



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus Soares Marco

**Estratégias para Dimensionamento e Aplicação de Buffer de Medidas
Fasoriais no Aprimoramento da Estimação Híbrida de Estados em Sistemas
de Potência**

Florianópolis
2023

Matheus Soares Marco

Estratégias para Dimensionamento e Aplicação de Buffer de Medidas Fasoriais no Aprimoramento da Estimação Híbrida de Estados em Sistemas de Potência

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marco, Matheus Soares

Estratégias para Dimensionamento e Aplicação de Buffer de Medidas Fasoriais no Aprimoramento da Estimação Híbrida de Estados em Sistemas de Potência / Matheus Soares Marco ; orientador, Antonio José Alves Simões Costa, 2023.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Estimação de Estados em Sistemas de Potência. 3. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores. 4. Buffer de Medidas Fasoriais. I. Simões Costa, Antonio José Alves. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Matheus Soares Marco

Estratégias para Dimensionamento e Aplicação de Buffer de Medidas Fasoriais no Aprimoramento da Estimativa Híbrida de Estados em Sistemas de Potência

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 11 de dezembro de 2023.

Prof. Miguel Moreto, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Antonio José Alves Simões Costa, Ph.D.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Felipe da Cunha de Aquino, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Enga. Eletric. Larah Brüning Ascari, Dra.
Operador Nacional do Sistema Elétrico

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que estiveram ao meu lado ao longo desta trajetória. Primeiramente, agradeço imensamente à minha família, cujo apoio inabalável e amor incondicional foram pilares fundamentais durante todo esse período. Agradeço especialmente à minha esposa pelo constante estímulo, compreensão e paciência, e aos meus filhos, que foram fontes inesgotáveis de inspiração e motivação.

Aos meus estimados professores, sou imensamente grato por compartilharem seus conhecimentos, orientações e conselhos ao longo desta jornada. Suas palavras sábias e dedicação foram fundamentais para o meu crescimento acadêmico e pessoal. Agradeço também aos meus colegas de classe, cuja camaradagem, apoio mútuo e espírito colaborativo tornaram esta jornada acadêmica mais leve e significativa.

Gostaria de expressar minha sincera gratidão ao Professor Antonio José Alves Simões Costa. Sua orientação e dedicação foram essenciais para o meu progresso acadêmico. Suas aulas não só enriqueceram meu conhecimento, mas também me inspiraram profundamente. Agradeço pela sua contribuição fundamental ao meu crescimento como estudante.

Por fim, um agradecimento especial aos meus colegas de trabalho, que me auxiliaram de todas as maneiras possíveis, realizando trocas e inversões de turno sempre que precisei, muitas vezes deixando de lado suas prioridades para permitir que eu realizasse esse sonho, sou imensamente grato a todos vocês por fazerem parte desta jornada e por todo apoio e incentivo.

RESUMO

Neste trabalho busca-se dimensionar um *buffer* de medidas fasoriais para aproveitamento do grande volume de medidas geradas pelo Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF) entre os intervalos de execução da Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP). Para isso, utilizam-se métodos que permitem determinar o instante de tempo em que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) altera significativamente seu ponto de operação. Dessa forma, é possível dimensionar um *buffer* que contenha as medidas realizadas pelo SMSF que ainda mantenham correlação com o último estado observado do SEP. Através desse processo, pretende-se elevar a qualidade das medidas fasoriais fornecidas para execução da EESP e conseqüentemente aprimorar seus resultados. Além disso, neste trabalho são analisados os principais pontos relacionados aos sistemas de aquisição de dados (SCADA e SMSF) utilizados para realização da EESP. Também é apresentada uma revisão sucinta que contempla os tópicos fundamentais do processo de estimação de estados, incluindo técnicas híbridas de integração de medidas SCADA e SMSF. Em seguida, são apresentadas as estratégias e técnicas adotadas para dimensionamento e aplicação do *buffer* de medidas fasoriais na EESP. Por fim, os métodos adotados são avaliados através de simulações, visando determinar a aderência das técnicas ao objetivo proposto. Os resultados das simulações realizadas revelam uma melhora substancial na qualidade das medidas sincrofatorias utilizadas no processo de EESP e conseqüentemente nos resultados da própria estimação de estados.

Palavras-chave: Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP); Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF); *Buffer* de medidas fasoriais.

ABSTRACT

In this work, we aim at dimensioning a phasor measurement buffer in order to take advantage of the large volume of measurements acquired from Synchronized Phasor Measurement Systems (SPMS) between intervals of execution of Power System State Estimation (SE). To achieve this, methods are employed that allow determining the instant of time at which power system significantly changes its operating point. Thus, it is possible to size a buffer that contains the synchrophasor measurements which still maintain correlation with the last observed power system state. Through this process, we intend to enhance the quality of the phasor measurements used as input data to the SE process, and consequently improve its results. Also, this work analyzes key points related to data acquisition systems (SCADA and SPMS) used for SE execution. Then, we conducted a concise review covering fundamental topics related to the state estimation process, including hybrid techniques for integrating SCADA and SPMS measurements. Next, we exploit strategies and techniques for sizing and utilizing the phasor measurement buffer in SE. Finally, we apply the developed methods through simulations to assess their adherence to the proposed objective. The simulations reveal a substantial improvement in the quality of SPMS measurements used in the SE process, which in turn enhances the results of SE itself.

Keywords: Power System State Estimation (SE); Synchronized Phasor Measurement System (SPMS); Phasor measurement buffer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais elementos de uma UMF	18
Figura 2 – Sistema de medição sincronizada de fasores (SMSF).	19
Figura 3 – Diagrama de transição de estados de operação de um sistema de potência.	22
Figura 4 – Principais aplicativos da operação em tempo real.	23
Figura 5 – Funções que compõe a estimação de estados.	24
Figura 6 – Método híbrido simultâneo	29
Figura 7 – Função densidade de probabilidade da distribuição t de Student	36
Figura 8 – Fluxo de dados em uma única simulação	41
Figura 9 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 75%	48
Figura 10 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 100%	48
Figura 11 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 125%	48
Figura 12 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 75%	49
Figura 13 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 100%	49
Figura 14 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 125%	49
Figura 15 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso base	51
Figura 16 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso base	51
Figura 17 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso base	52
Figura 18 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso base	52
Figura 19 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso base	53
Figura 20 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso base	53
Figura 21 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso base	54
Figura 22 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso base	54
Figura 23 – Curva de variação de potência ativa e reativa - Caso 1	55
Figura 24 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso 1	55
Figura 25 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso 1	56
Figura 26 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso 1	56
Figura 27 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso 1	57
Figura 28 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso 1	57
Figura 29 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso 1	57
Figura 30 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso 1	58
Figura 31 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso 1	58
Figura 32 – Curva de variação de potência ativa e reativa - Caso 2	59
Figura 33 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso 2	59
Figura 34 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso 2	60
Figura 35 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso 2	60
Figura 36 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso 2	61
Figura 37 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso 2	61

Figura 38 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso 2	61
Figura 39 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso 2	62
Figura 40 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso 2	62
Figura 41 – Sistema-teste IEEE 57 barras	68
Figura 42 – Sistema-teste IEEE 118 barras	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Tabela contendo os valores de t_0 para o teste t de Student	35
Tabela 2	– Resumo do procedimento para determinação da matriz $Z_{t_{buff}}$	38
Tabela 3	– Resumo do procedimento para determinação da matriz $Z_{s_{buff}}$	39
Tabela 4	– Parâmetros do sistema elétrico de potência	46
Tabela 5	– Média de Medidas fasoriais válidas	50
Tabela 6	– Erros absolutos associados ao caso base	63
Tabela 7	– Erros absolutos associados ao caso 1	63
Tabela 8	– Erros absolutos associados ao caso 2	63
Tabela 9	– Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso base	64
Tabela 10	– Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso 1	64
Tabela 11	– Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso 2	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPA	Bonneville Power Administration
CD	Concentrador de Dados
CDF	Concentrador de Dados Fasoriais
COS	Centro de Operação do Sistema
EESP	Estimação de Estados em Sistemas de Potência
GPS	<i>Global Positioning System</i>
LABSPOT	Laboratório de Sistemas de Potência
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SCADA	<i>Supervisory Control And Data Acquisition</i>
SE	Subestação de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMSF	Sistema de Medição Sincronizada de Fasores
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UMF	Unidade de Medição Fasorial
UTR	Unidade Terminal Remota

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	AQUISIÇÃO DE DADOS PARA REALIZAÇÃO DA ESTI- MAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA . .	16
2.1	AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO SISTEMA SCADA	16
2.1.1	Erros de Medição Associados ao sistema SCADA	17
2.1.2	Taxas de Amostragem do Sistema SCADA	18
2.2	AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO SMSF	18
2.2.1	Erros de Medição Associados ao SMSF	19
2.2.2	Taxa de Amostragem do SMSF	20
3	ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA	21
3.1	ESTADOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA	21
3.2	FUNÇÕES COMPONENTES DA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL .	23
3.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA EESP	25
3.4	SOLUÇÃO DA EESP ATRAVÉS DA EQUAÇÃO NORMAL DE GAUSS	27
3.5	ESTIMADORES DE ESTADO COM MÚLTIPLOS SENSORES . . .	28
4	DETERMINAÇÃO DO BUFFER DE MEDIDAS FASORIAIS ÓTIMO	31
4.1	CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS DE MEDI- DAS SINCRÓFASORIAIS	31
4.2	TESTES ESTATÍSTICOS APLICADOS	32
4.3	DETERMINAÇÃO DO VETOR DE MEDIDAS FASORIAIS PARA UTILIZAÇÃO NA ESTIMAÇÃO HÍBRIDA DE ESTADOS	37
5	SIMULAÇÕES	40
5.1	PROCEDIMENTOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES	40
5.2	VARIÂNCIAS DAS MEDIDAS SIMULADAS	44
5.3	PLANOS DE MEDIÇÃO	45
5.4	MÉTRICA DE TENSÃO	46
5.5	SISTEMAS-TESTE IEEE	46
5.6	NÚMERO DE SIMULAÇÕES REALIZADAS	47
5.7	LIMIARES DO TESTE DO DESVIO-PADRÃO	47
5.8	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE DO DESVIO DA MÉDIA	50
5.9	CASO BASE - CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO ESTÁTICA	51
5.9.1	Medidas Fasoriais Válidas - Caso Base - Condição de Operação Estática	51
5.9.2	Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso Base - Condição de Operação Estática	52
5.9.3	Métricas de Tensão - Caso Base - Condição de Operação Estática	53

5.10	CASO 1	54
5.10.1	Medidas Fasoriais Válidas - Caso 1	55
5.10.2	Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso 1	56
5.10.3	Métricas de Tensão - Caso 1	58
5.11	CASO 2	59
5.11.1	Medidas Fasoriais Válidas - Caso 2	59
5.11.2	Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso 2	60
5.11.3	Métricas de Tensão - Caso 2	62
5.12	ANÁLISE DOS RESULTADOS	63
6	CONCLUSÃO	65
	REFERÊNCIAS	66
	ANEXO A – Sistemas-Teste Padrão IEEE	68

1 INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento e o conseqüente aumento da complexidade dos sistemas elétricos de potência, diversas ferramentas têm sido desenvolvidas e implementadas ao longo do tempo. A monitoração e análise de segurança por exemplo, se tornaram funções primordiais para o bom desempenho da operação em tempo real desses sistemas, e a estimação de estados ganhou destaque por dar suporte a essas funções.

Como veremos ao longo desse trabalho, o estimador de estados é o responsável por estimar as magnitudes e as fases das tensões (estados) das barras que compõe os sistemas de potência. Com isso, é possível calcular com maior precisão as diversas grandezas de interesse, como injeções de potência ativa e reativa das barras, fluxos de potência ativa e reativa das linhas de transmissão, etc. Essas informações são posteriormente utilizadas para a supervisão e controle desses sistemas.

Tradicionalmente, o estimador de estados obtém as informações necessárias para sua execução através do sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*), que realiza a interface entre as informações obtidas da rede e os centros de controle. Há algum tempo, está sendo incorporado às redes elétricas de potência, o Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF), que permite a obtenção direta de fasores de tensão e corrente nos pontos medidos. Uma das vantagens das medidas sincrofásoriais é a viabilização do uso de modelos lineares para a determinação das variáveis de estado da rede elétrica.

O SMSF apresenta outras características superiores ao sistema SCADA, tais como, a maior taxa de aquisição de dados e a melhor precisão das medidas adquiridas. É importante destacar que, por questões técnicas e financeiras, não é em geral viável substituir todo sistema SCADA existente. Por essa razão, o SMSF está sendo incorporado aos sistemas de supervisão tradicionais de maneira gradual.

Diversas estratégias de integração entre os sistemas têm sido avaliadas. Normalmente, para realização do processo de estimação de estados são utilizadas as últimas medidas válidas obtidas de cada sistema (SCADA e SMSF). Neste trabalho, propõe-se a aplicação de técnicas para melhorar o aproveitamento da elevada taxa de aquisição de dados do SMSF frente ao sistema SCADA, utilizando o grande volume de medidas fasoriais adquiridas entre os intervalos da estimação de estados. Isto envolve a criação de um *buffer* de medidas fasoriais ótimo, contendo todas as medidas do intervalo considerado que não tiveram suas características alteradas pelas variações naturais do sistema de potência. Com isso, pretende-se aprimorar a precisão e a confiabilidade dos dados disponíveis para o processo de estimação de estados em sistemas de potência (EESP).

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é contribuir para a melhoria da qualidade da estimação híbrida de estados em sistemas de potência, através da aplicação de técnicas e estratégias que permitam a utilização das diversas medidas adquiridas pelo SMSF, entre os intervalos de realização do processo de EESP. Para tanto, elencou-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Desenvolver um aplicativo capaz de simular o comportamento de sistemas de potência em tempo real, simulando as principais variações que ocorrem nesses sistemas. Para isso, tornou-se necessário aprimorar os aplicativos disponibilizados pelo LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), de modo que a variação natural dos sistemas analisados possa ser simulada através da aplicação de pequenas variações nas potências ativas e reativas das cargas instaladas em suas barras;
- b) Avaliar as principais técnicas e estratégias existentes para o dimensionamento e aplicação de *buffer* de medidas fasoriais ótimo à estimação híbrida de estados em sistemas de potência;
- c) Desenvolver outras funções (aplicativos) que possibilitem a realização de uma comparação direta entre a qualidade das medidas que compõem o *buffer* de medidas fasoriais ótimo e a qualidade das medidas fasoriais obtidas do último estado do sistema (última variação nas potências). Com isso, pretende-se verificar se as estratégias e técnicas implementadas atingiram o objetivo de melhorar a precisão das medidas fasoriais utilizadas na EESP;
- d) Através dos aplicativos desenvolvidos, realizar simulações do processo de EESP utilizando o *buffer* de medidas fasoriais ótimo, e comparar sua eficácia com o processo de EESP que emprega apenas as últimas medidas obtidas do SMSF. Essa comparação permitirá avaliar se as estratégias e técnicas implementadas foram bem sucedidas e cumpriram o objetivo geral proposto.

No segundo capítulo deste trabalho é realizada uma análise dos principais sistemas de aquisição de dados para a EESP, sendo detalhadas as principais características dos sistemas SCADA e SMSF. No capítulo seguinte, é realizada uma revisão teórica dos principais aspectos do processo de EESP. Após ter sido apresentada uma visão global do processo, é então introduzida a nova função desenvolvida durante esse trabalho.

No quarto capítulo, exploram-se os principais desafios e as estratégias propostas para determinação e aplicação do *buffer* de medidas fasoriais ótimo à EESP. No Capítulo 5 é realizada uma análise aprofundada do processo de simulação empregado. Além disso, são apresentados os diversos resultados obtidos através das simulações efetuadas, e uma análise dos objetivos alcançados através da aplicação das diversas técnicas sugeridas. Por fim, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho.

2 AQUISIÇÃO DE DADOS PARA REALIZAÇÃO DA ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

As entradas necessárias para a execução da Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP), são os parâmetros da rede (resistência, reatância série, etc.), a topologia da rede, que indica como as linhas de transmissão, barras, bancos de capacitores, etc. estão conectados entre si no sistema, bem como, a localização e o *status* (aberto ou fechado) das chaves e disjuntores da rede. Além dessas informações, é necessário um conjunto de telemidas, obtidas diretamente das Subestações de Energia Elétrica (SE) através de sensores destinados a esse fim. A partir desses dados, é possível estimar as tensões complexas das barras do sistema, gerando, dessa forma, as informações necessárias para tomada de decisão dos operadores de tempo real (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002).

Tradicionalmente, é utilizado para realização das funções de supervisão e controle dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP) o sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Esse sistema coleta medidas digitais, como o *status* de chaves e disjuntores, e analógicas, tais como medidas de fluxos de potência ativa, potência reativa e corrente nos ramos; e ainda, medidas de injeção de potência ativa, injeção de potência reativa e magnitude das tensões nas barras. Como essas medidas não são sincronizadas, não é possível medir diretamente os fasores de tensão das barras, sendo necessário a utilização de um estimador de estados, que dispõe de métodos matemáticos para determinar esses valores.

Conforme Eder e Simões-Costa (2014), há algum tempo foi incorporado ao setor elétrico, o Sistema de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF). Esse sistema é composto, basicamente, por dois elementos, as Unidades de Medição Fasoriais (UMF) e o Concentrador de Dados Fasoriais (CDF). Esses elementos combinados são capazes de realizar medições dos fasores de tensão e corrente com uma referência temporal comum, utilizando para isso, o sistema GPS (*Global Positioning System*) ou outro sistema compatível, como o BEIDOU, GALILEO, GLONASS, etc.

2.1 AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO SISTEMA SCADA

Os principais sensores utilizados para monitorar os sistemas de potência, são os transformadores de instrumentação de potencial (TP) e de corrente (TC). Esses instrumentos possuem a função de reduzir os níveis de tensão e corrente, mantendo as características relativas da quantidade medida. Dessa forma, os transformadores de instrumentação permitem a realização de medições através de amperímetros, voltímetros e etc. Através dessas medições, é possível obter outras informações relevantes, como fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão e as injeções de potência ativa e reativa nas barras das subestações de energia elétrica.

Segundo Bez e Simões-Costa (2013, p. 36), após a aquisição e processamento das

medidas provenientes dos TPs e TCs instalados, elas são encaminhadas através da infraestrutura de telecomunicação, para o sistema SCADA, que monitora e envia sinais de comando a todo sistema elétrico. Na outra ponta dessa estrutura, encontra-se o Centro de Operação do Sistema (COS), onde todos esses dados são processados por aplicativos computacionais específicos e apresentados aos operadores, que atuarão nas estruturas de controle para manter o sistema de potência em estado de operação normal e seguro.

A cadeia de telecomunicação do sistema SCADA é iniciada através da Unidade Terminal Remota (UTR), instalada nas subestações de energia elétrica, que são responsáveis por realizar varreduras periódicas na rede interna dessas instalações, coletando dados e informações pertinentes. Além disso, as UTRs são responsáveis por realizar a interface entre os canais de comunicação locais dos equipamentos e o sistema SCADA. Acima das UTRs encontram-se os Concentradores de Dados (CD), equipamentos que concentram informações de diversas UTRs, realizando a interface dessas unidades com o COS.

2.1.1 Erros de Medição Associados ao sistema SCADA

Diversas grandezas são monitoradas por esse sistema, módulo de tensão e corrente, potência ativa e reativa, posição de *taps* de transformadores de potência, frequência da rede, *status* de disjuntores e chaves, etc. Todas essas medidas são contaminadas por erros provenientes de diversas fontes. A fonte primária está relacionada ao erro de medição do próprio instrumento, comumente TPs e TCs, porém outros erros provenientes do aquecimento dos cabos de controle, de interferências eletromagnéticas, de transdutores, de canais de comunicação, de instalações inadequadas, etc. contaminam essas medidas.

De acordo com o Submódulo 2.12 dos Procedimentos de Rede elaborado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), as precisões mínimas exigidas para os equipamentos de supervisão que compõe o sistema SCADA são definidas conforme segue:

Todas as medições de tensão devem ser efetuadas por equipamentos cuja classe garanta exatidão mínima de 1%. As medições das demais grandezas analógicas devem garantir exatidão mínima de 2%, que deve englobar toda a cadeia de equipamentos utilizados, tais como transformadores de corrente, de tensão, transdutores, conversores analógico/digital etc. (ONS, 2022, p. 16).

Outra consideração importante sobre a qualidade das medidas, diz respeito à existência de erros grosseiros de medição. Esse tipo de medida é caracterizado por possuir um grau de imprecisão muito superior às hipóteses estatísticas adotadas ao se estabelecer o modelo de medição. Erros grosseiros podem ser provenientes de diversas fontes: defeitos em sensores e medidores, falhas em sistemas de comunicação, etc., gerando sérios prejuízos à estimação de estados caso não sejam detectados. Sendo assim, existem estratégias específicas adotadas para identificação e tratamento dessas medidas (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002, p. 50).

