a alocação das UMFs quando se considera o atendimento a diversos cenários topológicos, com resultados próximos ao obtidos quando apenas o caso base deveria ser atendido. Porém, apesar dos resultados em termos de abrangência da aplicação do modelo PHASE serem próximos, a localização proposta para as UMFs podem ser bem diferentes, conforme pode-se perceber das Tabelas 5.6 e 5.7.

A Tabela 5.8 mostra os resultados obtidos para a alocação de UMFs no cenário topológico base quando a maximização de medidas críticas e conjuntos críticos a serem depurados por PHASE também era de interesse.

Quantidade		\overline{M}_{UTR}		Desvio	\overline{M}_{crit}	
de UMFs	Barras	Melhor (%)	Média (%)	Padrão (%)	Melhor (%)	Média (%)
5	2,4,6,12,19	65,43	63,37	1,49	98,73	98,44
7	2,4,6,12,19,24,27	85,21	84,72	1,63	100	99,46
8	2,4,6,10,12,19, 24,29	92,58	91,75	1,56	100	99,90
10	2,4,6,9,10,12,19, 24,26,29	100	97,99	1,06	100	100
15	2,4,6,8,9,10,12,14, 15,17,19,20,24,26,27	100	99,95	0,025	100	100

Tabela 5.8 - IEEE 30 barras (caso-base, depuração de criticalidades)

Pode-se observar da Tabela 5.8 que a metodologia proposta busca atender prioritariamente o requisito de depuração das medidas críticas e de conjuntos críticos via PHASE. Isto pode ser percebido pela presença de uma maior proporção de medidas críticas e de conjuntos críticos presentes em áreas observáveis por UMF em relação às demais medidas. Comparando-se ainda os resultados das Tabelas 5.8 e 5.6, pode-se perceber a tendência de se ter uma quantidade menor de medidas em áreas observadas por UMF de modo a se ter mais medidas em criticalidades presentes em tais áreas e, consequentemente, depuráveis via PHASE. A Fig. 5.8 apresenta como esta mudança na função objetivo, e neste caso outras as barras que terão um UMFs a elas instalado, altera a cobertura que o sistema fasorial consegue alcançar.



Figura 5.8 – IEEE 30 barras: 5 UMFs alocadas nas barras 2, 4, 6, 12 e 19 (Tabela 5.8)

No último teste realizado para esta rede, a Tabela 5.9 apresenta os resultados considerando o interesse em supervisionar 32 topologias, incluindo o caso base. Neste caso, também se buscou garantir que se possa utilizar PHASE para depurar erros envolvendo medidas críticas ou de conjuntos críticos.

Quantidade	- -	\overline{M}_{UTR}		Desvio	\overline{M}_{c}	rit
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão	Melhor	Média
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
5	3,5,6,12,24	67,01	63,32	1,87	97,41	98,09
7	1,5,6,12,19,24,27	84,22	83,30	1,81	99,66	99,22
8	1,5,6,10,12,19,24,27	91,65	90,82	1,46	99,76	99,66
10	1,5,6,9,10,12,19,23, 25,27	99,21	96,86	1,17	99,85	99,85
15	1,4,5,6,9,10,12,15, 19,22,24,26,27,28,29	100	99,76	0,013	100	100

Tabela 5.9 - IEEE 30 barras (32 topologias, depuração de criticalidades)

5.4 IEEE 57 BARRAS

Teste foram realizados também com o sistema IEEE 57 barras para validação da metodologia proposta. O plano de medição do caso base é formado por 173 medidas, sendo 78 pares de fluxo de potência (ativa-reativa), 5 pares de injeção de potência (ativa-reativa) e 7 medidores de magnitude de tensão. Este sistema de medição apresenta 1 medida crítica e 43 medidas fazem parte de conjuntos críticos. Nos testes considerando o atendimento a diferentes configurações topológicas, a alocação de UMFs deve otimizar a depuração de erros via PHASE em um total de 80 topologias diferentes, incluindo o caso base.

As Tabelas 5.10 a 5.14 apresentam os resultados obtidos após 100 execuções do AE para a alocação das quantidades pré-definidas de UMFs disponíveis para instalação, também indicadas em tais tabelas.

As Tabelas 5.12 e 5.13 representam os resultados em relação a função aptidão (4.11), que além de informarem em suas colunas a mesma ordem de apresentação dos resultados, possuem mais duas colunas indicando o valor máximo e médio do indicador de desempenho \overline{M}_{crit} calculado segundo (4.16).