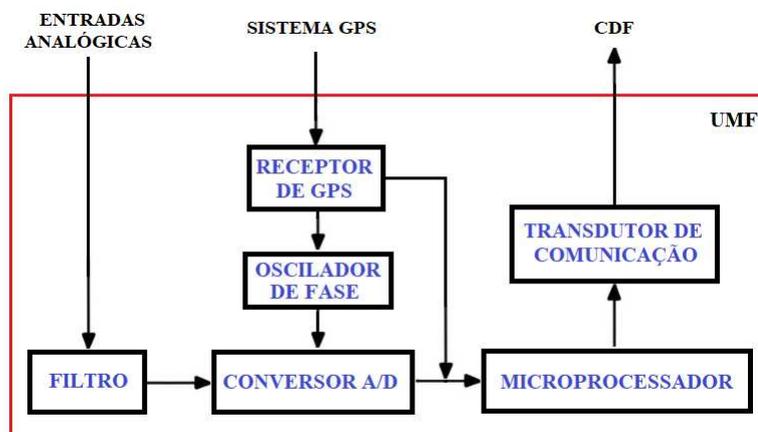
2.1.2 Taxas de Amostragem do Sistema SCADA

A taxa de amostragem das grandezas analógicas medidas, e do estado de chaves e disjuntores, que são transferidos para o sistema de supervisão e controle dos centros de operação, é definida pelo ONS (2022) através dos Procedimentos de Rede, Submódulo 2.12, item 5.2.1.1, no qual fica estipulado que um período de quatro a seis segundos é considerado adequado para realização dessa transferência. De acordo com o item 7.3.3.2. do mesmo documento, os valores enviados pelas UTRs ao COS, devem ter seu valor atualizado apenas quando há uma variação de 0,1% do fundo de escala do medidor ou do último valor lido. Desta forma, é comum que as medições permaneçam inalteradas por períodos maiores que os definidos.

2.2 AQUISIÇÃO DE DADOS ATRAVÉS DO SMSF

O surgimento da Unidade de Medição Fasorial (UMF) representou uma mudança significativa na operação em tempo real dos sistemas de potência. Esses equipamentos, permitem a medição direta dos fasores de sequência positiva de tensão e corrente associados às linhas de transmissão e às barras da rede, alterando, mesmo que lentamente, a forma como é realizada a supervisão e o controle desses sistemas.

Figura 1 – Principais elementos de uma UMF

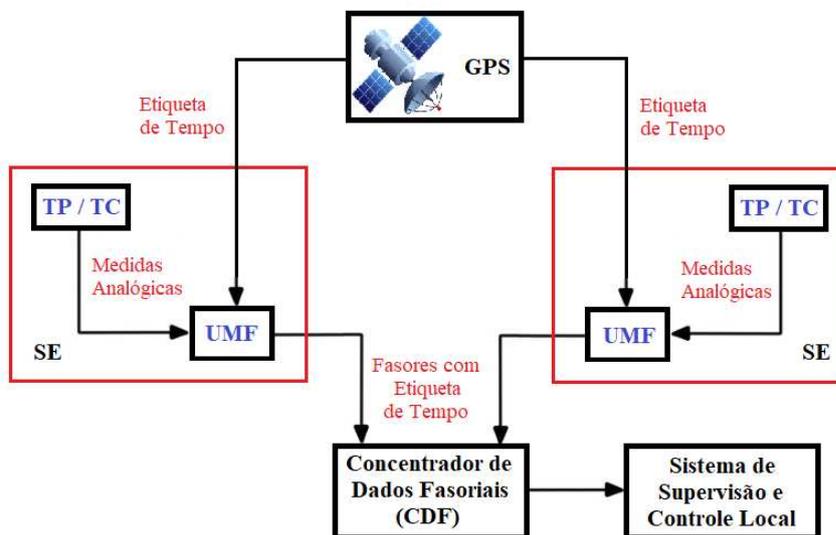


Fonte: Bez e Simões-Costa (2013), modificado pelo Autor (2023).

Para realizar a medição dos sincrofasores, a UMF recebe informações de várias fontes, ver Figura 1. Primeiramente ela coleta os sinais analógicos provenientes dos TPs e TCs instalados nas SEs e realiza uma filtragem desses dados (*anti-aliasing*) com o intuito de prevenir distorções do sinal amostrado. Na sequência, a UMF realiza a conversão do sinal analógico recebido para um formato digital e processa essa amostra para composição do sincrofasor medido. Além disso, todas as UMFs do sistema recebem um sinal sincronizado, proveniente de um sistema de geolocalização, normalmente o sistema GPS. Esse sinal

é responsável por fornecer a "etiqueta de tempo" a todas medições realizadas (LEITES; SIMÕES-COSTA, 2010).

Figura 2 – Sistema de medição sincronizada de fasores (SMSF).



Fonte: Leites e Simões-Costa (2010), modificado pelo Autor (2023).

Após essa etapa, os conjuntos de medidas gerados pelas UMFs são encaminhados para o concentrador de dados fasoriais (CDF). Esse sistema é responsável por receber os dados e ordená-los através da sua "etiqueta de tempo", correlacionando os diferentes sincrofisores e armazenando-os em um banco de dados de forma coerente. Além disso, o CDF proporciona uma plataforma em tempo real, para as aplicações de monitoração e controle, e realiza o gerenciamento do sistema, monitorando e disponibilizando informações de perda de dados, perda de sinal e falha de sincronismo das UMFs (LEITES; SIMÕES-COSTA, 2010, p. 24). Na Figura 2, pode-se observar uma visão geral do SMSF.

2.2.1 Erros de Medição Associados ao SMSF

De acordo com o Submódulo 2.13 dos Procedimentos de Rede elaborado pelo ONS, todas as medições fasoriais de tensão devem garantir uma exatidão mínima de 1% e as medições de corrente devem ter uma exatidão mínima de 10%. Além disso, tais exatidões devem englobar toda a cadeia de equipamentos utilizados, tais como TPs, TCs, transdutores, etc (ONS, 2020, p. 3–4).

Com relação aos erros que contaminam as medidas fasoriais, considerando que as fontes primárias de informação permanecem sendo os TPs e TCs instalados nas SEs, e que os canais de comunicação internos e externos continuam sujeitos aos mesmos tipos de interferência, pode-se considerar que as mesmas observações efetuadas na Seção 2.1.1 continuam válidas. Além disso, deve ser considerada a existência de novas fontes de erro,

como o próprio hardware da UMF e erros relacionados ao sinal de sincronismo emitidos pelo sistema de GPS.

Apesar dessas considerações, existem estratégias para minimizar a incidência desses erros, e conforme Leites e Simões-Costa (2010, p. 34), a quantificação dos erros associados ao SMSF parte do estabelecimento, através da realização de testes, do conjunto de parâmetros que caracterizem de forma completa o processo de medição. Após essa caracterização, esses parâmetros podem ser aplicados ao sinal de saída das UMFs, ajustando os sincrofasores estimados à uma base comum, sob baixa influência de erros.

Segundo Martin, Hauer e Faris (2007 apud LEITES; SIMÕES-COSTA, 2010) testes realizados pela Bonneville Power Administration (BPA), garantem a alta qualidade das medidas provenientes das UMFs, que através de tecnologias de compensação de erros contornam os atrasos de tempo associados ao processo, e em conjunto, corrigem os erros de magnitude e offsets dos ângulos de fase. Desta forma, pode-se considerar que a precisão das UMFs é superior à precisão das medidas provenientes do sistema SCADA.

2.2.2 Taxa de Amostragem do SMSF

Com relação à taxa de amostragem, conforme IEEE (2011), as UMFs devem prever suporte à comunicação de dados (por meio de gravação ou saída) em submúltiplos da frequência nominal do sistema. Os valores normalizados para frequência de 60Hz são da ordem de 10 a 60 amostras por segundo. Essa faixa pode ser selecionada pelo usuário, e é comum os fabricantes oferecerem suporte para taxas superiores. No Brasil, a taxa de amostragem das medições sincrofasoriais, definida no Submódulo 2.13 dos procedimentos de rede elaborado pelo ONS, é de 60 amostras por segundo (ONS, 2020, p. 4). Além das considerações efetuadas, é importante destacar que:

No contexto da inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados, deve ser considerada a compatibilização das diferenças entre taxas de varredura tradicionais do sistema SCADA e as do SMSF. Considerando a operação do sistema elétrico em regime permanente, não é esperado que haja mudança significativa das medidas no intervalo de tempo da varredura do SCADA. Logo, a escolha arbitrária de um conjunto de fasores obtidos dentro deste intervalo seria adequada (BEZ; SIMÕES-COSTA, 2013, p. 51).

Como vimos, o SMSF apresenta diversas vantagens quando comparado ao sistema SCADA, porém, na prática, estimadores baseados apenas em sistemas SMSF não são muito utilizados. Isso ocorre pois o sistema SCADA já é utilizado em todo o sistema elétrico de potência e se torna inviável, tanto economicamente como em função da segurança e estabilidade desses sistemas, substituir toda a infraestrutura existente. Sendo assim, a tendência é que a integração de medidas sincrofasoriais seja realizada gradativamente e, que por algum tempo, coexistam estimadores puramente convencionais, que processam apenas medidas SCADA, e estimadores híbridos, que processam os dois tipos de medidas conjuntamente.

3 ESTIMAÇÃO DE ESTADOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Segundo Abur e Exposito (2004, p. 23), a Estimação de Estados em Sistemas de Potência (EESP) se refere ao procedimento de obtenção dos fasores de tensão (estados) de todas as barras do sistema em um determinado momento no tempo. Essa tarefa pode ser realizada através de medidas fasoriais sincronizadas de tensão, extremamente precisas, obtidas diretamente das barras do sistema. Entretanto, esse procedimento seria muito suscetível a erros de medição e falhas de telemetria. Para superar essas vulnerabilidades, a EESP utiliza todo o conjunto de medidas redundantes disponíveis, para filtrar esses erros e encontrar a estimativa ótima dos estados. Essas medições podem incluir não apenas as medidas convencionais de tensão e potência, mas também outras, como a magnitude das correntes ou medidas diretas dos fasores de tensão.

Simões-Costa e Salgado (2002, p. 15), resumem as principais funções da EESP, conforme segue:

A função da Estimação de Estados em Sistemas de Potência é fornecer uma base de dados em tempo real confiável a partir de telemidas redundantes (geralmente magnitude da tensão nas barras, injeções de potência nas barras, fluxos de potência nas linhas de transmissão, e eventualmente magnitude da corrente nas linhas de transmissão) e corrompidas por erros de várias espécies. O estimador de estados processa essas medidas de forma a estimar valores para a tensão complexa em todas as barras (considerada o *estado do sistema em regime permanente*). À partir dos estados é possível determinar as outras variáveis (fluxo e potência nas linhas de transmissão, injeções de potência nas barras etc) necessárias para análise e monitoração da segurança do sistema.

Além da Monitoração de Segurança e da Análise de Segurança, que será tratado com mais detalhes na Seção 3.1, outra aplicação relevante da EESP destacado por Simões-Costa e Salgado (2002, p. 16) é a Previsão de Carga, que tem por objetivo estimar a demanda futura das barras do sistema.

3.1 ESTADOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

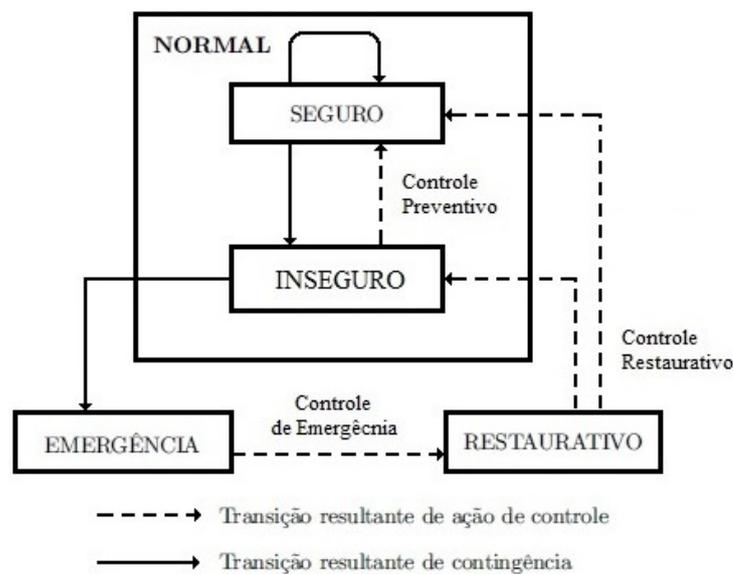
Um sistema elétrico de potência pode assumir três estados de operação¹ distintos, normal, de emergência ou restaurativo (ver Figura 3). O sistema é dito em condição normal de operação, se toda a carga do sistema é atendida e nenhum limite operacional do sistema é ultrapassado. Estes limites se referem ao limite operacional dos equipamentos do sistema, geradores, linhas de transmissão, transformadores de potência e etc., o que inclui os limites superior e inferior do nível de tensão nas barras. Nessa condição, o sistema pode ser caracterizado ainda como seguro, quando uma possível contingência, já prevista em estudo de segurança anterior, não afeta o atendimento das cargas e nenhum limite operacional é violado, ou inseguro, quando essas premissas não são verificadas. Neste caso,

¹ É importante não confundir *estados de operação* com as variáveis de estado (tensões complexas nas barras do sistema elétrico de potência) a serem determinadas pela Estimação de Estados

medidas preventivas devem ser aplicadas para que o sistema retorne a condição segura (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Quando alguma condição de operação se altera, normalmente em função de uma contingência, causando uma violação dos limites operacionais do sistema porém toda a carga continua sendo atendida, é dito que o sistema está operando em condição de emergência, o que requer intervenção imediata para correção do desvio, de modo que o sistema não colapse. Nessa condição, pode ser necessário reduzir a carga atendida (corte de carga), retirando linhas de transmissão, transformadores de potência, etc. de operação. Esse procedimento deve ser adotado até que os limites operacionais do sistema voltem a ser atendidos. Após essa transição, ações devem ser tomadas para que o sistema retorne a condição normal de operação. Durante esse período, o sistema é dito em estado de operação restaurativo (ABUR; EXPOSITO, 2004).

Figura 3 – Diagrama de transição de estados de operação de um sistema de potência.



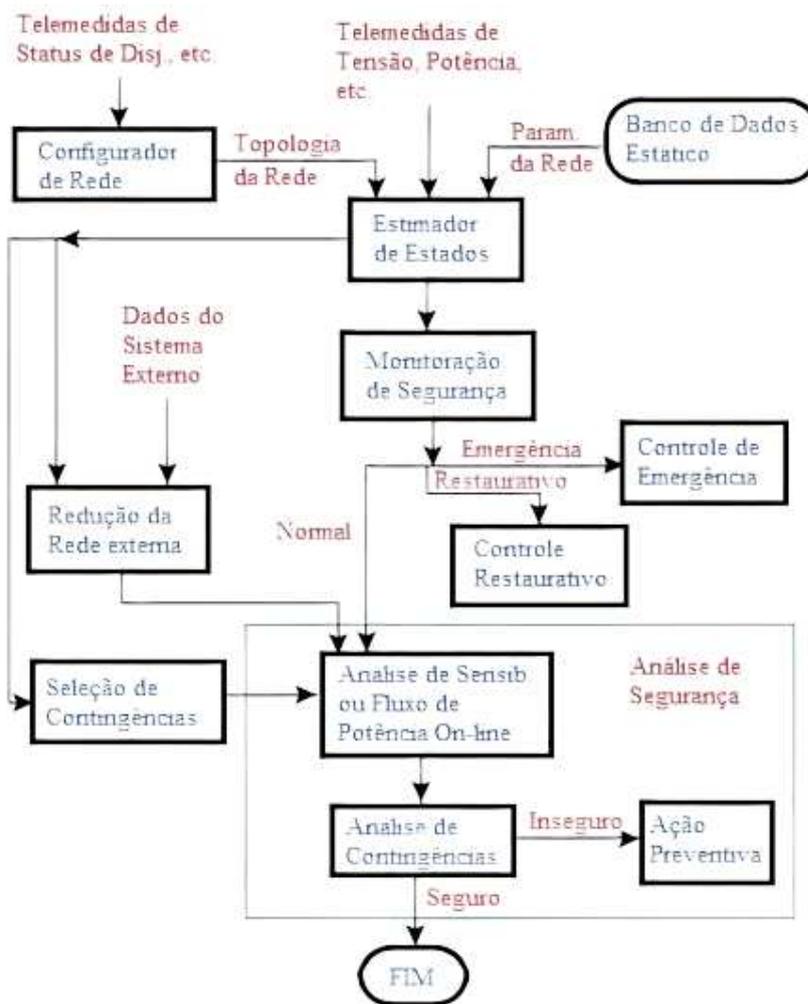
Fonte: Simões-Costa e Salgado (2002) modificado pelo Autor (2023).

Neste trabalho, visando simular a condição real de operação dos sistemas de potência, aplicou-se pequenas variações de carga ativa e reativa nos modelos analisados. Conforme Simões-Costa e Salgado (2002), quando o sistema responde a pequenas variações de carga usuais, pode-se considerar que o sistema está transitando entre uma condição normal de operação para outra, e que cada estado de operação normal corresponde a uma condição de regime permanente. Nesse estudo não simularemos nenhum tipo de contingência, conseqüentemente nenhum limite operacional do sistema será violado. Sendo assim, para as situações analisadas considera-se que o sistema está sempre em condição normal de operação.

3.2 FUNÇÕES COMPONENTES DA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL

Como dito anteriormente, o estimador de estados é parte importante do processo de monitoração e análise de segurança. Uma visão global da inserção do estimador de estados nesse processo pode ser verificada na Figura 4, onde estão destacados as principais funções que compõe a operação em tempo real dos sistemas de potência.

Figura 4 – Principais aplicativos da operação em tempo real.

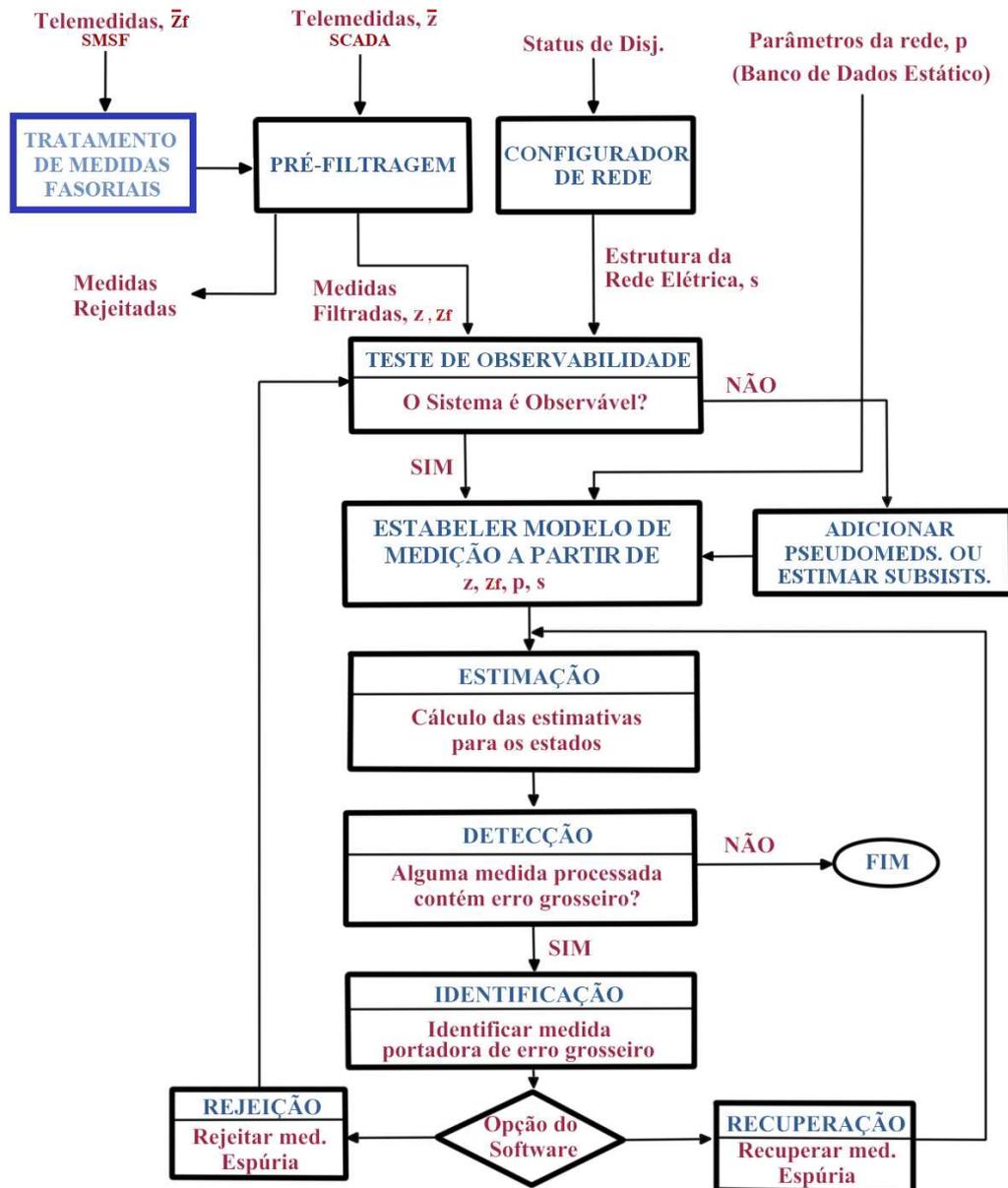


Fonte: Simões-Costa e Salgado (2002).

Como pode-se observar, existem dois blocos anteriores ao estimador de estados. O bloco configurador de rede, que tem como função processar as telemédidas do *status* de chaves e disjuntores recebidos do sistema de supervisão e controle, para determinar a topologia atual da rede e gerar seu diagrama unifilar. E o bloco de banco de dados estático, que tem por função, fornecer os parâmetros previamente cadastrados da rede, como informações de linhas de transmissão, transformadores de potência, geradores, bancos de capacitores, etc. (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002, p. 6).

Após o estimador de estados, temos a monitoração de segurança, responsável por identificar o estado de operação do sistema, como visto na Seção 3.1, e a análise de segurança, que verifica a segurança do sistema frente a uma lista de contingências pré-selecionadas, levando em consideração elementos da rede externa próxima que afetem a segurança do sistema, e classificando o sistema como normal-seguro ou normal-inseguro. Neste último caso é acionado o controle preventivo, que visa a realização de ações que levem o sistema de volta ao estado de operação normal-seguro (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002, p. 6).

Figura 5 – Funções que compõe a estimação de estados.



Fonte: Simões-Costa e Salgado (2002) modificado pelo Autor (2023).

Olhando mais detalhadamente para o estimador de estados, pode-se verificar que o mesmo realiza várias funções específicas, que objetivam tornar a EESP mais segura e confiável. Além do configurador de rede, já abordado anteriormente, destacam-se as funções de pré-filtragem, que tem por objetivo detectar e descartar medidas errôneas que sejam facilmente identificáveis, teste de observabilidade, que consiste em verificar se as medidas disponíveis para processamento permitem a determinação do estado de todas as barras do SEP e, por fim, o processo de detecção, identificação e recuperação de medidas portadoras de erros grosseiros.

Como pode ser visto na Figura 5, neste trabalho é adicionado um novo bloco ao processo de EESP, situado entre a obtenção de telemidas e o processo de pré-filtragem, cuja função é o tratamento de medidas fasoriais sincronizadas. Para entender essa nova função, é importante destacar que a EESP ocorre em intervalos regulares de algumas dezenas de segundos. Sendo assim, o procedimento contemplado neste trabalho visa utilizar as diversas medidas fasoriais obtidas durante esse intervalo, com o objetivo de aprimorar os resultados alcançados pela EESP. No próximo Capítulo, os detalhes desse bloco são abordados com maior profundidade.

3.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DA EESP

Segundo Albuquerque e Simões-Costa (2011, p. 29) a EESP "pode ser formulada matematicamente como um problema de otimização, onde busca-se minimizar a soma ponderada do quadrado dos resíduos de estimação". Para isso, vamos considerar um sistema composto por N barras. O número de variáveis de estados do sistema (n), composto pelos fasores de tensão de cada barra, excluindo o ângulo da barra de referência, que por convenção é considerado nulo, é dado por:

$$n = 2N - 1 \quad (1)$$

Considerando que temos disponíveis m medidas, capazes de trazer informações de todo o sistema, e que essas medidas estão contaminadas com erros oriundos do processo de medição, se z é o vetor com dimensões $m \times 1$ das quantidades medidas, logo:

$$z = z_0 + \eta \quad (2)$$

onde:

z_0 : Vetor de dimensão $m \times 1$, com os valores verdadeiros das medidas efetuadas, portanto desconhecido;

η : Vetor de dimensão $m \times 1$, que modela os erros de medição.

Os valores verdadeiros das grandezas medidas (z_0), podem ser representadas como funções não lineares dos estados verdadeiros (x). Essas funções são provenientes da aplicação das leis de Ohm e Kirchhoff ao sistema analisado. Sendo assim, temos:

$$z_0 = h(x) \quad (3)$$

Para simplificar o problema, é razoável supor que o vetor de erros de medição (η) possui distribuição gaussiana com média nula, logo:

$$E(\eta) = 0$$

Considerando ainda que os erros de medição são não correlacionados, isto é, um medidor é totalmente independente do outro, a matriz de covariância dos erros de medição será uma matriz diagonal R com dimensões $m \times m$, logo:

$$E(\eta\eta^t) = R = \text{diag}\{\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2\} \quad (4)$$

onde:

σ_i^2 : É a variância da i -ésima medida.

Com essas considerações e substituindo a equação (3) em (2), pode-se obter a relação entre as medidas efetuadas e os estados do sistema, conforme segue:

$$z = h(x) + \eta \quad (5)$$

Na solução da EESP via método dos mínimos quadrados ponderados, o vetor de estimativas (\hat{x}) é calculado de forma a minimizar o somatório dos resíduos das medidas, ponderado pela covariância dos erros de medição, sendo assim:

$$\underset{\hat{x}}{\text{mín}} J(\hat{x}) = \sum_{i=1}^m [R_{ii}^{-1}(z_i - h_i(\hat{x}_i))^2] \quad (6)$$

Na forma matricial:

$$\underset{\hat{x}}{\text{mín}} J(\hat{x}) = [z - h(\hat{x})]^t R^{-1} [z - h(\hat{x})] \quad (7)$$

onde:

$J(\hat{x})$: Função custo a ser minimizada.

A condição de otimalidade para solução deste problema é dado por:

$$\frac{\partial J(\hat{x})}{\partial \hat{x}} = 0 \Rightarrow H^t(\hat{x})R^{-1}[z - h(\hat{x})] = 0 \quad (8)$$

tal que:

$$H(\hat{x}) = \frac{\partial h(\hat{x})}{\partial \hat{x}}$$

Com o problema de EESP completamente modelado, pode-se encontrar sua solução, que será explicitada na Seção 3.4, a seguir.

3.4 SOLUÇÃO DA EESP ATRAVÉS DA EQUAÇÃO NORMAL DE GAUSS

Conforme Simões-Costa e Salgado (2002) podem ser utilizados diversos métodos numéricos para solução do problema de otimização formulado na Seção anterior. Porém, em função da natureza quadrática da função objetivo e da falta de restrições do problema, o método mais utilizado é o Método de Newton que culminará na Equação Normal de Gauss, como indicado a seguir.

Para solução iterativa do problema, temos que expandir a função custo, dada pela equação (7), através da série de Taylor, em torno do ponto \hat{x}^k , onde k é o número da iteração, conforme segue:

$$J(\hat{x}) = J(\hat{x}^k) + \frac{\partial J(\hat{x})^t}{\partial \hat{x}} \Delta \hat{x} + \frac{1}{2} \Delta \hat{x}^t \frac{\partial^2 J(\hat{x})}{\partial \hat{x}^2} \Delta \hat{x} + \dots \quad (9)$$

Desprezando os termos de ordem superior da série de Taylor, temos que o mínimo da função dada pela equação (9), é obtido através da diferenciação da mesma em relação a $\Delta \hat{x}$ e igualando o resultado a zero, logo:

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(\hat{x})}{\partial \Delta \hat{x}} = 0 &\Rightarrow \left. \frac{\partial J(\hat{x})^t}{\partial \hat{x}} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} + \left. \frac{\partial^2 J(\hat{x})}{\partial \hat{x}^2} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} \Delta \hat{x} = 0 \\ \left. \frac{\partial^2 J(\hat{x})}{\partial \hat{x}^2} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} \Delta \hat{x} &= - \left. \frac{\partial J(\hat{x})^t}{\partial \hat{x}} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} \end{aligned} \quad (10)$$

Ainda de acordo com Simões-Costa e Salgado (2002), supondo que nas proximidades da solução $H(\hat{x})$ é aproximadamente constante, a solução da equação diferencial indicada acima, é dada por:

$$\left. \frac{\partial J(\hat{x})^t}{\partial \hat{x}} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} = -2H^t(\hat{x}^k)R^{-1}\Delta z \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial^2 J(\hat{x})^t}{\partial \hat{x}^2} \right|_{\hat{x}=\hat{x}^k} \approx -2H^t(\hat{x}^k)R^{-1}H(\hat{x}^k) \quad (12)$$

onde:

$$\begin{aligned} \Delta \hat{x} &= x - \hat{x}^k \\ \Delta z &= z - h(\hat{x}^k) \end{aligned}$$

Por fim, substituindo as equações (11) e (12) em (10), temos a chamada Equação Normal de Gauss, que é dada por:

$$\left[H^t(\hat{x}^k)R^{-1}H(\hat{x}^k) \right] \Delta \hat{x} = H^t(\hat{x}^k)R^{-1}\Delta z \quad (13)$$

Essa equação será solucionada através de processo iterativo de modo a determinar o vetor de estimativas ótimas (\hat{x}^*), onde ϵ é a tolerância que deverá ser respeitada, conforme segue:

$$\max | \hat{x}_i | \leq \epsilon \quad (14)$$

3.5 ESTIMADORES DE ESTADO COM MÚLTIPLOS SENSORES

Para estimar os estados de um sistema de potência, é necessário processar as medidas provenientes dos sistemas SCADA e/ou SMSF. Tradicionalmente, apenas medidas provenientes do sistema SCADA eram utilizadas, porém, com o aumento da utilização de sistemas de medição fasorial, diversas estratégias para agregar estas medidas à EESP foram desenvolvidas, de modo a aprimorar os resultados obtidos pelo estimador.

Neste trabalho, é utilizado o Método Híbrido Simultâneo para processar as medidas dos sistemas SCADA e SMSF simultaneamente. Nesse método, a estratégia utilizada é a de processar conjuntamente as medidas provenientes dos dois sistemas. Desta forma, a estimativa final será obtida, através de iterações, de uma única Equação Normal de Gauss (ver Seção 3.4) com as seguintes considerações, sabendo que \hat{x}^* é o vetor ótimo dos estados do sistema, e que:

$$H = \begin{bmatrix} H_S \\ \text{---} \\ H_F \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} R_S & | & 0 \\ \text{---} & & \text{---} \\ 0 & | & R_F \end{bmatrix} \quad z = \begin{bmatrix} z_S \\ \text{---} \\ z_F \end{bmatrix}$$

onde:

H_S , R_S e z_S : São respectivamente a matriz jacobiana, a matriz das covariâncias dos erros de medição e o vetor de medidas, todas relacionadas ao sistema SCADA;

H_F , R_F e z_F : São respectivamente a matriz jacobiana, a matriz das covariâncias dos erros de medição e o vetor de medidas, todas relacionadas ao SMSF;

Substituindo essas matrizes na Equação Normal de Gauss, dada em (13), temos:

$$\begin{bmatrix} H_S^t & | & H_F^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S^{-1} & | & 0 \\ \text{---} & & \text{---} \\ 0 & | & R_F^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_S \\ \text{---} \\ H_F \end{bmatrix} \hat{x}^* = \begin{bmatrix} H_S^t & | & H_F^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S^{-1} & | & 0 \\ \text{---} & & \text{---} \\ 0 & | & R_F^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_S \\ \text{---} \\ z_F \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} H_S^t & | & H_F^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S^{-1} H_S \\ \text{---} \\ R_F^{-1} H_F \end{bmatrix} \hat{x}^* = \begin{bmatrix} H_S^t & | & H_F^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_S^{-1} z_S \\ \text{---} \\ R_F^{-1} z_F \end{bmatrix}$$

$$\left[H_S^t R_S^{-1} H_S + H_F^t R_F^{-1} H_F \right] \hat{x}^* = H_S^t R_S^{-1} z_S + H_F^t R_F^{-1} z_F \quad (15)$$

Agora, para encontrar o vetor \hat{x}^* , que contem as estimativas ótimas do sistema de potência, é necessário solucionar o sistema linear, dado pela equação (15). Na prática, segundo Simões-Costa, Albuquerque e Bez (2013), este processo pode ser executado alterando-se as propriedades dos estimadores de estado existentes, que processam medidas provenientes exclusivamente do sistema SCADA, de maneira a agregar as medidas fasoriais provenientes do SMSF à esse estimador.

Figura 6 – Método híbrido simultâneo



Fonte: O Autor (2022)

Na Figura 6, pode-se verificar o fluxo de informações, partindo das saídas dos sistemas SCADA e SMSF, passando pelo estimador convencional modificado e, por fim, gerando o vetor com as estimativas ótimas (\hat{x}^*) para o sistema. Como mencionado, existem outras alternativas para processar os dados provenientes dos sistemas SCADA e SMSF, porém, para elaboração deste trabalho, optou-se pela utilização do método híbrido simultâneo para execução das simulações.

4 DETERMINAÇÃO DO BUFFER DE MEDIDAS FASORIAIS ÓTIMO

Como visto na Seção 2.1.2 a taxa de amostragem do sistema SCADA é em média de uma varredura a cada cinco segundos. Já a taxa de amostragem do SMSF varia tipicamente, entre 10 e 60 amostras por segundo, sendo possível a obtenção de taxas mais elevadas (ver Seção 2.2.2).

Nos sistemas atuais, é bastante razoável assumirmos que o processo de EESP ocorre a cada 30 segundos. Sendo assim, nesse intervalo são gerados em média 6 vetores de medidas SCADA e, considerando uma taxa de 30 amostras por segundo do SMSF, 900 vetores de medidas fasoriais. Esse excesso de medidas tende a ser desconsiderada pelo estimador, já que comumente se supõe que a estimação híbrida de estados faz uso apenas das medidas válidas mais recentemente recebidas.

Sendo assim, neste capítulo, são analisadas as principais técnicas e estratégias para dimensionamento de um *buffer* de medidas fasoriais ótimo visando sua aplicação na EESP. Para formação deste *buffer*, será utilizado o alto volume de medidas fasoriais geradas pelo SMSF entre os intervalos de execução da EESP.

4.1 CARACTERIZAÇÃO ESTATÍSTICA DAS AMOSTRAS DE MEDIDAS SINCROFASORIAIS

De acordo com Zhang *et al.* (2012), o ruído adicionado às medidas fasoriais pode ser considerado normalmente distribuído e apresentando média zero. Logo, se considerarmos que o sistema é estacionário, quanto mais medidas forem processadas melhor será o resultado da EESP. Entretanto, sabe-se que os sistemas de potência não são verdadeiramente estáticos, embora sua evolução ao longo do tempo seja relativamente lenta. Se esta evolução dinâmica não for levada em conta, quanto mais medidas ao longo do tempo forem adicionadas à EESP, maior será o risco da captura no *buffer* de sincrofasores relativos a uma condição de operação inconsistente com as variáveis de estado atuais. O bom desempenho da estratégia adotada para utilização do *buffer* de medidas fasoriais depende portanto da boa relação custo-benefício entre a dimensão do *buffer* e as alterações do ponto de operação do sistema elétrico de potência.

Ainda segundo Zhang *et al.* (2012), se o sistema de potência for considerado como estático e sua ergodicidade for garantida, pode-se descrever as medidas de uma única UMF, da seguinte forma:

$$z_i = x_i + \varepsilon_i \quad (16)$$

onde:

x_i : Valor verdadeiro da medida (estado) na barra i ;

ε_i : Ruído referente à medida da UMF, suposto como apresentando distribuição normal, com média zero e variância σ^2 .

Logo, se considerarmos um numero n de medidas realizadas, sua média amostral ($\hat{\mu}_z$) será dada por:

$$\hat{\mu}_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (17)$$

Conseqüentemente, a variância dessa média amostral será (SHANMUGAN; BREI-POHL, 1988, p. 497):

$$\text{var}(\hat{\mu}_z) = \text{var} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \right) = \frac{\sigma^2}{n} \quad (18)$$

Sendo assim, em um sistema estático, quando mais medidas fasoriais forem processadas, menor será a variância da média amostral obtida.

Se considerarmos que o sistema não é estático, a série de medidas da mesma UMF pode descrita como segue. Seja $z = [z_1, z_2, \dots, z_n]$ o vetor que representa as medidas obtidas pela UMF em um segundo. Estas amostras se relacionam da seguinte forma (ZHANG *et al.*, 2012):

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 + \varepsilon_1 \\ z_2 &= x_1 + \Delta x_2 + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ z_n &= x_1 + \Delta x_n + \varepsilon_n \end{aligned}$$

onde x_1 é o primeiro valor obtido em $t = 0$ e $\Delta x = [\Delta x_2, \Delta x_3, \dots, \Delta x_n]^T$ representa a variação no ponto de operação do sistema quando comparado a x_1 . O vetor Δx não é facilmente descrito de forma estatística. Torna-se portanto necessário o desenvolvimento de estratégias para contornar esse problema.

4.2 TESTES ESTATÍSTICOS APLICADOS

Algumas soluções para determinar a dimensão ótima do *buffer* de medidas fasoriais foram levantadas por Zhang *et al.* (2012) e por Murugesan *et al.* (2015). Essas soluções sugerem que, para realizar essa função, é necessário identificar o instante de tempo no qual o sistema de potência altera perceptivelmente suas características, de modo a desprezar as medições obtidas antes desse ponto. Dessa forma, o vetor considerado para EESP será determinado pelo instante onde é detectada uma mudança nas variáveis observadas do sistema.

O principal método proposto para determinar o ponto onde o vetor de medidas é descaracterizado, baseia-se na realização de testes de hipóteses para detecção de desvios das médias das medidas no tempo. Sendo assim, sejam μ_A e μ_B as médias aritméticas de duas amostras distintas e consecutivas do vetor de medidas fasoriais de uma UMF. Determina-se a hipótese nula do teste (H_0) e a hipótese alternativa (H_1), conforme segue:

$$H_0 \longrightarrow \mu_A = \mu_B$$

$$H_1 \longrightarrow \mu_A \neq \mu_B$$

Para realização do teste, considera-se que a EESP ocorre a cada 30 segundos, e a taxa de amostragem da UMF é de 30 amostras por segundo. Logo, considerando um sistema de potência com apenas uma UMF instalada, essa UMF irá gerar uma matriz de medidas Z_f , que no período de 30 segundos, será composto por 1800 medidas, e terá dimensão 900×2 , sendo 900 medidas de magnitude (Z_{f_M}) e 900 medidas de fase (Z_{f_F}) da tensão da barra. Em seguida, essas medidas serão subdivididas em blocos menores, que serão comparados entre si. Portanto o conjunto de medidas fasoriais será particionado da seguinte forma:

$$Z_f = [Z_{f_M} \quad | \quad Z_{f_F}]$$

A partir dos vetores de medidas fasoriais Z_{f_M} e Z_{f_F} , são criados diversos subconjuntos de medidas, onde cada bloco é composto por 30 medidas. Logo o vetor composto pelos subconjuntos de Z_f será dado por $Z_{f_{Mb}} = [Z_{f_{Mb}}(1), Z_{f_{Mb}}(2), \dots, Z_{f_{Mb}}(30)]$ e $Z_{f_{Fb}} = [Z_{f_{Fb}}(1), Z_{f_{Fb}}(2), \dots, Z_{f_{Fb}}(30)]$. Dessa forma, realiza-se o teste de hipótese primeiramente entre os blocos $Z_{f_{Mb}}(30)$ e $Z_{f_{Mb}}(29)$. Caso o teste falhe em rejeitar a hipótese nula, prossegue-se para o teste entre os blocos $Z_{f_{Mb}}(29)$ e $Z_{f_{Mb}}(28)$. Os testes entre os blocos de medidas seguem sendo realizados até que o teste rejeite a hipótese nula, ou até que o conjunto de blocos seja esgotado. Para todos os casos ilustrados a seguir, considera-se que o mesmo procedimento é aplicado ao vetor $Z_{f_{Fb}}$.

O teste originalmente proposto por Zhang *et al.* (2012), prevê a utilização de blocos temporais de 5 medidas. Uma alteração nesse teste foi aplicada por Murugesan *et al.* (2015), que propôs a criação de uma segunda camada de testes, subdividindo a matriz Z_f de duas formas diferentes: uma com blocos de 5 medidas fasoriais e outra com blocos de 30 medidas fasoriais. Dessa forma, os dois testes são sobrepostos e prevalece aquele com o vetor de medidas resultantes mais conservador (menor número de medidas).

Além disso, foi proposto que os blocos sejam comparados de modo diferente, conforme segue. Considerando o mesmo vetor $Z_{f_{Mb}}$, realiza-se o teste de hipótese entre os blocos $Z_{f_{Mb}}(30)$ e $Z_{f_{Mb}}(29)$; caso o teste falhe em rejeitar a hipótese nula, realiza-se o

teste entre o bloco agregado $[Z_{f_{Mb}}(30); Z_{f_{Mb}}(29)]$ e $Z_{f_{Mb}}(28)$. Caso H_0 não tenha sido rejeitada, realiza-se o teste entre os blocos $[Z_{f_{Mb}}(30); Z_{f_{Mb}}(29); Z_{f_{Mb}}(28)]$ e $Z_{f_{Mb}}(27)$, e assim por diante, até que o teste rejeite H_0 , ou que o conjunto de blocos seja esgotado.

Neste trabalho, optou-se pela aplicação da segunda modificação proposta por Murugesan *et al.* (2015), e utilizar apenas blocos de 30 medidas. Além disso, em função das características do problema, optou-se pela aplicação de testes de hipóteses baseados na distribuição t de Student (MURUGESAN *et al.*, 2015). Conforme Larson e Farber (2015), para descrever o teste t de Student, suponha duas amostras de dados, A e B. A estatística do teste t padronizada é dada por:

$$t = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) - (\mu_A - \mu_B)}{\sigma_{\bar{x}_A - \bar{x}_B}} \quad (19)$$

O desvio-padrão da distribuição amostral das médias $\bar{x}_A - \bar{x}_B$ é:

$$\sigma_{\bar{x}_A - \bar{x}_B} = \sqrt{\frac{s_A^2}{n_A} + \frac{s_B^2}{n_B}} \quad (20)$$

E o estimador da variância da amostra é:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (21)$$

tal que:

x_i : É a i -ésima medida que compõe a amostra;

\bar{x} : É a média aritmética da amostra;

n : É o numero de medidas que compõe a amostra.