A Tabela 5.10 apresenta os resultados quando se deseja otimizar a alocação da quantidade de UMFs indicada e considerando o interesse de supervisionar o sistema em um único cenário topológico (caso base). Neste caso, a função aptidão considerada é aquela apresentada em (4.10).

Quantidada		\overline{M}_{UTR}		Desvio
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão
ue own's		(%)	(%)	(%)
5	6,12,15,38,41	49,71	48,22	2,06
10	1,4,9,20,24,29,32,38,41,46	76,32	72,36	1,82
15	1,4,9,15,20,24,29,32,36,38,41,46,51,53,57	93,07	87,84	2,36
17	1,4,9,15,20,24,26,29,32,34,36,38,41,46,51,	08 24	01.00	1.88
17	54,57	90,24	91,99	1,00
18	1,4,9,11,15,20,22,26,29,30,33,35,37,	100	93,95	2.64
10	38,47,51,54,56	100		2,04
10	3,6,11,12,15,19,22,25,27,31,32,34,37,	100	95,95	2.09
17	38,46,50,52,55,56	100		2,07
20	2,4,9,11,12,14,15,20,22,25,27,29,32,36,	100	96.88	1 99
20	38,46,51,54,56,57	100	70,00	1,77
25	1,6,9,10,13,15,19,21,24,28,30,31,32,35,36,	100	99.76	0.69
25	39,41,43,44,45,46,49,52,55,56	100	<i>))</i> ,10	0,07
30	1,3,6,7,8,9,10,12,13,15,17,19,21,23,27,28,	100	100	0
50	29,30,32,34,37,38,40,41,47,49,50,51,54,56	100	100	0

Tabela 5.10 – IEEE 57 barras (caso base)

Mais uma vez, os resultados mostram que a quantidade de medidas convencionais presentes na região supervisionada por UMF aumenta quando é aumentada a quantidade de UMFs disponíveis para alocação. Ao se considerar a alocação de 18 UMFs, toda a rede pode ser observada apenas com o uso de UMFs e, consequentemente, o modelo PHASE será capaz de depurar todas as medidas convencionais pré-existentes.

A Tabela 5.11, por sua vez, apresenta os resultados obtidos quando se considerou a necessidade de otimizar a alocação de UMFs para que se tenha o melhor desempenho possível com o modelo PHASE em um total de 80 diferentes cenários topológicos, dentre estes o caso base.

Quantidada		\overline{M}_U	Desvio	
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão
ut own s		(%)	(%)	(%)
5	12,15,24,38,41	48,05	47,61	1,28
10	1,4,9,20,24,29,32,38,46,56	75,78	70,65	2,05
15	1,4,9,15,20,24,25,28,32,36,38,41,51,53,57	92,72	87,40	2,17
17	1,6,10,11,15,19,22,26,29,30,	00.61	01 00	2 11
17	32,36,45,46,49,54,56	<i>))</i> ,01	91,99	2,77
18	1,4,8,12,15,20,24,25,27,29,32,	99.70	03 51	2.13
10	36,38,39,41,47,51,54	<i>))</i> ,70	<i>)3</i> , <i>3</i> 1	2,13
10	1,4,7,9,17,20,24,25,27,32,36,	00 71	94,97	2.14
17	37,38,41,45,46,51,53,56	<i>))</i> ,/1		2,14
20	1,4,7,8,9,12,15,20,24,27,30,32,	00.85	96.24	1.85
20	36,38,41,47,50,53,56,57	<i>))</i> ,03	70,24	1,05
25	1,4,7,9,10,11,12,15,17,20,21,24,27,	100	00 75	0.53
20	29,31,33,34,36,37,38,46,49,53,56,57	100	77,13	0,35
30	1,2,4,8,9,10,12,13,15,19,20,21,22,23,25,	100	100	0
50	27,29,30,31,32,35,37,38,40,41,47,50,53,55,56	100	100	U

Tabela 5.11 – IEEE 57 barras (alocação considerando 80 topologias)

A metodologia proposta foi capaz de alocação de modo otimizado as UMFs quando se considera o atendimento dos 80 cenários topológicos. Porém, diferente do que se constatou quando da alocação de UMFs para atender somente ao caso base (Tabela 5.10), os resultados da Tabela 5.11 mostram que não foi possível observar todos os cenários de interesse quando apenas 18 UMFs estavam disponíveis para alocação.