Além desses fatores, o grau de liberdade ($g.l.$) da distribuição amostral deve ser igual ao número de medidas do menor bloco da comparação menos um (LARSON; FARBER, 2015). Considerando os dois blocos de amostras A e B, onde $n_A \leq n_B$ temos que:

$$g.l. = n_A - 1 \quad (22)$$

logo, para o caso de $n_A = 30$, $g.l. = 29$. Com essa variável calculada e o nível de significância (α) definido, pode-se verificar na Tabela 1 o valor do limiar de rejeição (t_0) do teste t de Student.

Tabela 1 – Tabela contendo os valores de t_0 para o teste t de Student

α Bicaudal	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.05	0.02	0.01	0.002	0.001
g.l.										
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.31	636.62
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.679	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
80	0.678	0.846	1.043	1.292	1.664	1.990	2.374	2.639	3.195	3.416
100	0.677	0.845	1.042	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174	3.390
1000	0.675	0.842	1.037	1.282	1.646	1.962	2.330	2.581	3.098	3.300
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291
	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99.8%	99.9%
	Nível de Confiança (1 - α)									

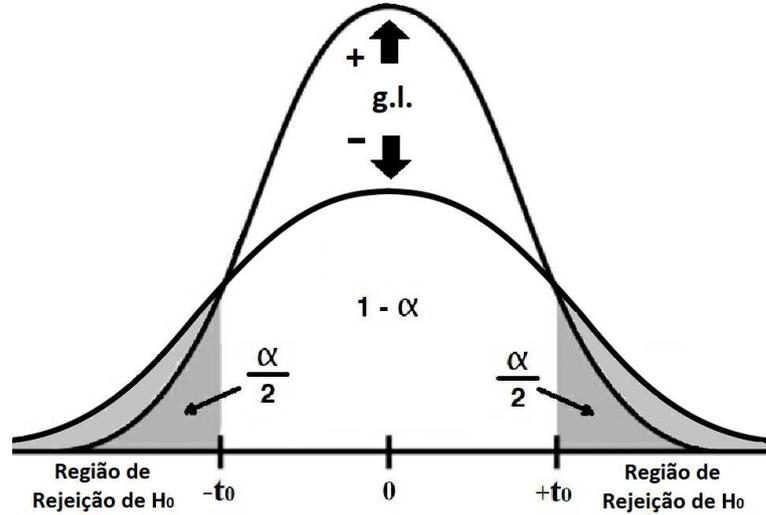
Fonte: Larson e Farber (2015) modificado pelo Autor (2023).

Ainda conforme Larson e Farber (2015), os valores usualmente adotados para o nível de significância (α) do teste t de Student são $\alpha = 0,01$, $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,10$. Em função das características das amostras, o teste aplicado é do tipo bicaudal, e o teste falha em rejeitar H_0 nos casos onde $-t_0 \leq t \leq +t_0$, conforme indicado na Figura 7. A figura também mostra como a forma da função densidade de probabilidade da distribuição t de Student varia em função do número de graus de liberdade.

A definição do nível de significância adotado está associada ao tipo de erro do teste de hipóteses que deseja-se evitar: valores inferiores de significância aumentam a chance de ocorrência de erros do Tipo II, que acontecem quando o teste falha em rejeitar a hipótese nula mesmo ela sendo falsa. Já valores mais elevados de significância reduzem a chance de

ocorrência de erros do Tipo II, porém elevam a ocorrência de erros do Tipo I, que ocorrem quando a hipótese nula é rejeitada, mesmo sendo verdadeira (LARSON; FARBER, 2015).

Figura 7 – Função densidade de probabilidade da distribuição t de Student



Fonte: O Autor (2023).

Outro teste proposto por Zhang *et al.* (2012) é o teste que limita o desvio-padrão das amostras do vetor de medidas fasoriais. Conforme Shanmugan e Breipohl (1988), o desvio-padrão (σ) de um conjunto de dados amostrais com n entradas é dado pela raiz quadrada da variância amostral (σ^2), onde:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (23)$$

Logo:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (24)$$

tal que:

x_i : É a i -ésima medida que compõe a amostra;

\bar{x} : É a média aritmética da amostra;

n : É o numero de medidas que compõe a amostra.

A mesma técnica de subdivisão do vetor em blocos de 30 medidas é adotada. O teste é realizado calculando o desvio-padrão (σ_m) do vetor $Z_{f_{Mb}}$ e o desvio-padrão (σ_f) do vetor $Z_{f_{Fb}}$; e comparando-os respectivamente com um limiar pré definido de desvio de

magnitude (λ) e um limiar pré definido de desvio de fase (ψ).

Logo, determina-se a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) do teste do desvio-padrão de magnitude (σ_m), conforme segue:

$$H_0 \longrightarrow \sigma_m \leq \lambda$$

$$H_1 \longrightarrow \sigma_m > \lambda$$

E a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) do teste do desvio-padrão de fase (σ_f) como:

$$H_0 \longrightarrow \sigma_f \leq \psi$$

$$H_1 \longrightarrow \sigma_f > \psi$$

Esses limiares devem ser definidos através de testes empíricos, realizando a análise dos desvios-padrão das medidas realizadas pelas UMFs *in loco*. Sendo assim, para determinar os limiares λ e ψ realiza-se uma análise do maior número de amostras possíveis quando os sistemas encontram-se em condição de operação estática. Com isso pode-se calcular a média μ e os desvios-padrão σ_m e σ_f destas amostras através das Equações (17) e (24) respectivamente, e os limiares podem ser determinados conforme segue:

$$\lambda = \mu + 3 \sigma_m$$

$$\psi = \mu + 3 \sigma_f$$

Neste trabalho esses testes são realizados através de simulação das medidas fasoriais, porém cabe destacar que os valores obtidos devem ser especificados para cada sistema analisado, já que os limiares podem depender do sistema em estudo.

4.3 DETERMINAÇÃO DO VETOR DE MEDIDAS FASORIAIS PARA UTILIZAÇÃO NA ESTIMAÇÃO HÍBRIDA DE ESTADOS

Os vetores contendo as medições aceitáveis para utilização na EESP são determinados de acordo com o teste realizado. Para o teste de desvio de média (teste t de Student), considerando os vetores de medidas fasoriais subdivididos em blocos de 30 medidas $Z_{f_{Mb}}$ e $Z_{f_{Fb}}$, determina-se as medidas utilizadas que serão adicionadas a matriz final do teste de média (Zt_{buff}) conforme segue (ver Tabela 2):

- a) Realiza-se o teste entre os blocos $Z_{f_{Mb}}$ (30) e $Z_{f_{Mb}}$ (29); caso H_0 seja rejeitado, a matriz Zt_{buff} será composta apenas pela última medida de Z_{f_M} e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz Zt_{buff} será composta pelas últimas 60 medidas de Z_{f_M} e o teste segue para o item b);
- b) Realiza-se o teste entre os blocos $[Z_{f_{Mb}}$ (30); $Z_{f_{Mb}}$ (29)] e $Z_{f_{Mb}}$ (28); caso H_0 seja rejeitado, a matriz Zt_{buff} segue com 60 medidas e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz Zt_{buff} recebe as medidas contidas em $Z_{f_{Mb}}$ (28), totalizando 90 medidas, e o teste segue para o item c);
- c) Realiza-se o teste entre os blocos $[Z_{f_{Mb}}$ (30); $Z_{f_{Mb}}$ (29); $Z_{f_{Mb}}$ (28)] e $Z_{f_{Mb}}$ (27); caso H_0 seja rejeitado, a matriz Zt_{buff} segue com 90 medidas e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz Zt_{buff} recebe as medidas contidas em $Z_{f_{Mb}}$ (27), totalizando 120 medidas, e o teste segue para o item d);
- d) O teste segue dessa forma, até que H_0 seja rejeitado ou que o conjunto de blocos seja esgotado. O mesmo procedimento é realizado para o vetor $Z_{f_{Fb}}$.

Tabela 2 – Resumo do procedimento para determinação da matriz Zt_{buff}

Comparação das Médias dos Blocos		Nº Medidas de Zt_{buff}	
Blocos (Amostra A)	Blocos (Amostra B)	Rejeita H_0	Falha em rejeitar H_0
$Z_{f_{Mb}}$ (30)	$Z_{f_{Mb}}$ (29)	1	60
$[Z_{f_{Mb}}$ (30); $Z_{f_{Mb}}$ (29)]	$Z_{f_{Mb}}$ (28)	60	90
$[Z_{f_{Mb}}$ (30); $Z_{f_{Mb}}$ (29); $Z_{f_{Mb}}$ (28)]	$Z_{f_{Mb}}$ (27)	90	120
⋮	⋮	⋮	⋮
$[Z_{f_{Mb}}$ (30); $Z_{f_{Mb}}$ (29); ...; $Z_{f_{Mb}}$ (02)]	$Z_{f_{Mb}}$ (01)	870	900

Fonte: O Autor (2023).

Para o teste do desvio-padrão, considerando o vetor de medidas fasoriais dividido em blocos de 30 medidas $Z_{f_{Mb}}$ e $Z_{f_{Fb}}$, determina-se as medidas utilizadas que serão adicionadas a matriz final do teste de desvio-padrão (Zs_{buff}), conforme segue (ver Tabela 3):

- a) Realiza-se o teste do bloco $Z_{f_{Mb}}$ (30); caso H_0 seja rejeitado, a matriz Zs_{buff} será composta apenas pela última medida de Z_{f_M} , e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz Zs_{buff} será composta pelas últimas 30 medidas de Z_{f_M} , e o teste segue para o item b);
- b) Realiza-se o teste do bloco $Z_{f_{Mb}}$ (29); caso H_0 seja rejeitado, a matriz Zs_{buff} segue com 30 medidas, e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz Zs_{buff} será composta pelas últimas 60 medidas de Z_{f_M} , e o teste segue para o item c);

- c) Realiza-se o teste do bloco $Z_{f_{Mb}}(28)$; caso H_0 seja rejeitado, o vetor Z_{buff_s} segue com 60 medidas, e o teste termina. Caso o teste falhe em rejeitar H_0 , a matriz $Z_{s_{buff}}$ será composta pelas últimas 90 medidas de Z_{f_M} , e o teste segue para o item d);
- d) O teste segue dessa forma, até que H_0 seja rejeitado ou que o conjunto de blocos seja esgotado. O mesmo procedimento é realizado para o vetor $Z_{f_{Fb}}$, porém o limiar é definido por ψ .

Tabela 3 – Resumo do procedimento para determinação da matriz $Z_{s_{buff}}$

Determinação de σ Blocos (Amostra)	Nº Medidas de $Z_{s_{buff}}$	
	Rejeita H_0	Falha em rejeitar H_0
$Z_{f_{Mb}}(30)$	1	30
$Z_{f_{Mb}}(29)$	30	60
$Z_{f_{Mb}}(28)$	60	90
\vdots	\vdots	\vdots
$Z_{f_{Mb}}(01)$	870	900

Fonte: O Autor (2023).

Cada teste realizado define o número de amostras aceitáveis para utilização na EESP. Sendo assim, após a execução dos dois testes é realizada uma comparação entre as matrizes $Z_{t_{buff}}$ e $Z_{s_{buff}}$ obtidas, e adota-se a matriz mais conservadora, com menor número de medidas. Outra ação adotada é a de realizar comparações distintas envolvendo as medições de magnitude e de fase da tensão de cada UMF, tomando o cuidado de utilizar somente medidas em que o par tenha sido aprovado pelos testes. Ou seja, caso o teste de magnitude de uma barra tenha falhado em rejeitar H_0 e o teste de fase não tenha, essas amostras são descartadas, e o sistema considera que o teste daquele bloco rejeitou H_0 em ambos os casos. Dessa forma, pretende-se evitar a ocorrência de erros do Tipo II.

Após a definição das medidas aceitáveis para realização da EESP, é calculada a média aritmética dessas medidas e forma-se o vetor final de medidas ($Z_{f_{final}}$), com dimensão 1×2 , que será dado por:

$$Z_{f_{final}} = [Z_{f_{M_{final}}}, Z_{f_{F_{final}}}] \quad (25)$$

Para incluir as demais UMFs, basta estender o método adotado. Logo, seja um sistema de potência com u UMFs instaladas, o vetor final de medidas ($Z_{f_{final}}$) terá a mesma forma dada em (25) e sua dimensão será de $1 \times 2u$.

5 SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas com os sistemas-teste de 57 e 118 barras do IEEE para avaliar o desempenho do método de seleção de medidas sincrofasoriais proposto. Isto é efetuado através da análise dos resultados do estimador de estados considerando-se: a) a prática considerada convencional, de usar apenas a varredura mais recente das medidas sincrofasoriais, e b) o método proposto nesse trabalho, de empregar valores médios representativos das mais recentes leituras de UMFs, desde que não afetadas por alterações na condição de operação do sistema de potência.

5.1 PROCEDIMENTOS ADOTADOS NAS SIMULAÇÕES

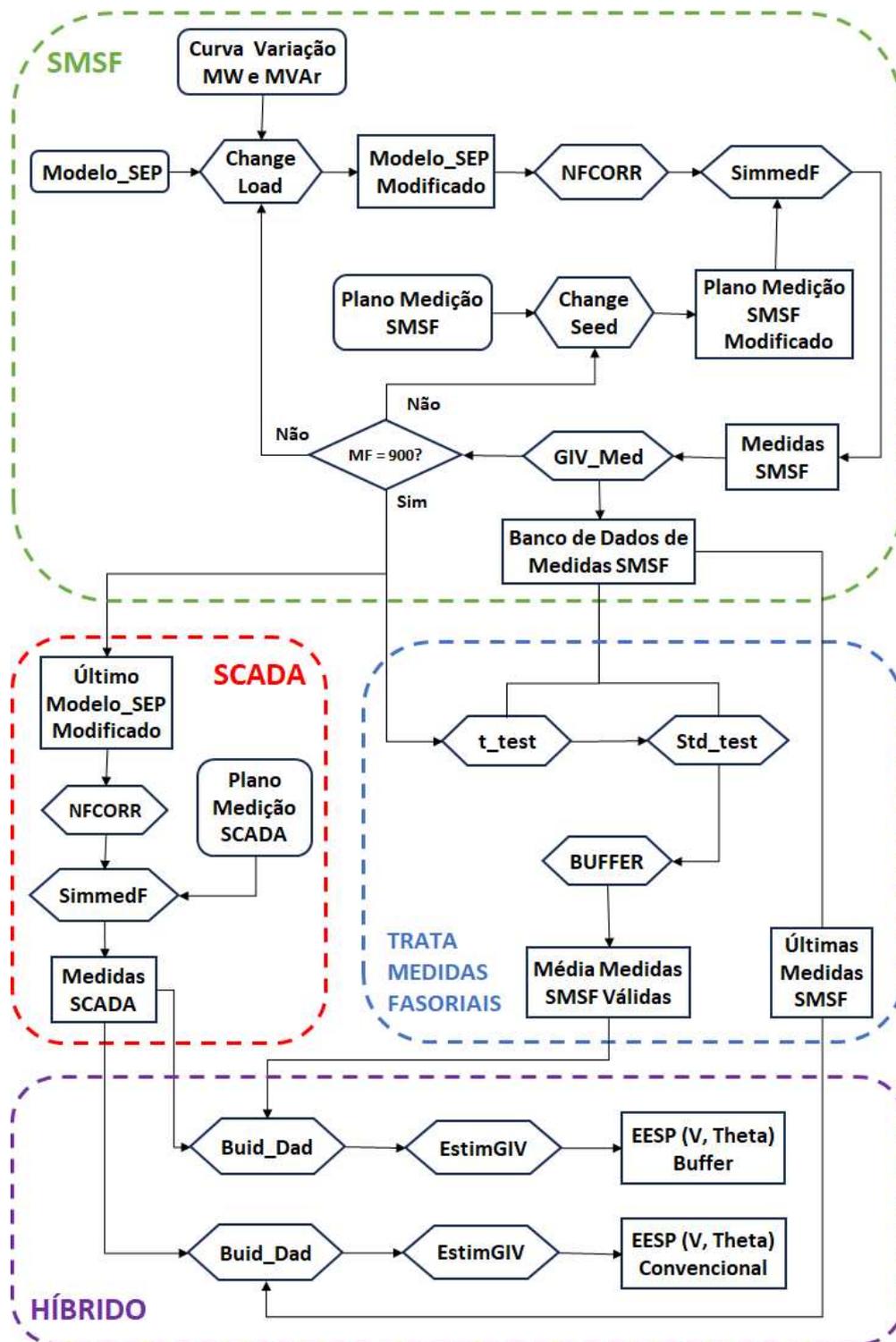
Para realização da simulação proposta, primeiramente é desenvolvido um aplicativo para simular as variações de potência ativa e reativa típicos dos sistemas de potência de grande porte. Essas variações são determinadas a partir de dados reais obtidos de leituras provenientes do sistema SCADA, compilados de diversas subestações e linhas de transmissão supervisionados pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Os dados obtidos estão sujeitos às considerações realizadas na Seção 2.1: a taxa de amostragem é variável, entre quatro e seis segundos, e as medidas são atualizadas apenas quando há uma variação de 0,1% do fundo de escala do medidor ou do último valor lido.

Com o intuito de verificar a qualidade da EESP obtida através do modelo proposto, são realizados dois processos de EESP em paralelo. O primeiro utiliza as medidas SCADA e fasoriais obtidas da mais recente aquisição de dados do sistema. O segundo utiliza as mesmas medidas SCADA, porém o vetor proveniente do SMSF é o vetor Z_{final} , que é composto pelas medidas fasoriais provenientes do bloco de tratamento de medidas fasoriais, conforme indicado na Figura 4, e que realiza as funções descritas em detalhes neste capítulo.

Além da simulação da variação da potência ativa e reativa, são utilizados outros aplicativos, que em conjunto, se propõe a realizar a simulação do comportamento dos sistemas de potência reais, e com isso, gerar resultados aplicáveis ao fim proposto.

Na figura 8, pode ser verificado o fluxo de dados utilizados em uma única simulação, onde é obtida a solução da EESP pelos dois procedimentos já abordados. Com isso, através de aplicativos disponibilizadas pelo LABSPOT (Laboratório de Sistemas de Potência) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), e outros, desenvolvidos para o propósito específico deste trabalho, é possível realizar uma comparação desses resultados. A seguir, para possibilitar uma visão global das simulações realizadas, são descritos cada um dos módulos utilizados no processo.

Figura 8 – Fluxo de dados em uma única simulação



Fonte: O Autor (2023)

- **Change_Load:** Este aplicativo foi desenvolvido em Matlab e é responsável por alterar a potência ativa e reativa das cargas instaladas nas barras do sistema, simulando o comportamento do mesmo no tempo.

Arquivos de Entrada: Arquivo *Modelo_SEP*, contendo a topologia e os parâmetros do sistema elétrico a ser analisado. Arquivo *Curva_Variação* que indica as alterações que devem ser efetuadas no sistema de potência simulado ao longo do tempo.

Arquivos de Saída: O arquivo gerado é o *Modelo_SEP_Modificado*, que contém a atualização do sistema de potência simulado.

- **NFCORR:** Este programa foi desenvolvido em Fortran e calcula o fluxo de potência para um sistema de energia elétrica usando o método de Newton sem desacoplamento, porém lançando mão de técnicas de esparsidade e ordenação.

Arquivos de Entrada: Arquivo *Modelo_SEP_Modificado* contendo a topologia e os parâmetros do sistema elétrico a ser analisado.

Arquivo de Saída: O arquivo gerado contém a solução do fluxo de potência do sistema analisado. Neste arquivo são indicados os valores verdadeiros (isto é, sem erros) para todas variáveis medidas do sistema.

- **SimmedF:** O programa, desenvolvido em Fortran, simula medidas realizadas em um dado sistema de potência, através da superposição de números aleatórios, gerados na faixa prescrita pela precisão que o usuário deseja, sobre os valores atuais das quantidades medidas.

Arquivos de Entrada: Este aplicativo necessita de duas entradas, a primeira é o arquivo de saída do NFCORR e a segunda é o arquivo *Plano_Medição SCADA ou SMSF*. Importante ressaltar que o plano de medição contém a "semente", número determinado pelo usuário entre 1 e 2147483647, que é a responsável por fornecer os erros aleatórios de medição.

Arquivo de Saída: O arquivo gerado contém as medidas contaminadas pelos erros de medição bem como os dados para montagem da matriz R^{-1} de covariâncias das medidas.

- **Change_Seed:** Este aplicativo foi desenvolvido em Matlab e é responsável por alterar a "semente" dos planos de medição utilizados pelo SimmedF, garantindo que as diversas medições realizadas durante a simulação serão geradas de maneira aleatória.

Arquivos de Entrada: Plano de medição SCADA e SMSF.

Arquivos de Saída: O arquivo gerado é o *Plano_Medição_Modificado*, que contém a atualização da "semente" do plano de medição original.

- **GIV_Med:** Este aplicativo, desenvolvido em Matlab, tem a função de obter e armazenar os dados do arquivo de saída do SimmedF, gerando um banco de dados que permite a realização dos testes de média e de desvio-padrão efetuados pelo bloco de tratamento de medidas fasoriais.

Arquivo de Entrada: As entradas desse aplicativo são as saídas do SimmedF proveniente SMSF.

Arquivo de Saída: Matriz contendo as medidas SMSF e matriz contendo os valores das variâncias das medidas.

- **t_test e Std_test:** Estes aplicativos, desenvolvidos em Matlab, realizam o teste t de Student e o teste de desvio-padrão proposto.

Arquivo de Entrada: As entradas desse aplicativo são provenientes do banco de dados de medidas SMSF.

Arquivo de Saída: Vetor contendo o número de medidas SMSF válidas para cada UMF instalada.

- **BUFFER:** Este aplicativo, calcula as médias das medidas SMSF válidas e os valores das variâncias calculadas dessas médias.

Arquivo de Entrada: Vetor de resultados dos testes t e de variância das medidas SMSF.

Arquivo de Saída: Vetor contendo a média das medidas SMSF válidas e os valores para formação da matriz de covariância das medidas R^{-1} .

- **Build_Dad:** Este aplicativo, desenvolvido em Matlab, permite a utilização da rotina para estimação de estados através do Método Híbrido Simultâneo.

Arquivos de Entrada: As entradas desse aplicativo são as medidas SCADA e as medidas SMSF, tanto as provenientes do bloco de tratamento de medidas fasoriais, quanto as medidas obtidas do último modelo do sistema de potência simulado.

Arquivos de Saída: O arquivo de saída é um arquivo com as mesmas características do arquivo gerado pelo SimmedF, contendo a união das medidas simuladas pelos sistemas SCADA e SMSF.

- **ESTIMGIV:** O programa, desenvolvido em Fortran, realiza a estimação de estados do sistema de potência em análise, levando em consideração as diversas medidas simuladas fornecidas pelos sistemas SCADA e SMSF.

Arquivos de Entrada: Este aplicativo utiliza o arquivo gerado pelo aplicativo Build_Dad.

Arquivos de Saída: O arquivo gerado, contém o vetor de estimativas ótimas (\hat{x}^*) do sistema, com as magnitudes e ângulos estimados das tensões das barras.

O fluxo do processo de simulações da EESP do sistema de potência, inicia com a realização do bloco "SMSF" (ver Figura 8). Nesse bloco são realizadas as variações de carga do sistema de potência em análise e geradas as respectivas medições fasoriais de cada ponto de operação. Esse processo é realizado 900 vezes, de modo a simular a variação

do SEP em um período de 30 segundos. Após, é realizado o bloco de "Tratamento de Medidas Fasoriais", que é responsável por gerar o vetor contendo a média das medidas SMSF válidas e suas respectivas variâncias dos erros de medição R_{ii} . Em paralelo, é realizado o bloco "SCADA", que obtém as medidas convencionais do último estado do SEP para realização da EESP. Por fim, no bloco "Híbrido", é realizada a EESP através dos dois métodos propostos.

O processo completo da simulação, conforme indicado na Figura 8, é realizado 100 vezes para cada modelo de sistema de potência analisado. Dessa forma, é possível, através das saídas da EESP geradas pelos dois métodos, realizar a comparação dos resultados obtidos, e pode-se verificar se o vetor de estimativas ótimo gerado através do *buffer* de medidas fasoriais, obteve melhor desempenho que o vetor de estimativas ótimo gerado através da utilização da última medida fasorial realizada.

5.2 VARIÂNCIAS DAS MEDIDAS SIMULADAS

No processo de simulação de medidas utilizado para obtenção dos resultados apresentados neste capítulo, é também necessário calcular o vetor R_{ii} , de dimensão 1×2 , que contém os valores das variâncias das medidas que compõe o vetor $Z_{f_{final}}$. Esses valores serão utilizados para montagem da matriz de covariância R^{-1} utilizada na EESP. O cálculo de R_{ii} é dado por:

$$R_{ii} = [R_{iiM}, R_{iiF}]$$

$$R_{iiM} = 1/((ACCPS * Z_{f_{M_{final}}})^2 + ACCRP^2);$$

$$R_{iiF} = 1/((ACCPS * Z_{f_{F_{final}}})^2 + ACCRP^2);$$

onde:

$ACCPS, ACCRP$: São respectivamente, as precisões para simulação e cálculo da variância das medidas.

Cada unidade de medição fasorial instalada no sistema gerará medidas que serão agregadas ao vetor de medidas final ($Z_{f_{final}}$), e um vetor contendo as variâncias das medidas R_{ii} , que por fim serão encaminhados para a execução da estimação híbrida de estados do sistema elétrico de potência.

5.3 PLANOS DE MEDIÇÃO

Como visto anteriormente, o plano de medição é um documento de entrada do aplicativo SimmedF. Através desses planos, é simulada a alocação dos sensores nas barras e linhas de transmissão do sistema de potência em análise. Para elaboração desse trabalho, considera-se que as medidas SCADA obtidas do sistema são compostas por medidas de injeção de potência ativa e reativa das barras, magnitude de tensão das barras e fluxo de potência ativa e reativa nas linhas de transmissão. As medidas SMSF são compostas por unidades de medição fasoriais (UMFs), que neste caso, realizam apenas a medição do fasor (módulo e ângulo) de tensão da barra onde estão instaladas.

Os planos de medição foram elaborados visando garantir a observabilidade do sistema de potência simulado. O conceito de observabilidade de um sistema de potência está indicado a seguir:

Um sistema de potência é observável, no sentido da estimação estática de estados, com respeito a um dado conjunto de medidas M se as variáveis de estado do sistema (módulos e ângulos das tensões em todas as barras) podem ser determinadas através do processamento das medidas em M por um estimador de estados. Em caso contrário, o sistema é considerado não-observável em respeito a M (SIMÕES-COSTA; SALGADO, 2002, p. 80).

Sendo assim, os planos formulados devem garantir um índice mínimo de redundância global ($\rho \geq 1$), onde:

$$\rho \equiv \frac{m}{n} = \frac{m}{2N - 1} \quad (26)$$

tal que:

m : número de medidas;

n : número de variáveis do sistema;

N : número de barras do sistema.

Nos planos SMSF elaborados para os sistemas de 57 barras e 118 barras, é simulada a existência de uma UMF instalada em todas as barras do sistema. As medições da UMF da barra 1 são utilizadas apenas como referência angular, e portanto não são explicitamente utilizadas na EESP. Já o plano SCADA foi elaborado de modo que a soma dos dois planos de medição se aproximem de um índice de redundância global $\rho \simeq 2$.

As precisões adotadas para os sensores SCADA e SMSF foram definidas conforme considerações efetuadas na Seção 2. Esses valores também são definidos no plano de medição. A seguir estão indicadas as precisões utilizadas para realização das simulações:

- $2 \cdot 10^{-2}$ Injeção e fluxo de potência ativa e reativa oriundas do sistema SCADA;
- $1 \cdot 10^{-2}$ Módulo da tensão nas barras oriundas do sistema SCADA;
- $5 \cdot 10^{-3}$ Módulo e fase das tensões do SMSF.

5.4 MÉTRICA DE TENSÃO

Conforme apresentado na Seção 5.5, para realizar as simulações, são utilizados dois sistemas teste distintos, IEEE 57 e 118 barras. Sendo assim, para que seja possível ter uma visão global e comparar os resultados obtidos nas diferentes simulações, é utilizado cálculo da métrica de tensão, proposta em KEMA (2006), ponderada pelo número de barras do sistema teste, conforme segue:

$$M_{\vec{V}} = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |\vec{V}_{est}^i - \vec{V}_{ver}^i|^2 \right)^{1/2} \quad (27)$$

tal que:

\vec{V}_{est}^i : valor estimado do fasor de tensão associado a i-ésima barra da rede;

\vec{V}_{ver}^i : valor real do fasor de tensão associado a i-ésima barra da rede;

N : número de barras do sistema.

5.5 SISTEMAS-TESTE IEEE

Como visto anteriormente, a entrada do NFCORR requer um modelo do sistema elétrico contendo sua topologia e seus parâmetros. Para isso, é necessário configurar um arquivo com o cadastro dessas informações e nos moldes requeridos pelo aplicativo. Na tabela 4 abaixo, é possível observar os componentes desse arquivo.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema elétrico de potência

Colunas	Parâmetro	Tipo	Formato
01 – 04	Barra de partida	Inteiro	I4
09 – 12	Barra de chegada	Inteiro	I4
14	Identif. circuito	Inteiro	I1
18 – 23	Resistência (%)	Real	F6.2
24 – 29	Reatância série (%)	Real	F6.2
30 – 35	Potência reativa <i>shunt</i> (MVA _r)	Real	F6.3
36 – 40	Ajuste do <i>tap</i> (pu)	Real	F5.3
41 – 45	Limite superior do <i>tap</i> (pu)	Real	F5.3
46 – 50	Limite inferior do <i>tap</i> (pu)	Real	F5.3
57 – 60	Barra em que o <i>tap</i> difere do nominal	Inteiro	I4

Fonte: Documentação NFCORR (2005).

Neste trabalho, são utilizados dois sistemas de potência distintos, o sistema IEEE 57 barras e o sistema IEEE 118 barras. Esses sistemas foram padronizados pela *University of Washington* e são amplamente utilizados em estudos sobre o tema em todo o mundo. No anexo A, é possível verificar a topologia dessas redes; os demais parâmetros dos sistemas podem ser consultados em Christie (Ago. 1993).

5.6 NÚMERO DE SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações foram realizadas com a utilização dos aplicativos e métodos explicitados na Seção 5.1. Com o intuito de obter resultados mais confiáveis, foram realizadas 100 (cem) simulações para cada caso considerado. Os processos desenvolvidos, simulam as alterações naturais existentes em sistemas de potência (variação de potência ativa e reativa das cargas) durante um período de 30 segundos, decorridos nos intervalos entre as execuções da EESP.

Sendo assim, considerando uma taxa de 30 amostras por segundo coletadas pelas UMFs instaladas nas barras do sistema. Cada simulação gerou 1800 medidas por ciclo, 900 de magnitude e 900 de fase, para cada UMF instalada. Após esse estágio de coleta de amostras, a simulação executa os processos de testes de desvio de média e de desvio-padrão dos blocos de amostras (30 medidas por bloco) formando o *buffer* de medidas fasoriais ótimo. Por fim, executa dois processos de EESP, um com amostras SCADA e SMSF provenientes do último estado do sistema (Método 1), e um com as mesmas amostras SCADA porém utilizando o *buffer* de medidas SMSF (Método 2).

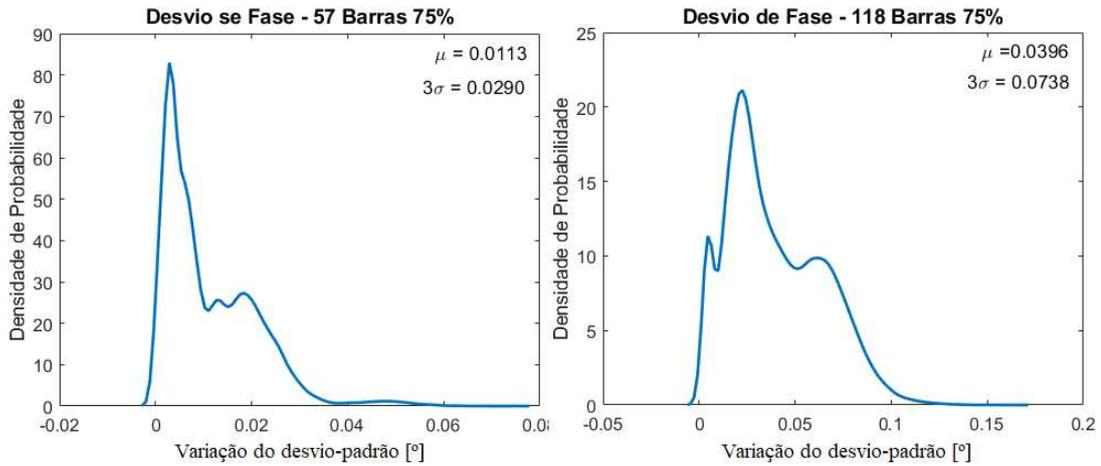
Por fim, a simulação gera os resultados obtidos, através de gráficos contendo as informações provenientes dos dois métodos aplicados (1 e 2). Para cada barra do sistema, os gráficos contém as seguintes informações: métricas de tensão obtidas para cada simulação efetuada, média dos erros absolutos de magnitude e fase dos valores medidos em relação aos valores reais e média do número de medidas consideradas válidas para composição do *buffer* de medidas fasoriais ótimo.

5.7 LIMIARES DO TESTE DO DESVIO-PADRÃO

Para determinar os limiares de magnitude (λ) e de fase (ψ), a serem implementados no teste do desvio-padrão, foram efetuadas 30.000 (trinta mil) simulações de medidas fasoriais para cada barra dos sistemas IEEE 57 e 118 barras. Os sistemas permaneceram em condição de operação estática durante a obtenção das medidas. Após, foram criados os subconjuntos de medidas fasoriais, dados pelas matrizes $Z_{f_{Mb}} = [Z_{f_{Mb}}(1), Z_{f_{Mb}}(2), \dots, Z_{f_{Mb}}(1000)]^T$ e $Z_{f_{Fb}} = [Z_{f_{Fb}}(1), Z_{f_{Fb}}(2), \dots, Z_{f_{Fb}}(1000)]^T$. Com isso, foi possível calcular o desvio-padrão de cada bloco e formar os vetores contendo o desvio-padrão dos blocos de magnitude e fase da tensão das barras. Além disso, os testes são repetidos para os sistemas com 75%, 100% e 125% da carga instalada.

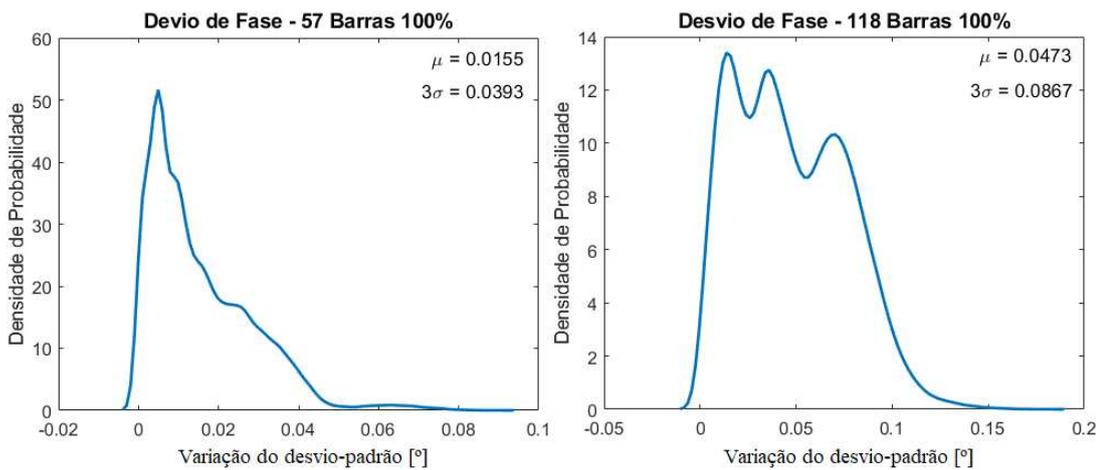
Para realizar a avaliação dos desvios-padrão dessas matrizes, construímos gráficos contendo a densidade de probabilidade de cada matriz. Além disso, são apresentados os valores das médias e de três desvios-padrão das medidas realizadas. Os gráficos das Figuras 9, 10 e 11, mostram os valores obtidos no estudo de desvio de fase das tensões das amostras. Já as Figuras 12, 13 e 14, apresentam os valores obtidos no estudo de desvio de magnitude das tensões.

Figura 9 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 75%



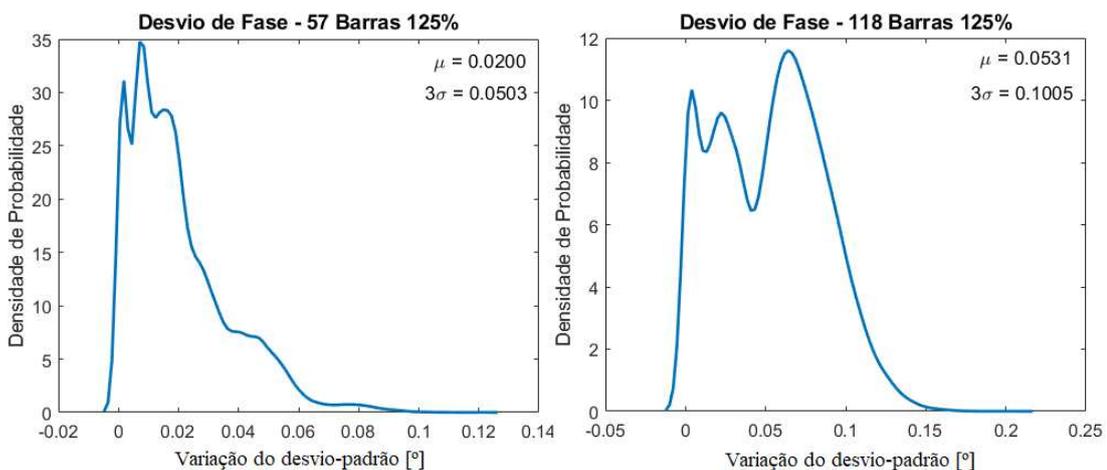
Fonte: O Autor (2023).

Figura 10 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 100%



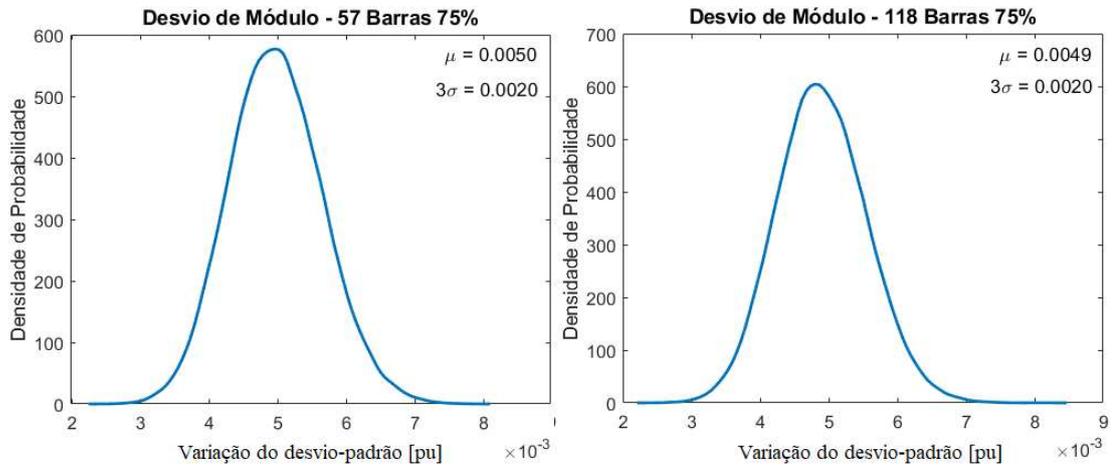
Fonte: O Autor (2023).

Figura 11 – Densidade de probabilidade de desvio de fase - Carga 125%



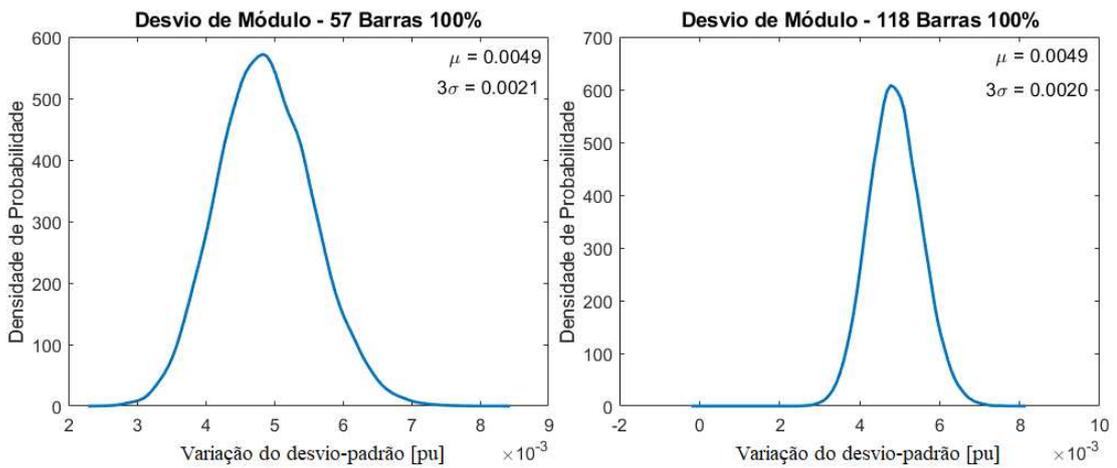
Fonte: O Autor (2023).