A Tabela 5.12 mostra os resultados obtidos para a alocação de UMFs no cenário topológico base quando a maximização de medidas críticas e conjuntos críticos a serem depurados por PHASE também era de interesse.

Quantidada	Barras	\overline{M}_{UTR}		Desvio \overline{M}_{crit}		rit
de UMFs		Melhor	Média	Padrão	Melhor	Média
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
5	6,12,15,38,41	49,71	45,09	3,36	80,71	82,22
10	1,4,9,20,24,29,35,38,	74,56	69,38	3,79	90,97	89,84
	46,56					
15	1,4,9,15,20,24,29,32,	93,07	87,06	2,98	97,56	95,50
	36,37,38,41,47,51,56					
	1,6,10,11,15,19,22,26,	97,70	91,80	2,82	98,83	96,97
17	29,30,33,35,38,49,54,					
	56,57					
18	1,4,9,10,15,20,24,28,	100	93,89	2,40	100	97,75
	29,31,35,37,38,43,46,					
	49,54,56					
	1,4,6,10,20,24,25,27,	100	95,41	2,59	100	98,49
19	32,36,38,39,41,44,46,					
	48,49,52,54					
20	1,4,7,12,15,19,21,24,	100	96,77	2,13	100	98,97
	28,30,33,35,37,38,41,					
	46,51,53,55,56					
	1,4,6,9,11,12,13,15,16,	100	99,76	0,72	100	99,85
25	20,22,24,25,26,29,32,					
	34,36,37,44,46,48,51,					
	54,56					
30	2,4,9,10,11,12,13,14,15,	100	100	0	100	100
	19,21,22,24,27,29,30,					
	32,33,36,37,38,40,42,					
	44,45,46,47,51,53,56					

Tabela 5.12 – IEEE 57 barras (caso base, depuração de criticalidades)

Dos resultados da Tabela 5.12 é possível perceber que se busca uma relação de compromisso entre ter a maior quantidade possível de medidas incluídas em áreas observadas por UMF e se buscar entre estas ter o maior número possível de medidas críticas e de conjuntos

críticos. Nota-se ainda que as localizações das UMFs tendem a apresentar diferenças em relação às mostradas na Tabela 5.10, por influência do termo referente às criticalidades na função aptidão.

Por fim, a Tabela 5.13 apresenta os resultados para a supervisão de 80 topologias de interesse, incluindo o caso base. Neste caso, também se buscou garantir que se possa utilizar PHASE para depurar erros envolvendo medidas críticas ou de conjuntos críticos.

Quantidada	Barras	\overline{M}_{UTR}		Desvio	\overline{M}_{crit}	
de UMFs		Melhor	Média	Padrão	Melhor	Média
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
5	6,12,15,38,41	44,20	44,09	2,66	84,47	83,35
10	1,4,9,20,24,29,35,38,	75.24	68,75	3,31	91,41	90,53
	46,56	73,24				
15	1,4,9,15,20,24,29,32,	91,40	86,47	2,88	98,30	95,95
	36,37,38,41,47,51,56					
	1,6,10,11,15,19,22,26,2					
17	9,30,33,35,38,49,54,56,	96,88	90,67	2,75	99,71	97,22
	57					
18	1,4,9,10,15,20,24,28,					
	29,31,35,37,38,43,	99,51	92,53	2,55	99,90	97,71
	46,49,54,56					
	1,4,6,10,20,24,25,27,					
19	32,36,38,39,41,44,	99,61	94,09	2,60	99,90	98,39
	46,48,49,52,54					
	1,4,7,12,15,19,21,24,					
20	28,30,33,35,37,38,	99,76	95,46	2,15	99,90	98,87
	41,46,51,53,55,56					
	1,4,6,9,11,12,13,15,16,	99,90	99,51	0,73	100	99,95
25	20,22,24,25,26,29,32,3					
	4,36,37,44,46,					
	48,51,54,56					
30	2,4,9,10,11,12,13,14,15	100	99,90	0,07	100	100
	,19,21,22,24,27,					
	29,30,32,33,36,37,					
	38,40,42,44,45,46,					
	47,51,53,56					

Tabela 5.13 – IEEE 57 barras (80 topologias com depuração de criticalidades)

Comparando-se com os resultados da Tabela 5.11, é possível notar que se tende a ter uma quantidade menor de medidas incluídas em áreas observadas por UMF de modo a que nelas esteja incluída a maior quantidade possível de medidas críticas e de conjuntos críticos. Mais uma vez se observa que o requisito de abranger o maior número possível de medidas em criticalidades faz com que as localizações das UMFs tendam a apresentar diferenças em relação às mostradas na Tabela 5.11.