Figura 12 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 75%



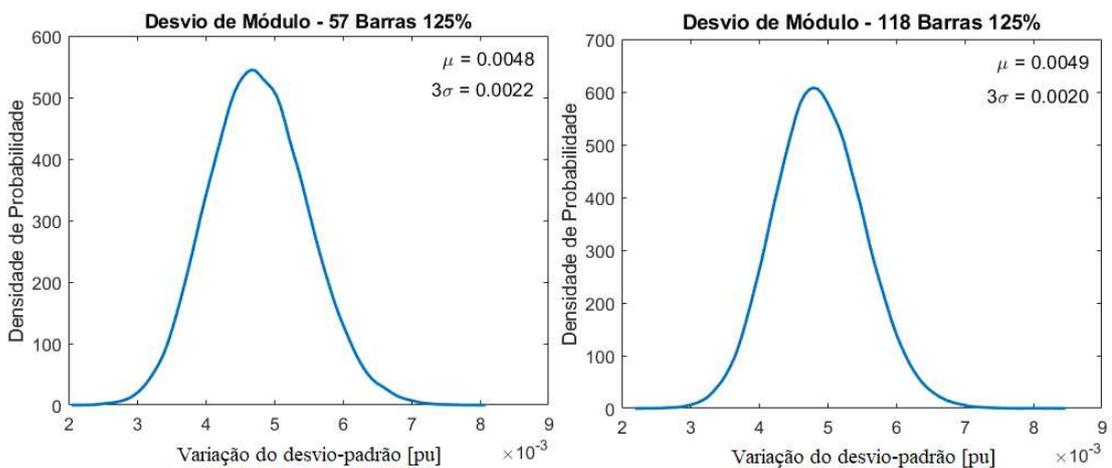
Fonte: O Autor (2023).

Figura 13 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 100%



Fonte: O Autor (2023).

Figura 14 – Densidade de probabilidade de desvio de módulo - Carga 125%



Fonte: O Autor (2023).

Analisando os gráficos gerados, foi possível determinar os valores dos limiares de magnitude (λ) e de fase (ψ) dos sistemas estudados. Como pretendemos utilizar os mesmos valores para qualquer carregamento do sistema, esses limiares foram definidos de acordo com os valores máximos encontrados para cada sistema. Como pode ser observado nos gráficos apresentados, o valor do desvio de magnitude das amostras praticamente não sofreu alteração para nenhum caso considerado, já os valores de desvio de fase sofreram pequenas alterações conforme a carga dos sistemas é alterada. Sendo assim, os limiares foram definidos conforme segue:

$$\lambda = \mu + 3\sigma \simeq 0,007pu \quad (\text{Sistemas 57 e 118 barras})$$

$$\psi = \mu + 3\sigma \simeq 0,070^\circ \quad (\text{Sistema 57 barras})$$

$$\psi = \mu + 3\sigma \simeq 0,150^\circ \quad (\text{Sistema 118 barras})$$

5.8 NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA DO TESTE DO DESVIO DA MÉDIA

Como visto na Seção 4.2, valores comuns adotados para o teste t de Student para o desvio da média, são $\alpha = 0,01$, $\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,10$. Para determinar o valor adotado nas simulações, realizamos diversos testes utilizando diferentes curvas de variação de carga. O primeiro objetivo, foi determinar o comportamento do teste t de Student nos sistemas em condição de operação estática. Nesse caso, o número ótimo de medidas fasoriais para compor o *buffer*, seria de 900 medidas. Os resultados desses testes podem ser verificados na Tabela 5.

Tabela 5 – Média de Medidas fasoriais válidas

Sistema	$\alpha = 1\%$	$\alpha = 5\%$	$\alpha = 10\%$
57	858,85	544,53	314,43
118	842,32	557,54	319,14

Fonte: O Autor (2023).

Além dos testes em sistemas em condição de operação estática, foram executados diversos testes em sistemas variados. Em cada teste, avaliamos se o algoritmo foi capaz de identificar o momento onde ocorreu a variação do sistema. Os resultados obtidos demonstram que o teste t de Student é muito sensível a pequenas variações de carga, sendo o nível de significância $\alpha = 0,01$ adequado para todos os casos simulados.

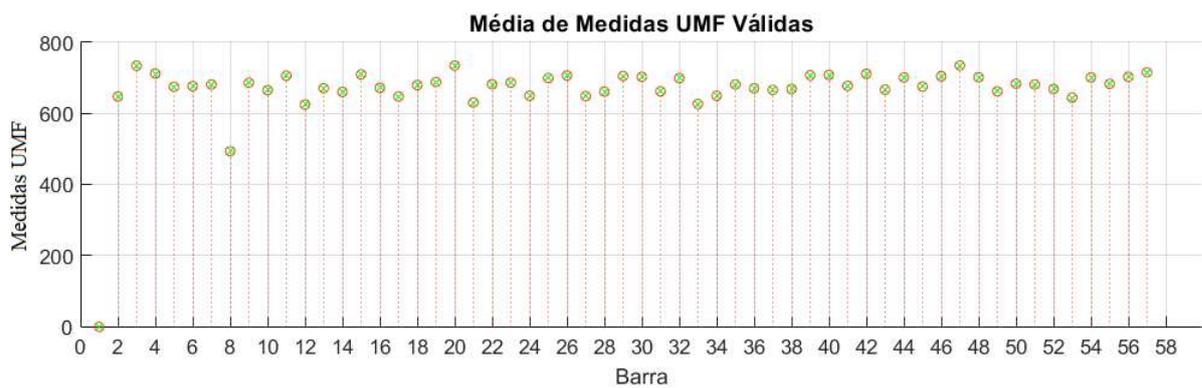
5.9 CASO BASE - CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO ESTÁTICA

Para determinar um parâmetro de comparação de resultados, primeiramente realizamos as simulações para os sistemas-teste IEEE 57 e 118 barras, considerando a condição de operação estática durante toda o período (30 segundos). Dessa forma, foi possível observar o comportamento do algoritmo na determinação e aplicação do *buffer* de medidas fasoriais ótimo sem a ocorrência de alterações nas cargas conectadas às barras desses sistemas.

5.9.1 Medidas Fasoriais Válidas - Caso Base - Condição de Operação Estática

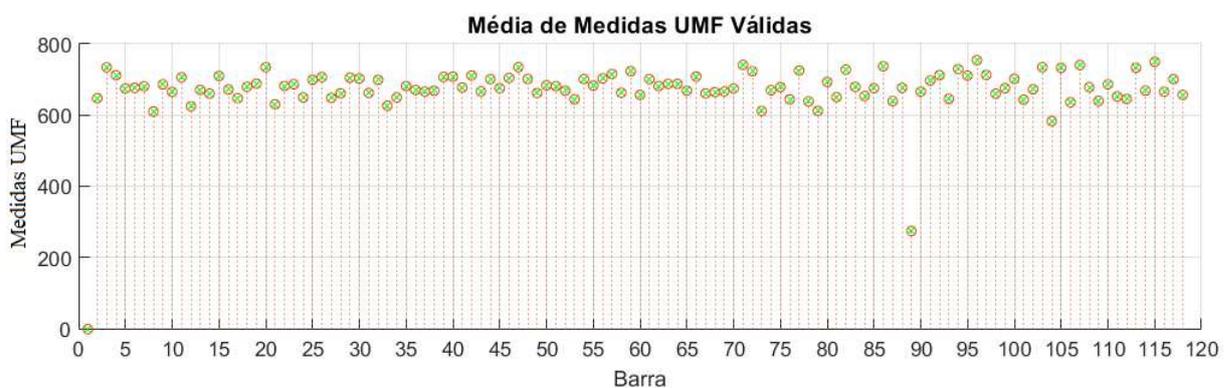
Nas figuras 15 e 16 é possível verificar a média das quantidades de medidas fasoriais consideradas válidas para o caso base, sem alteração de carga nas barras do sistema. Cada medida se refere ao par, magnitude e ângulo das tensões das barras.

Figura 15 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso base



Fonte: O Autor (2023).

Figura 16 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso base



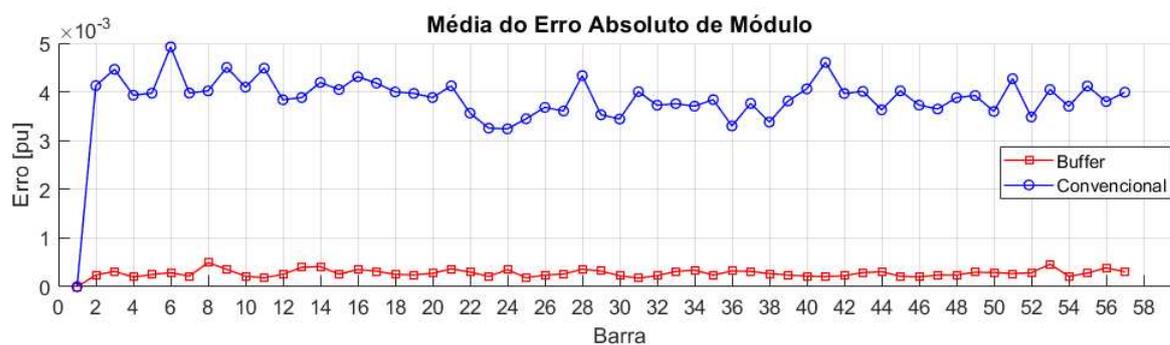
Fonte: O Autor (2023).

Nesse caso, como o sistema não sofre alteração de carga, a situação ideal acontece se todas as medidas (900) forem consideradas válidas dentro do período analisado. A média geral de medidas fasoriais consideradas válidas para o sistema de 57 barras foi de 677,38 medidas por barra, com destaque para a barra 8, que apresentou, em média, apenas 492,94 medidas válidas por simulação. A média geral para o sistemas de 118 barras foi de 676,66 medidas válidas por barra. Na barra 89, foram consideradas válidas, em média, 274,67 medidas por simulação. Como vimos, os valores obtidos para os dois sistemas foram semelhantes.

5.9.2 Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso Base - Condição de Operação Estática

Nas Figuras 17, 18, 19 e 20, é possível realizar a comparação entre as últimas medidas obtidas pelo sistema SMSF (convencional) e as medidas obtidas através da média aritmética do *buffer* de medidas fasoriais ótimas. As medidas foram comparadas diretamente aos valores reais dos estados do sistema.

Figura 17 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso base



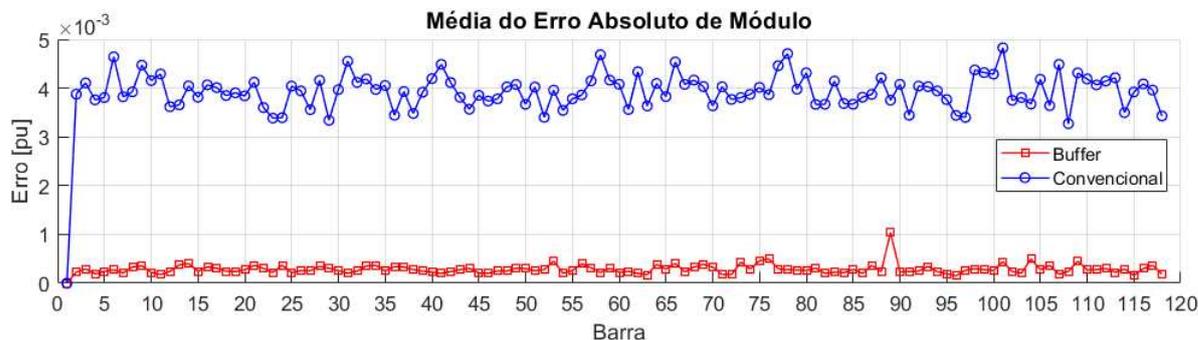
Fonte: O Autor (2023).

Figura 18 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso base



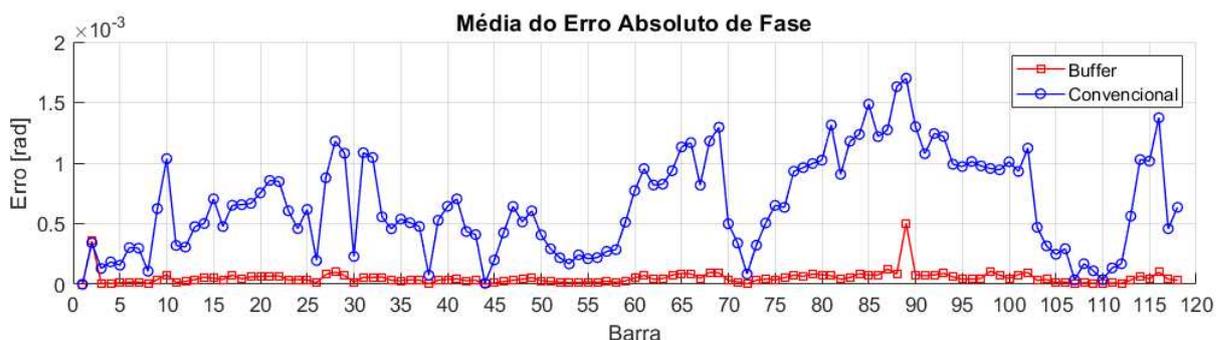
Fonte: O Autor (2023).

Figura 19 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso base



Fonte: O Autor (2023).

Figura 20 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso base



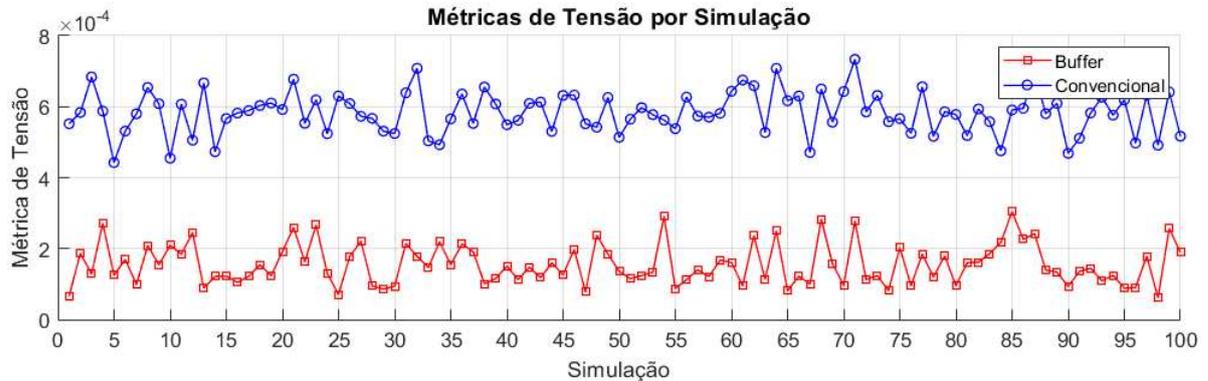
Fonte: O Autor (2023).

Para o sistema IEEE 57 barras, o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi de $3,9072 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $2,1409 \cdot 10^{-4} rad$ para fase. Já o erro médio do *buffer* de medidas foi de $2,8113 \cdot 10^{-4} pu$ para magnitude e $1,6439 \cdot 10^{-5} rad$ para fase. Para o sistema IEEE 118 barras o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi de $3,9448 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $6,6621 \cdot 10^{-4} rad$ para fase. Já o erro médio do *buffer* de medidas foi de $2,8618 \cdot 10^{-4} pu$ para magnitude e $5,2015 \cdot 10^{-5} rad$ para fase.

5.9.3 Métricas de Tensão - Caso Base - Condição de Operação Estática

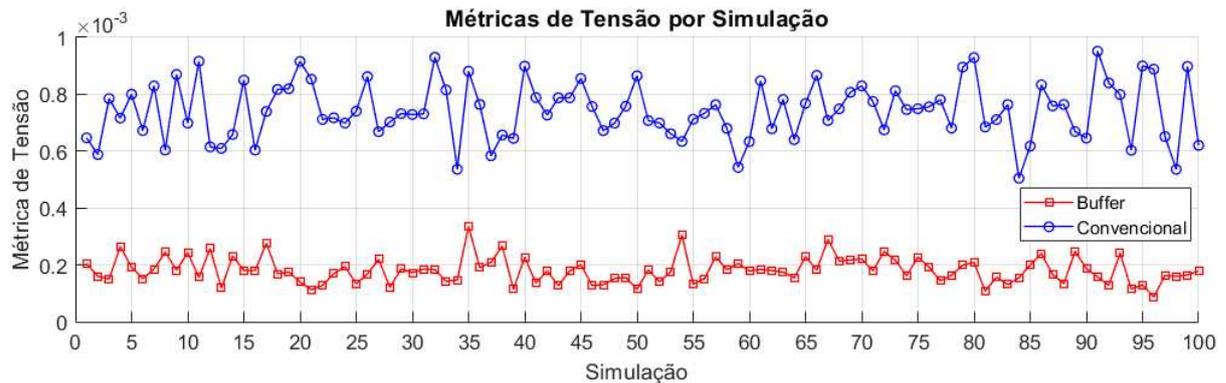
Para avaliar a qualidade da estimação de estados dos sistemas, nas Figuras 21 e 22, são apresentados as métricas de tensão dos valores estimados pela EESP, calculados conforme Seção 5.4 para cada simulação realizada.

Figura 21 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso base



Fonte: O Autor (2023).

Figura 22 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso base



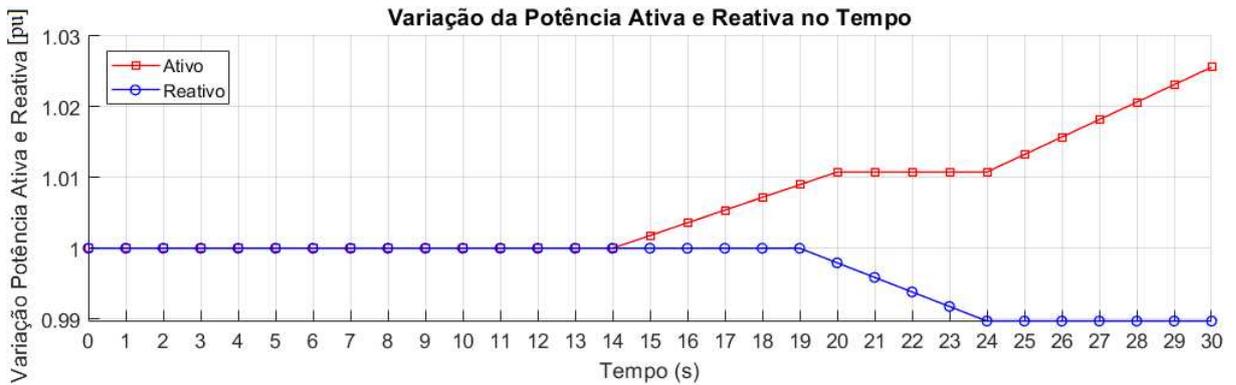
Fonte: O Autor (2023).

No sistema IEEE 57 barras, a média geral das métricas de tensão obtidas foi de $5,8216 \cdot 10^{-4}$ para a EESP convencional e $1,5625 \cdot 10^{-4}$ para a EESP com utilização do *buffer*. No sistema IEEE 118 barras, a média geral das métricas de tensão obtidas foi de $7,4102 \cdot 10^{-4}$ para a EESP convencional e $1,8204 \cdot 10^{-4}$ para a EESP com a utilização do *buffer*.

5.10 CASO 1

Nesta simulação, visando reproduzir as variações naturais dos grandes sistemas de potência, é inserida uma variação nas cargas ativas e reativas instaladas nas barras dos sistemas teste IEEE 57 e 118 barras. Essas variações são efetuadas através da inserção de multiplicadores que realizam a alteração dessas grandezas a cada iteração do aplicativo, ver Seção 5.1, a curva utilizada no Caso 1 pode ser verificada na Figura 23.

Figura 23 – Curva de variação de potência ativa e reativa - Caso 1



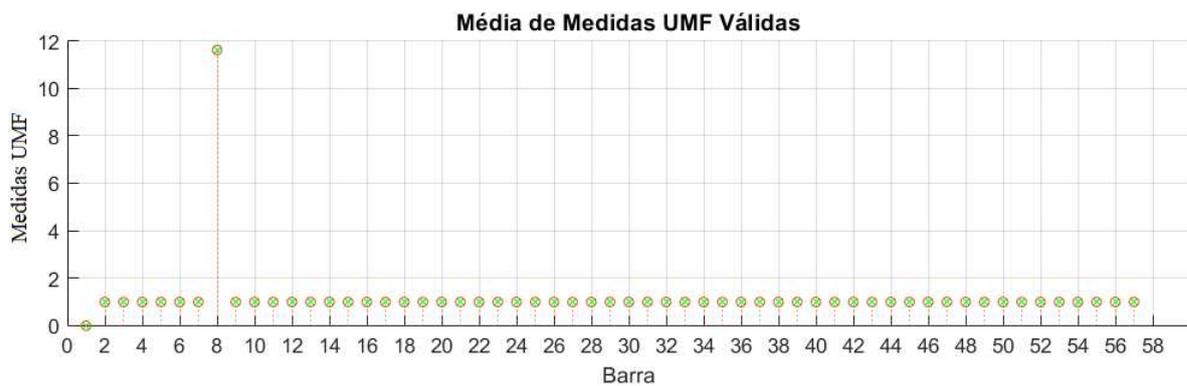
Fonte: O Autor (2023).

Como a última variação do sistema ocorre no fim do período considerado, o algoritmo deve ser capaz de detectar essa variação, e o *buffer* de medidas fasoriais ótimo deve ser composto apenas pelas últimas medidas efetuadas, logo, o resultado esperado é o mesmo do obtido com o processo convencional.

5.10.1 Medidas Fasoriais Válidas - Caso 1

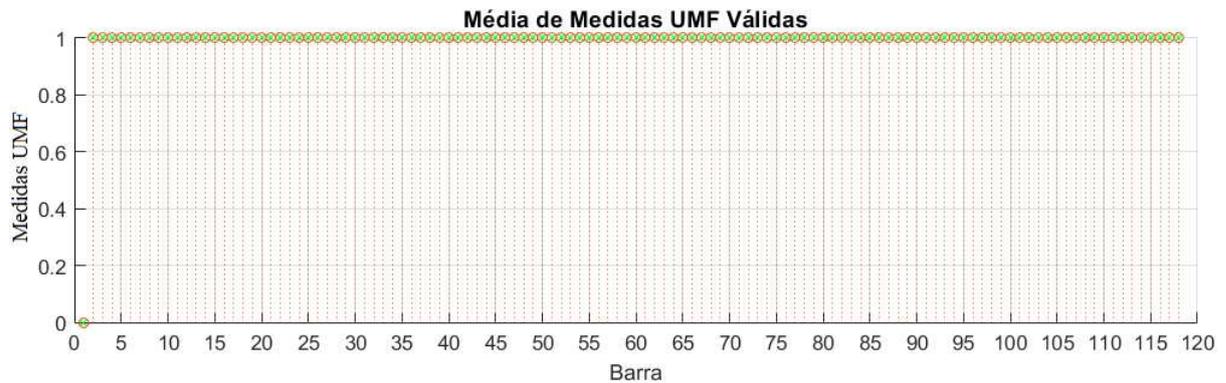
Nas figuras 24 e 25 é possível verificar a média das quantidades de medidas fasoriais (magnitude e ângulo) consideradas válidas para o caso 1.

Figura 24 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso 1



Fonte: O Autor (2023).

Figura 25 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso 1



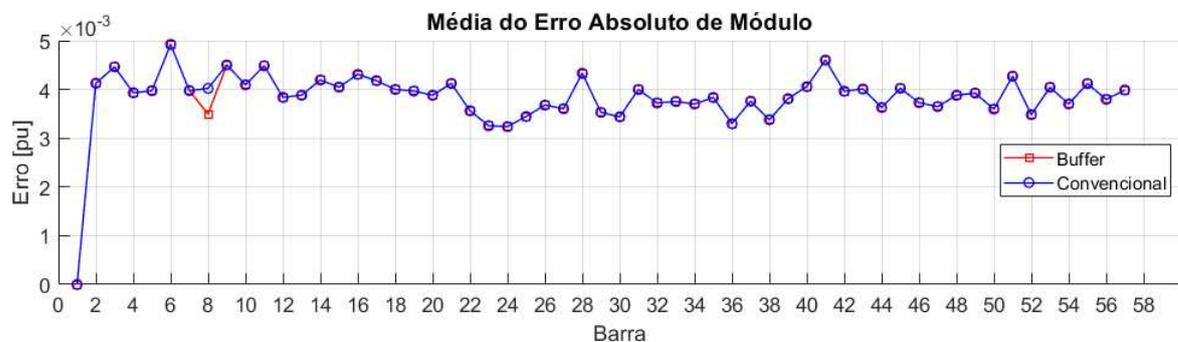
Fonte: O Autor (2023).

A média geral de medidas fasoriais consideradas válidas para o sistema de 57 barras foi de 1,1894 medidas por barra, valor um pouco superior ao esperado, em virtude da falha ocorrida na barra 8, cuja média foi de aproximadamente 12 medidas válidas por simulação. No restante das barras, o resultado ocorreu conforme esperado. A média geral para o sistemas de 118 barras foi de 1 medida válida por barra, neste caso não houve nenhuma falha na detecção de alteração do sistema.

5.10.2 Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso 1

Nas Figuras 26, 27, 28 e 29, é possível realizar a comparação entre as últimas medidas obtidas pelo sistema SMSF (convencional) e as medidas obtidas através da média aritmética do *buffer* de medidas fasoriais ótimo. As medidas foram comparadas diretamente aos valores reais dos estados do sistema.

Figura 26 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso 1



Fonte: O Autor (2023).

Figura 27 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso 1



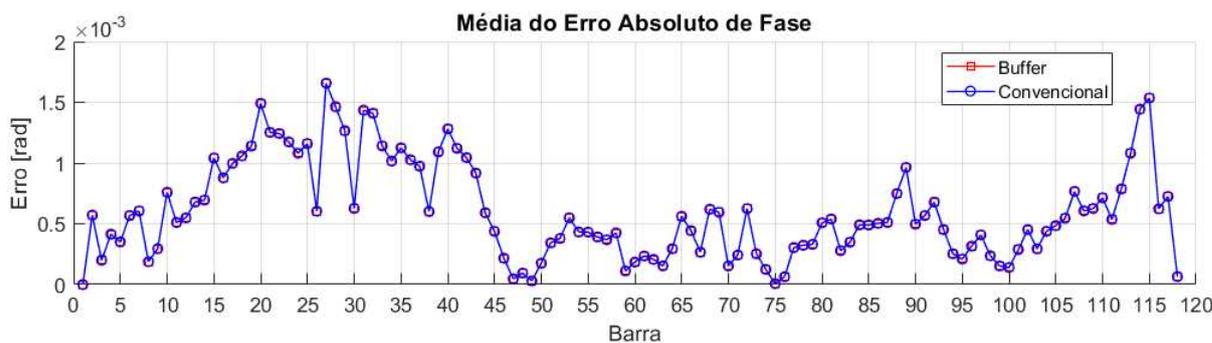
Fonte: O Autor (2023).

Figura 28 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso 1



Fonte: O Autor (2023).

Figura 29 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso 1



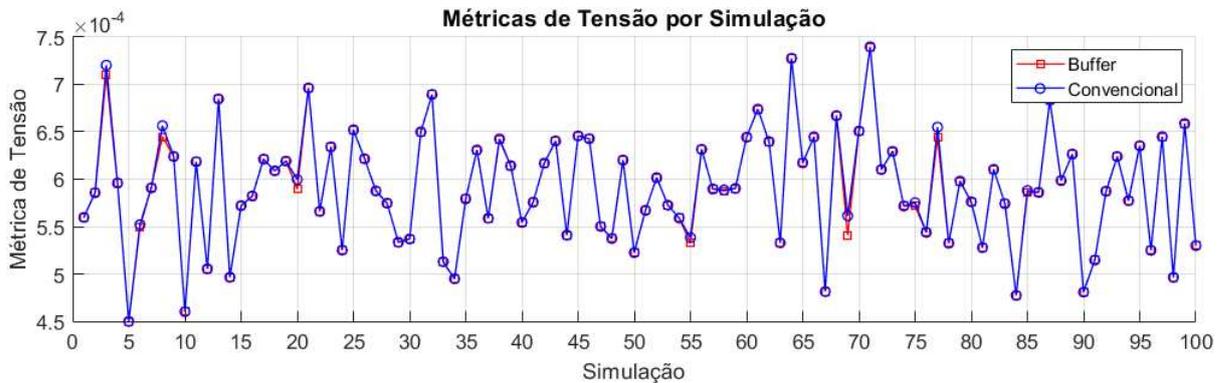
Fonte: O Autor (2023).

Para o sistema IEEE 57 barras, o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi de $3,9057 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $2,1670 \cdot 10^{-4} rad$ para fase, já o erro médio do *buffer* de medidas foi de $3,8963 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $2,1720 \cdot 10^{-4} rad$ para fase. Para o sistema IEEE 118 barras o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi igual para os dois métodos de medição, $3,8903 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $6,0683 \cdot 10^{-4} rad$ para fase.

5.10.3 Métricas de Tensão - Caso 1

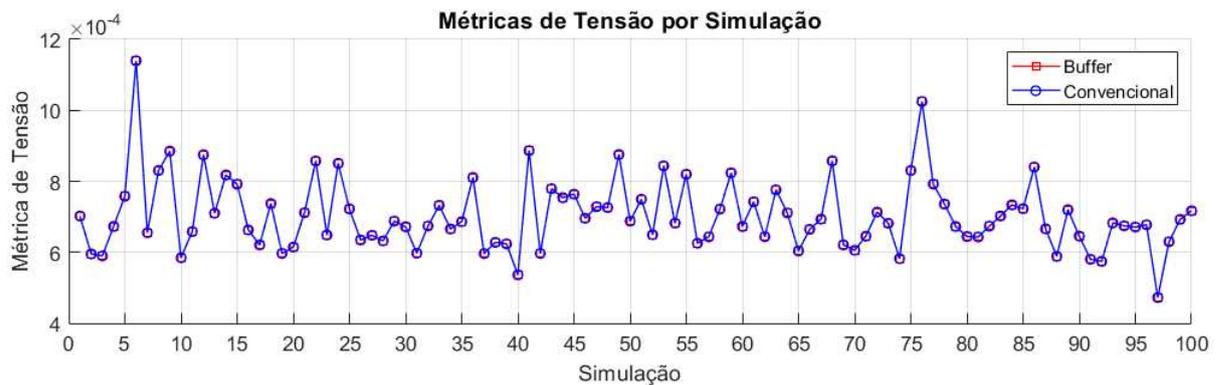
Nas Figuras 30 e 31, são apresentados as métricas de tensão dos valores estimados pela EESP, calculados conforme Seção 5.4 para cada simulação realizada. Os resultados obtidos demonstram que a qualidade geral da EESP foi mantida, o que era esperado já que os vetores de medidas fasoriais utilizados na EESP são idênticos para o sistema-teste IEEE 118 barras, ou quase idênticos no caso do sistema-teste IEEE 57 barras devido à falha na detecção da barra 8.

Figura 30 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso 1



Fonte: O Autor (2023).

Figura 31 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso 1



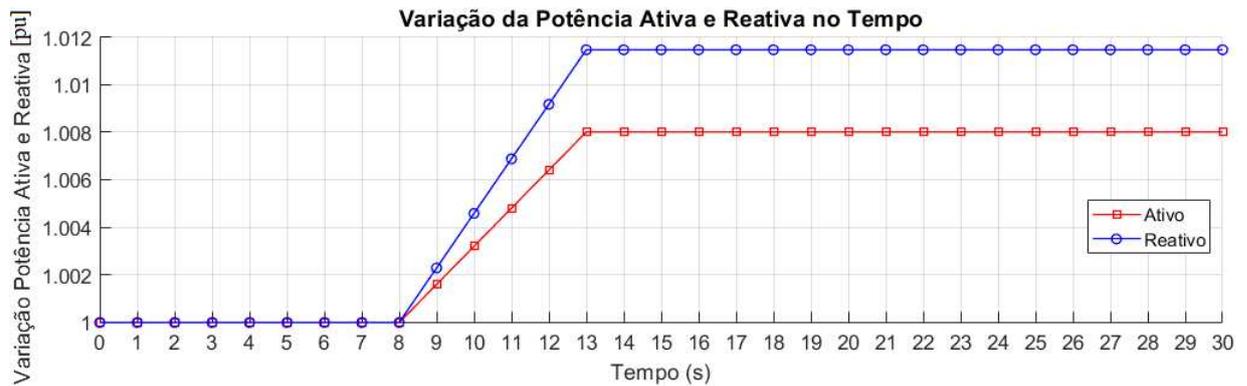
Fonte: O Autor (2023).

No sistema IEEE 57 barras, a média geral das métricas de tensão obtida foi de $5,9112 \cdot 10^{-4}$ para a EESP convencional e $5,9033 \cdot 10^{-4}$ para a EESP com utilização do *buffer*. No sistema IEEE 118 barras, a média geral das métricas de tensão obtidas foi de $7,0431 \cdot 10^{-4}$ nos dois modelos de medição.

5.11 CASO 2

Do mesmo modo que no caso 1, nessa simulação, foi inserida uma variação nas cargas ativas e reativas instaladas nas barras dos sistemas teste IEEE 57 e 118 barras (Seção 5.1). A curva utilizada no Caso 2 pode ser verificada na Figura 32.

Figura 32 – Curva de variação de potência ativa e reativa - Caso 2



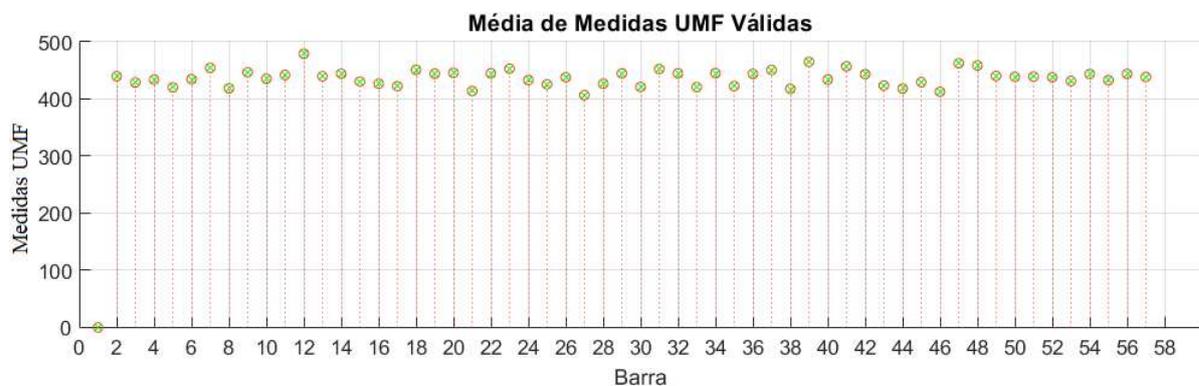
Fonte: O Autor (2023).

Como a última variação do sistema ocorre aos 13 segundos, é esperado que o algoritmo seja capaz de detectar essa variação, e o *buffer* de medidas fasoriais ótimo, deve ser composto por 510 medidas por barra.

5.11.1 Medidas Fasoriais Válidas - Caso 2

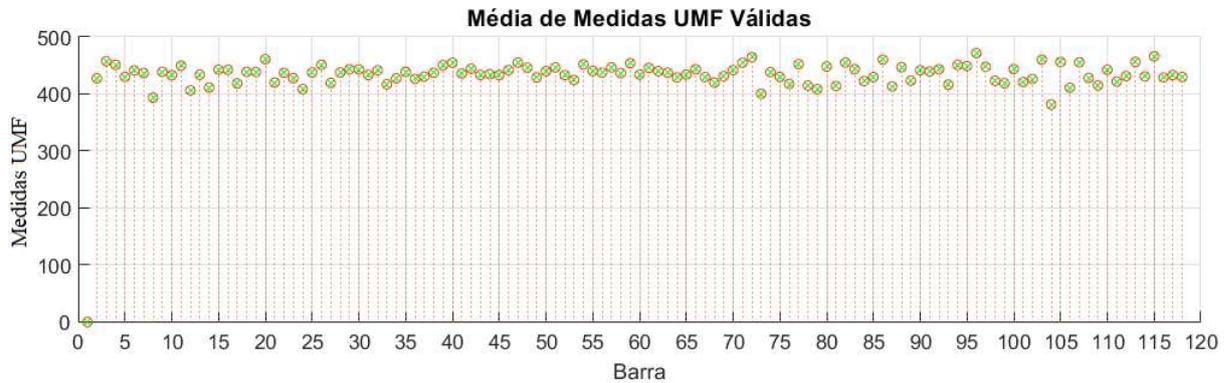
Nas figuras 33 e 34 é possível verificar a média das quantidades de medidas fasoriais (magnitude e ângulo) consideradas válidas para o caso 2.

Figura 33 – Média das medidas UMF válidas - 57 barras - Caso 2



Fonte: O Autor (2023).

Figura 34 – Média das medidas SMSF válidas - 118 barras - Caso 2



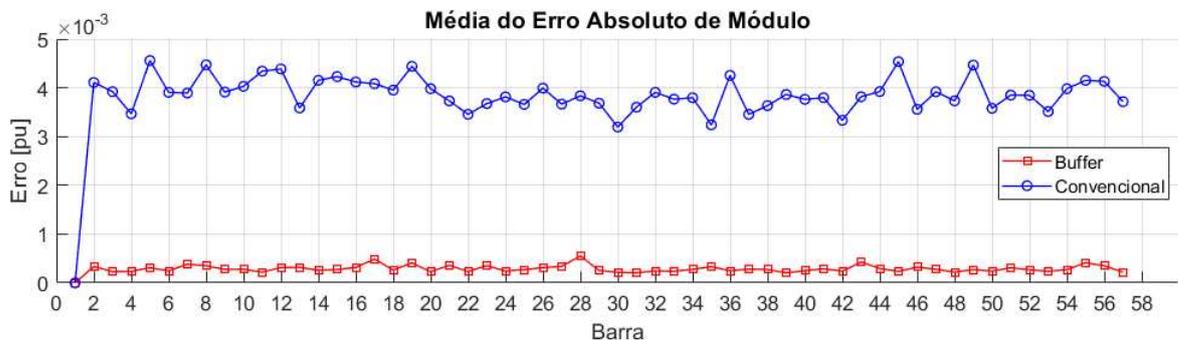
Fonte: O Autor (2023).

A média geral de medidas fasoriais consideradas válidas para o sistema de 57 barras foi de 436,62 medidas por barra. Todas as barras obtiveram desempenho próximo à média. Já a média geral para o sistemas de 118 barras foi de 434,76 medidas válidas por barra. Assim como no sistema IEEE 57 barras, todas as barras obtiveram desempenho próximo à média.

5.11.2 Erros Associados às Medidas Fasoriais - Caso 2

Nas Figuras 35, 36, 37 e 38, é possível realizar a comparação entre as últimas medidas obtidas pelo sistema SMSF (convencional) e as medidas obtidas através da média aritmética do *buffer* de medidas fasoriais ótimas. As medidas foram comparadas diretamente aos valores reais dos estados do sistema.

Figura 35 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 57 barras - Caso 2



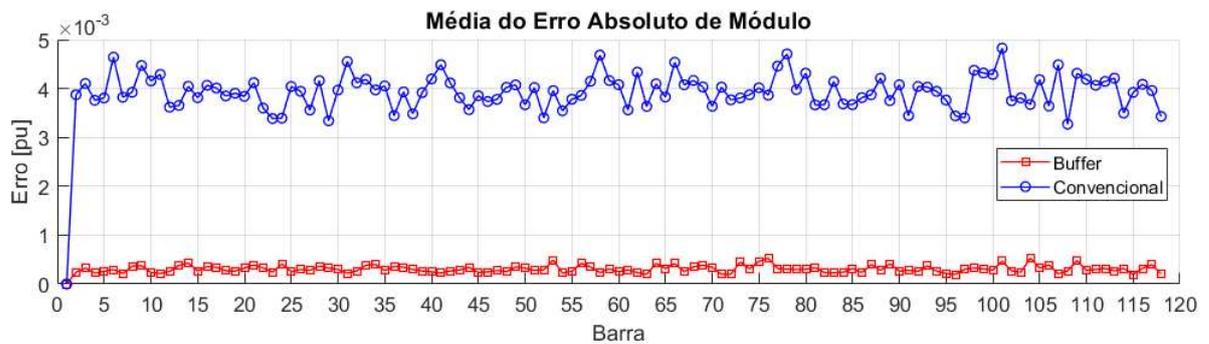
Fonte: O Autor (2023).

Figura 36 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 57 barras - Caso 2



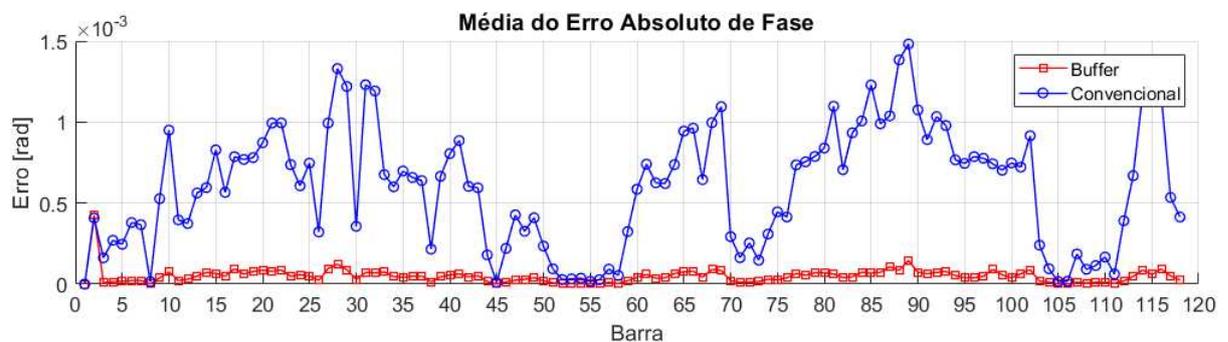
Fonte: O Autor (2023).

Figura 37 – Erros absolutos de magnitude (SMSF) - 118 barras - Caso 2



Fonte: O Autor (2023).

Figura 38 – Erros absolutos de fase (SMSF) - 118 barras - Caso 2



Fonte: O Autor (2023).

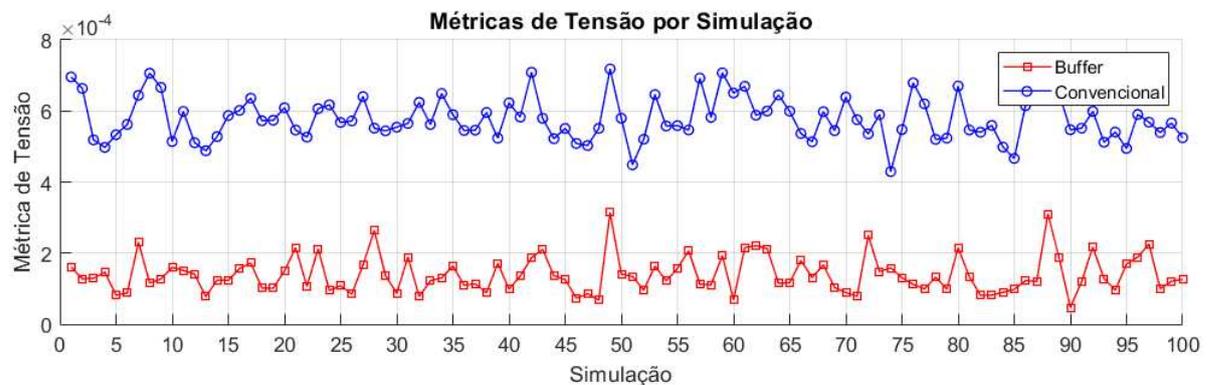
Para o sistema IEEE 57 barras, o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi de $3,8811 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $2,2125 \cdot 10^{-4} rad$ para fase, já o erro médio do *buffer* de medidas foi de $2,9018 \cdot 10^{-4} pu$ para magnitude e $1,8089 \cdot 10^{-5} rad$ para fase.