5.5 IEEE 118 BARRAS

O sistema IEEE 118 barras foi testado somente com a configuração topológica do caso base, considerando uma alocação de UMFs que deve otimizar a depuração de erros via PHASE. O plano de medição convencional é formado por 352 medidas, sendo 176 pares de fluxo de potência (ativa-reativa). Este sistema apresenta 9 medidas críticas e 40 medidas fazem parte de conjuntos críticos.

A Tabela 5.14 apresenta os resultados quando se deseja otimizar a alocação da quantidade de UMFs indicada e considerando o interesse de supervisionar o sistema em um único cenário topológico (caso base). Neste caso, a função aptidão considerada é aquela apresentada em (4.10), executadas 100 vezes pelo AE.

Quantidada		\overline{M}_{UTR}		Desvio
de UMFs	Barras	Melhor	Média	Padrão
		(%)	(%)	(%)
10	5,12,17,37,49,56,77,80,85,94	42,61	41,15	0,72
15	5,12,15,17,32,37,49,59,	59.09	56,13	0,89
	65,70,77,80,85,92,100	57,07		
20	5,12,19,23,30,32,37,49,	71 59	68 17	1,14
	54,59,62,68,71,77,85,92,96,100,105,110	71,57	00,17	
25	5,11,12,19,30,32,34,37,45,49,56, 62,	80.68	77 37	1,28
	64,68,70,71,75,77,80,85,90,92,94,103,105	00,00	11,51	

Tabela 5.14 – IEEE 118 barras (caso base)

Neste teste, diferente do que ocorreu para os sistemas IEEE 14, 30 e 57, em nenhum caso é possível observar toda a rede apenas com medidas de UMFs. Esta é uma situação que é observada em sistemas reais e de maior dimensão, para os quais a observação completa da rede

utilizando somente medidas de UMFs requer que uma quantidade mais elevada de tais unidades de medição estejam disponíveis.

Em (Guimaraes, 2015), quando foi confirmada a capacidade de depuração de erros proporcionada por PHASE, alocou-se arbitrariamente uma certa quantidade de UMFs na rede, sem se ter a preocupação de maximizar o aproveitamento do modelo PHASE. A Tabela 5.15 apresenta uma análise comparativa do alcance do modelo PHASE para UMFs localizadas utilizando a metodologia proposta com o alcance de PHASE quando as localizações são aquelas consideradas em (Guimaraens, 2015). Nos dois casos a mesma quantidade de UMFs são alocadas. Na tabela 5.15 são apresentados resultados comparativos para o sistema IEEE 118.

	Aptidão	Aptidão Metodologia		
Quantida da UNEs	(GUIMARAENS, 2015)	Proposta		
Quantidade de UMFS	\overline{M}_{UTR}	\overline{M}_{UTR}		
	Melhor (%)	Melhor (%)		
10	25	42,61		

Tabela 5.15 – Análise comparativa sistema IEEE 118

Os resultados da Tabela 5.15 mostram a eficácia da metodologia proposta, a qual busca localizar as UMFs de forma a se ter o máximo aproveitamento da capacidade de depuração de PHASE. Logo, a metodologia proposta permite o melhor aproveitamento possível das UMFs a serem alocadas na rede, uma vez que a depuração de erros é a etapa mais crítica no processo de EE. As Figs. 5.9 e 5.10 apresentam o diagrama IEEE 118 barras com as coberturas (área em vermelho) de cada aptidão, a Fig 5.9 mostra que o sistema fasorial aplicado está concentrado na área esquerda do diagrama. A Fig. 5.10 mostra que o espalhamento de UMFs na rede gerou 4 áreas de cobertura do sistema convencional.