Para o sistema IEEE 118 barras o erro médio associado às medidas do último vetor SMSF, foi de $3,9446 \cdot 10^{-3} pu$ para magnitude e $6,0203 \cdot 10^{-4} rad$ para fase, já o erro médio do *buffer* de medidas foi de $3,0652 \cdot 10^{-4} pu$ para magnitude e $4,9149 \cdot 10^{-5} rad$ para fase.

5.11.3 Métricas de Tensão - Caso 2

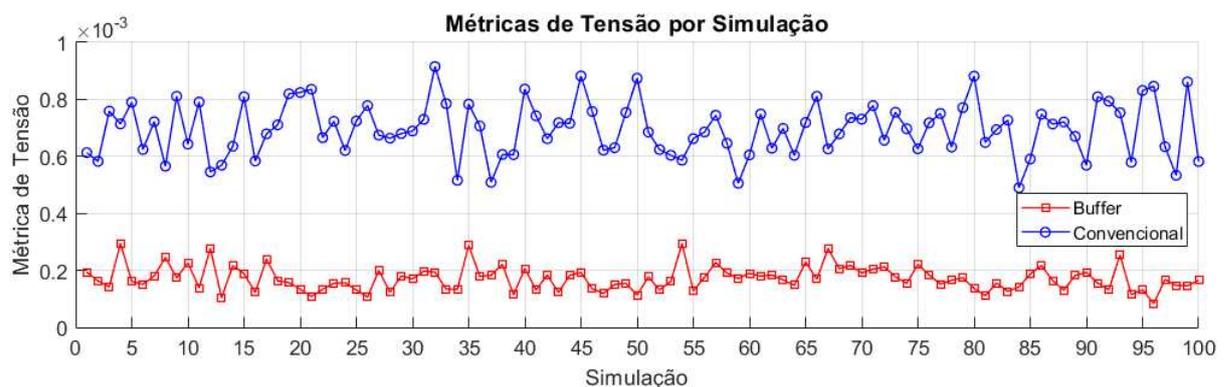
Nas Figuras 30 e 31 são apresentados as métricas de tensão dos valores estimados pela EESP, calculados conforme Seção 5.4 para cada simulação realizada. Mais uma vez, os resultados obtidos demonstram que a qualidade geral da EESP foi aprimorada através da utilização do *buffer* de medidas fasoriais ótimo.

Figura 39 – Métricas de tensão - 57 barras - Caso 2



Fonte: O Autor (2023).

Figura 40 – Métricas de tensão - 118 barras - Caso 2



Fonte: O Autor (2023).

No sistema IEEE 57 barras, a média geral das métricas de tensão obtidas foi de $5,7844 \cdot 10^{-4}$ para a EESP convencional e $1,4086 \cdot 10^{-4}$ para a EESP com utilização do *buffer*. No sistema IEEE 118 barras, a média geral das métricas de tensão obtidas foi de $6,9521 \cdot 10^{-4}$ para a EESP convencional e $1,7294 \cdot 10^{-4}$ para a EESP com a utilização do *buffer*.

5.12 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para análise dos resultados dos erros associados às medidas fasoriais obtidas, tanto pelo método convencional (C), quanto pelo *buffer* de medidas fasoriais ótimo (B), foram elaboradas as Tabelas 6, 7 e 8. Essas tabelas contêm os resultados compilados de todos as simulações realizadas. Esses resultados estão indicados com mais detalhes na Seção específica de cada caso analisado.

Tabela 6 – Erros absolutos associados ao caso base

Sistema	Erros Módulo (C)	Erro Módulo (B)	Erro Fase (C)	Erro Fase (B)
57	$3,9072.10^{-3}pu$	$2,8113.10^{-4}pu$	$2,1409.10^{-4}rad$	$1,6439.10^{-5}rad$
118	$3,9448.10^{-3}pu$	$2,8618.10^{-4}pu$	$6,6621.10^{-4}rad$	$5,2015.10^{-5}rad$

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 7 – Erros absolutos associados ao caso 1

Sistemas	Erros Módulo (C)	Erro Módulo (B)	Erro Fase (C)	Erro Fase (B)
57	$3,9057.10^{-3}pu$	$3,8963.10^{-3}pu$	$2,1670.10^{-4}rad$	$2,1720.10^{-4}rad$
118	$3,8903.10^{-3}pu$	$3,8903.10^{-3}pu$	$6,0683.10^{-4}rad$	$6,0683.10^{-4}rad$

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 8 – Erros absolutos associados ao caso 2

Sistemas	Erros Módulo (C)	Erro Módulo (B)	Erro Fase (C)	Erro Fase (B)
57	$3,8811.10^{-3}pu$	$2,9018.10^{-4}pu$	$2,2125.10^{-4}rad$	$1,8089.10^{-5}rad$
118	$3,9446.10^{-3}pu$	$3,0652.10^{-4}pu$	$6,0203.10^{-4}rad$	$4,9149.10^{-5}rad$

Fonte: O Autor (2023).

Como pode ser observado, no caso base e no caso 2, foram obtidos resultados que elevaram a qualidade das medidas do SMSF em mais de uma ordem de grandeza para os dois sistemas analisados. Esses resultados foram observados, tanto para as medidas de magnitude, quanto para as medidas de fase das tensões das barras.

No caso 1, onde o *buffer* de medidas fasoriais ótimo deveria ser formado apenas pela última medida válida, pode ser observado um pequeno desvio nas médias do sistema IEEE 57 barras, como visto na Seção 5.10.2. Isso ocorreu em função de uma falha na detecção da alteração das características do sistema de potência na barra 8; porém como pode-se observar, o impacto dessas medidas foi bem reduzido.

A seguir, são apresentadas as Tabelas 9, 10 e 11, que condensam os resultados das médias das 100 métricas de tensão obtidas para cada caso analisado. As tabelas também contém o número médio de medidas fasoriais consideradas válidas para composição do *buffer* (B) em cada caso.

Tabela 9 – Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso base

Sistema	Nº Medidas (B)	Métrica (C)	Métrica (B)
57	677,38	$5,8216.10^{-4}$	$1,5625.10^{-4}$
118	676,66	$7,4102.10^{-4}$	$1,8204.10^{-4}$

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 10 – Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso 1

Sistemas	Nº Medidas (B)	Métrica (C)	Métrica (B)
57	1,1894	$5,9112.10^{-4}$	$5,9033.10^{-4}$
118	1,0000	$7,0431.10^{-4}$	$7,0431.10^{-4}$

Fonte: O Autor (2023).

Tabela 11 – Número de medidas fasoriais e métricas associados ao caso 2

Sistemas	Nº Medidas (B)	Métrica (C)	Métrica (B)
57	436,62	$5,7844.10^{-4}$	$1,4086.10^{-4}$
118	434,76	$6,9521.10^{-4}$	$1,7294.10^{-4}$

Fonte: O Autor (2023).

No caso base e no caso 2, a média das métricas de tensão obtidas, demonstram uma elevação na qualidade desses valores. Para o caso 1, mesmo considerando o pequeno desvio do número de medidas da barra 8 no sistema IEEE 57 barras, nota-se uma pequena melhora na média das métricas de tensão obtidas. Essa melhora acontece devido ao melhor desempenho da EESP em relação ao módulo de tensão da referida barra. Esse melhor desempenho pode ser explicado através da menor variação dessa grandeza com relação a pequenas variações de carga.

6 CONCLUSÃO

Na primeira etapa desse trabalho, realizou-se uma revisão teórica acerca dos dispositivos responsáveis pela aquisição de dados dos sistemas de potência (SCADA e SMSF), e que fornecem suporte para os diversos processos e aplicativos que realizam a monitoração e análise de segurança desses sistemas. A seguir, detalhamos os principais aplicativos que compõe a operação em tempo real dos sistemas de potência, dando ênfase às funções associadas ao processo de estimação de estados.

Ainda nesse contexto, propõe-se a inserção de um novo bloco de funções para tratamento de medidas fasoriais. Este bloco tem como objetivo utilizar o alto volume de medidas fasoriais realizadas entre os intervalos de execução da estimação de estados, criando um *buffer* de medidas fasoriais composto por todas as medidas realizadas que não tenham sofrido alteração significativa em função das variações naturais das condições de operação do sistema de potência.

Para realizar essa função, desenvolvemos um algoritmo que, através de testes estatísticos, é capaz de detectar pequenas alterações nas características dos sistemas de potência, e com isso, determinar a maior dimensão possível para o *buffer* de medidas fasoriais que, posteriormente, será utilizado para execução da EESP. Através desse processo, conseguimos aprimorar a qualidade das medidas fasoriais e conseqüentemente, a qualidade dos estados estimados pela EESP.

Após essa etapa, desenvolvemos um simulador, que através da inserção de pequenas variações nas cargas ativas e reativas das barras, permitiu a reprodução das variações naturais nas condições de operação de grandes sistemas de potência. Através desse simulador, realizamos a comparação entre as últimas medidas fasoriais, adquiridas do último estado conhecido do sistema, e as medidas que, após tratamento, formaram o *buffer* de medidas fasoriais. Esta comparação permitiu avaliar quantitativamente a qualidade dessas medidas, bem como sua contribuição à EESP. Desta forma, conseguimos demonstrar a eficácia do método adotado.

Embora este estudo tenha realizado alguns avanços, julgamos necessário recomendar a realização, em trabalhos futuros, de mais simulações que compreendam diferentes situações. Tais como a integração de medidas fasoriais de corrente na simulação, a inserção de erros grosseiros nas medidas fasoriais, maior detalhamento das alterações de carga, utilização de medidas fasoriais provenientes de sistemas reais, simulação de contingências, entre outros. Estas ações permitirão aprimorar os métodos de detecção e tratamento das medidas fasoriais.

REFERÊNCIAS

- ABUR, Ali; EXPOSITO, Antonio Gomez. **Power system state estimation: theory and implementation**. New York, NY: CRC press, 2004. ISBN 0-8247-5570-7.
- ALBUQUERQUE, André; SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves. **Estratégias em dois estágios para incorporar medidas fasoriais sincronizadas na estimação de estados em sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, set. 2011.
- BEZ, Daniel; SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves. **Estratégia em dois estágios utilizando rotações de givens em blocos para a inclusão de medidas fasoriais na estimação de estados em sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, jun. 2013.
- CHRISTIE, Rich. **Power Systems Test Case Archive**. [S.l.], Ago. 1993. Disponível em: <https://labs.ece.uw.edu/pstca/>. Acesso em: 16 jul. 2022.
- EDER, Ciro José Froncek; SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves. **Métodos de fusão de estimativas para agregação de múltiplas fontes de informação à estimação de estados em sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, fev. 2014.
- IEEE. **IEEE standard for synchrophasor measurements for power systems**. [S.l.], dez. 2011. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/>. Acesso em: 12 out. 2023.
- KEMA. **Metrics for Determining the Impact of Phasor Measurements on Power System State Estimation**. [S.l.]: Eastern Interconnection Phasor Project, jan. 2006.
- LARSON, R; FARBER, B. **Estatística Aplicada [Applied statistics]**. [S.l.]: São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.
- LEITES, Renan Augusto da Costa; SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves. **Processamento de medidas fasoriais de tensão e corrente na estimação de estados em sistemas de potência**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, fev. 2010.

MARTIN, Kenneth E; HAUER, John F; FARIS, Tony J. PMU testing and installation considerations at the Bonneville power administration. **Power Systems, IEEE Transactions**, p. 1–6, 2007. DOI 10.1109/PES.2007.385999.

MURUGESAN, Veerakumar; CHAKHCHOUKH, Yacine; VITTAL, Vijay; HEYDT, Gerald Thomas; LOGIC, Naim; STURGILL, Steve. PMU data buffering for power system state estimators. **IEEE Power and Energy Technology Systems Journal**, IEEE, v. 2, n. 3, p. 94–102, 2015.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede, Submódulo 2.12: Requisitos mínimos de supervisão e controle para a operação**. [S.l.], out. 2022. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.12-RQ_2022.06.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Procedimentos de Rede, Submódulo 2.13: Requisitos mínimos para Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores**. [S.l.], dez. 2020. Disponível em: https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.13-RQ_2020.12.pdf. Acesso em: 11 nov. 2023.

SHANMUGAN, K Sam; BREIPOHL, Arthur M. Random signals: detection, estimation, and data analysis. Braun-Brumfield, Inc., New York, NY, 1988.

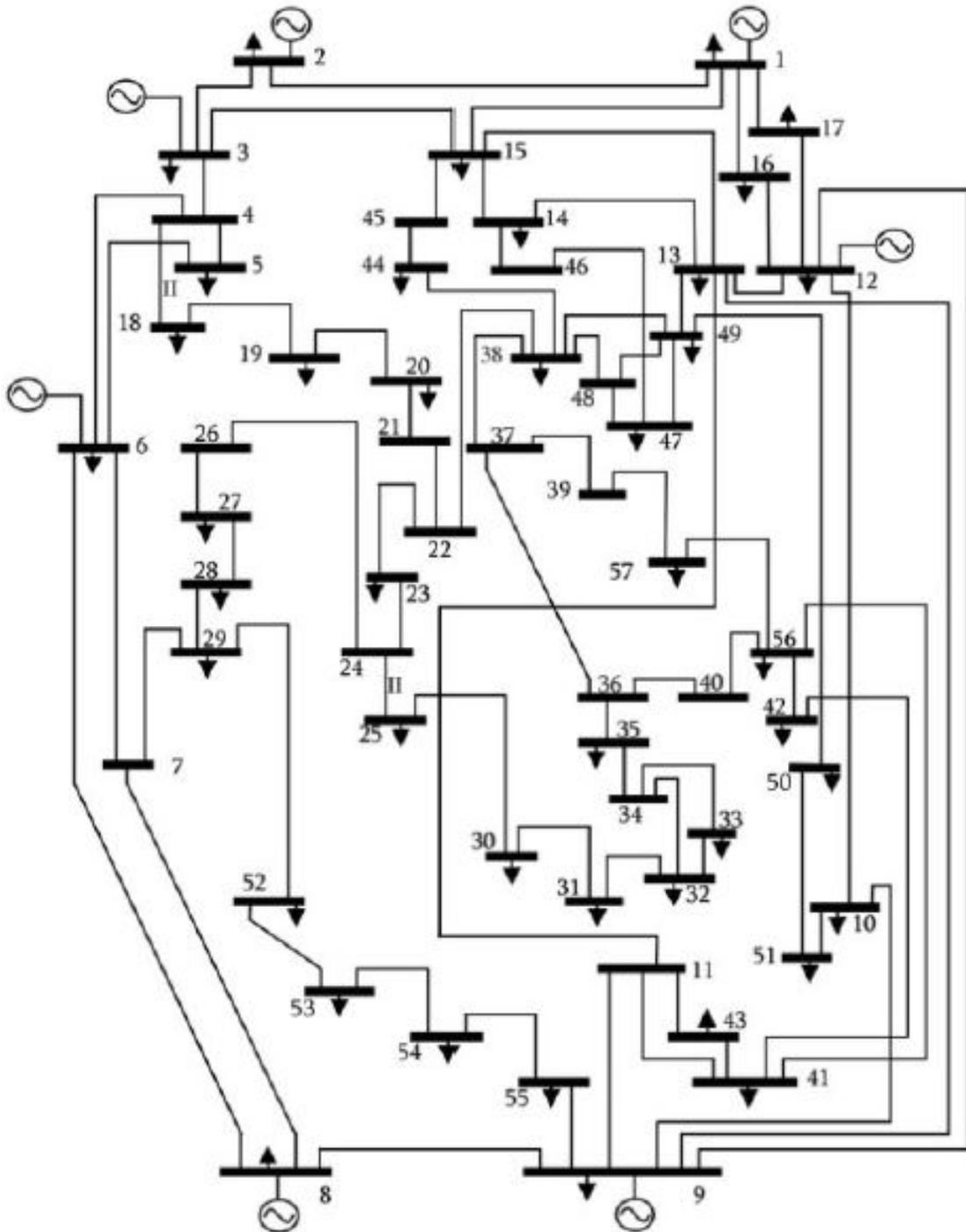
SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves; ALBUQUERQUE, André; BEZ, Daniel. An Estimation Fusion Method for Including Phasor Measurements Into Power System Real-Time Modeling. **Power Systems, IEEE Transactions**, v. 28, p. 1910–1920, mai. 2013. DOI 10.1109/TPWRS.2012.2232315.

SIMÕES-COSTA, Antonio José Alves; SALGADO, Roberto. **Análise Estática de Segurança de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, set. 2002.

ZHANG, Qing; CHAKHCHOUKH, Yacine; VITTAL, Vijay; HEYDT, Gerald T; LOGIC, Naim; STURGILL, Steve. Impact of PMU measurement buffer length on state estimation and its optimization. **IEEE Transactions on Power Systems**, IEEE, v. 28, n. 2, p. 1657–1665, 2012.

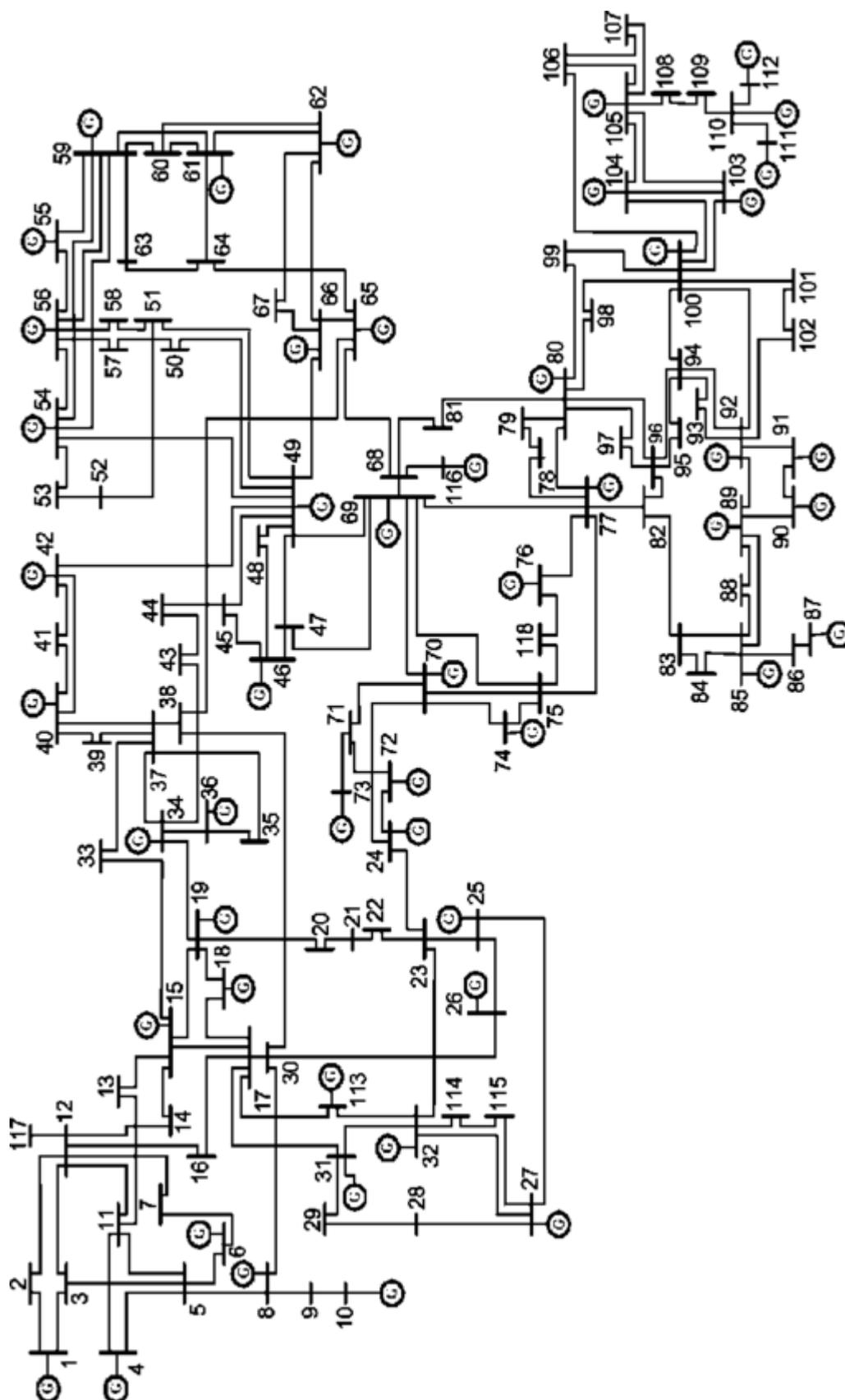
ANEXO A – Sistemas-Teste Padrão IEEE

Figura 41 – Sistema-teste IEEE 57 barras



Fonte: University of Washington

Figura 42 – Sistema-teste IEEE 118 barras



Fonte: University of Washington