Figura 5.9 – IEEE 118 barras: 10 UMFs – Aptidão Guimaraens



Figura 5.10 – IEEE 118 barras: 10 UMFs – Aptidão Metodologia Proposta

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Historicamente, a EE em sistemas de potência vem se estabelecendo como uma função essencial para que se tenha uma operação segura das redes de transmissão de energia elétrica. Isto se deve ao papel da EE em obter o estado mais provável de operação de tais redes, permitindo a sua supervisão e servindo de ponto de partida para a realização de diversos estudos empregando-se funções avançadas de análise presentes em Centros de Operação de Sistemas (COS). A literatura técnica na área de EE é muito extensa, cobrindo desde a modelagem matemática do problema até sua implementação em COS. Apesar de ser um tema de pesquisa maduro, a EE é vista como uma função avançada, em certos aspectos bem estabelecida e em outros ainda em construção. Dentre as diversas etapas envolvidas na EE, a depuração e erros nos dados figura como uma das mais importantes e a que mais apresenta desafios para o sucesso do processo de estimação.

Com a utilização recente de UMFs, que permitem a obtenção sincronizada de tensões nodais e correntes de ramos da rede, em magnitude e ângulo de fase, diversos aspectos relacionados à EE necessitam ser reconsiderados, entre estes: observabilidade e alocação de pontos de medição; precisão e confiabilidade de estimativas; processamento de EGs em medidas, parâmetros e configuração da rede.

A introdução de unidades de medição fasorial em redes de energia elétrica tende a se intensificar nos próximos anos e o seu efeito na rede vem sendo estudado por diversos pesquisadores. Tais estudos buscam avaliar o benefício que tal tecnologia pode trazer para as mais diferentes aplicações voltadas para o planejamento e operação de sistemas de potência. Esta Dissertação focou especificamente nos benefícios para a função estimação de estado, voltada para a supervisão em tempo real de sistemas de potência, particularmente no que tange à capacidade de depuração de erros grosseiros em medidas. Sabe-se que estimadores que empregam medidas de UTRs e UMFs podem ter sua capacidade de depuração de erros, simples ou múltiplos, substancialmente aumentada, quando se emprega o modelo PHASE para realizar tal depuração. A metodologia proposta neste trabalho buscou, portanto, otimizar a alocação de UMFs de modo a maximizar a capacidade de depuração de erros proporcionada por PHASE em redes elétricas que já dispõem de medição convencional advindas de UTRs. Para tal, foi empregado um algoritmo evolucionário no qual a aptidão dos indivíduos é avaliada com base na quantidade de medidas que podem ser corretamente depuradas para uma dada alocação de UMFs. Foram construídas funções de aptidão que levam em consideração diversos aspectos de interesse prático. As principais características a serem destacadas sobre o trabalho desenvolvido são:

- Consideração da disponibilidade de uma quantidade limitada de UMFs para alocação, assumindo a hipótese realista de que o investimento em UMFs será gradual por parte das companhias de energia elétrica;
- Definição de funções de aptidão afinadas com as características de tratamento de erros nos dados proporcionada pelo modelo PHASE;
- Consideração da necessidade da EE atender a diversas configurações de rede que o sistema de potência pode experimentar durante sua operação; e
- Modelagem do requisito de tratamento de erros em medidas críticas e de conjuntos críticos via PHASE, em conjunto com os demais objetivos.
- Flexibilidade da metodologia para representar na função aptidão os requisitos desejados para o problema.

Testes foram realizados com os sistemas IEEE 14, 30, 57 e 118 barras, considerando a disponibilidade de diferentes quantidades de UMFs para alocação em redes que já dispunham de um plano de medição convencional, alguns deles apresentando pontos com condição crítica de redundância. Nos testes foram considerados também situações nas quais diferentes configurações da rede elétrica deveriam ser atendidas pela EE. Os resultados obtidos mostram que a metodologia proposta proporciona uma alocação de UMFs que possibilita empregar o modelo PHASE para a depuração de erros na maior quantidade possível de medidas. Além disso, as soluções encontradas indicaram que os requisitos de supervisão e depuração de erros em diferentes cenários topológicos, bem como de tratamento de erros em dados críticos, foram adequadamente modelados.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Dentre os trabalhos de pesquisa possíveis em continuidade ao realizado nesta Dissertação, vislumbra-se os seguintes:

- Exploração de outras meta-heurísticas para aplicação ao problema de alocação ótima de UMFs.
- Modelagem do requisito de processamento de erros em medidas que compõem criticalidades de maior cardinalidade, no caso de sistemas de medição convencionais muito redundantes.
- Alocação ótima de UMFs com o objetivo de permitir o tratamento de outros tipos de erro, como o erro em parâmetros da rede, o que pode ser importante na fase de comissionamento da função EE.
- Otimização da alocação de UMFs buscando o objetivo conjunto de beneficiar a EE e a monitoração do desempenho dinâmico da rede, para o qual o emprego de UMFs é apontado como bastante atrativo.
- Introdução de outros objetivos, aplicando na meta-heurística um bausca multi-objetivo, como não consideração de barras terminais no processo de busca de solução.

REFERÊNCIAS

ABUR, A.; EXPOSITO, A. G. **Power system state estimation:** theory and implementation. [S.l.]: CRC press, 2004.

BACK, T. Evolutionary algorithms in theory and practice: evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. [S.l.]: Oxford university press, 1996.

BEI, X.; YOON, Y. J.; ABUR, A. Optimal placement and utilization of phasor measurements for state estimation. **PSERC Publication**, p. 5-20, 2005.

BI, T. S.; QIN, X. H.; YANG, Q. X. A novel hybrid state estimator for including synchronized
phasor measurements. Electric Power Systems Research, v. 78, p. 1343-1352, 2008. ISSN
ISSN:ISSN:0378-7796.Oisponivelem:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779607002374>.

DO COUTTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S. Forecasting-Aided State Estimation 2014;Part I: Panorama. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, p. 1667-1677, nov. 2009. ISSN ISSN: 0885-8950.

DO COUTTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S.; FREUND, R. S. Forecasting-Aided State Estimation 2014;Part II: Implementation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 24, p. 1678-1685, nov. 2009. ISSN: 0885-8950.

DO COUTTO FILHO, M. B.; SOUZA, J. C. S.; TAFUR, J. E. V. Quantifying Observability in State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 28, p. 2897-2906, ago. 2013. ISSN ISSN: 0885-8950.

GUIMARAENS, M. A. R. Supressão De Erros Grosseiros De Medição Através Da Cooperação Entre Estimadores De Estado Independentes. Tese - Universidade Federal Fluminense. [S.1.]. 2015.

IEEE. Standard for Synchrophasers for Power Systems. Std 1344-1995(R2001), 1995.

IEEE. Standard for Synchrophasors for Power Systems. Std C37.118-2005 (Revision of IEEE Std 1344-1995), p. 1-57, 2006.

IEEE. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems. Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), p. 1-61, dez. 2011a.

IEEE. Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems. Std C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005), p. 1-53, dez. 2011b.

MONTICELLI, A. **State estimation in electric power systems:** a generalized approach. [S.l.]: Springer Science & Business Media, v. 507, 1999.

MONTICELLI, A. Electric power system state estimation. **Proceedings of the IEEE**, v. 88, p. 262-282, fev. 2000. ISSN: 0018-9219.

MONTICELLI, A.; WU, F. F. Network Observability: Theory. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-104, p. 1042-1048, maio 1985. ISSN: 0018-9510.

ONS. Sistema de Medição de Sincrofasores. Procedimentos de Rede, Submódulo 11.8, 2017.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Synchronized phasor measurements and their applications**. [S.l.]: Springer, v. 1, 2008.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S.; KARIMI, K. J. State Estimlation with Phasor Measurements. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 1, p. 233-238, fev. 1986. ISSN ISSN: 0885-8950.

SCHWEPPE, F. C.; WILDES, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-89, p. 120-125, jan. 1970. ISSN: 0018-9510.

SILVA, A. M. L.; DO COUTTO FILHO, M. B.; QUEIROZ, J. F. State forecasting in electric power systems. **IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution**, v. 130, p. 237-244, set. 1983. ISSN ISSN: 0143-7046.

STEINMETZ, C. P. Complex quantities and their use in electrical engineering. **Proceedings of the International Electrical Congress**, Chicago, August 1893. 33-74.

TAFUR J. E. V., R. H. R. O. M. E. B. M. S. J. C. S. D. D. C. F. M. B. Heurística Grasp Aplicada Ao Planejamento De Sistemas De Medição Para A Supervisão De. **SBIC**, 2007.

VALVERDE, G. et al. A Constrained Formulation for Hybrid State Estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 26, p. 1102-1109, ago. 2011. ISSN ISSN: 0885-8950.