

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso

Estimação de Estado Através de Medidas Convencionais e
Medidas Fasoriais Sincronizadas

Aluno: Daniel Centurion Barrionuevo

Orientador: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior

Junho – 2012

Daniel Centurion Barrionuevo

**Estimação de Estados Através de Medidas
Convencionais e Medidas Fasoriais Sincroni-
zadas**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Mecatrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior

São Carlos
2012

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

B275e Barrionuevo, Daniel Centurion
Estimação de Estado Através de Medidas
Convencionais e Medidas Fasoriais Sincronizadas /
Daniel Centurion Barrionuevo; orientador João Bosco
Augusto London Junior. São Carlos, 2012.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecatrônica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2012.

1. Sistemas Elétricos de Potência. 2. Estimação de
Estado. 3. Medidas Fasoriais Sincronizadas. 4. PMU. I.
Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidato(s): Daniel Centurion Barrionuevo

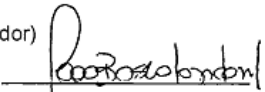
Título: Estimação de Estados Através de Medidas Convencionais e Medidas Fasoriais Sincronizadas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo
Curso de Engenharia Mecatrônica.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. João Bosco Augusto London Junior (orientador)

Nota atribuída: 8,5 (oitos e meio)


(assinatura)

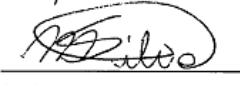
Dra. Madeleine Rocio Medrano Castillo Albertini

Nota atribuída: 8,5 (oitos e meio)


(assinatura)

Dr. Murilo da Silva

Nota atribuída: 8,5 (OITO E MEIO)


(assinatura)

Média: 8,5 (oitos e meio)

Resultado: Aprovado

Data: 04/07/2012

Dedicatória

Aos meus pais, Miguel e Fernanda, e à minha irmã, Julia.

Agradecimentos

- Aos meus pais, Miguel e Fernanda, e à minha irmã, Julia, por todo amor e carinho durante todos estes anos.
- Ao professor João Bosco Augusto London Jr, pela sua orientação, seu apoio e seus conselhos e também por ter sido um excelente professor durante minha graduação.
- A Madeleine Castillo, pela colaboração essencial na construção deste trabalho.
- Aos meus colegas de turma, em especial Danilo Colombo, Matheus Pestana, Luiz Bisan, Danillo Ramos, Denis Toyoshima, Henrique Passeri, Augusto Shigueoka, Péricles Caravieri e Fábio Mira.

Sumário

1. Introdução	11
1.1 Resumo do Trabalho	11
1.2 Estrutura do Trabalho	13
2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores	14
2.1 Definição	14
2.2 Definição de Fasor	15
2.3 Fasores Sincronizados	15
2.4 Funcionamento de uma PMU	16
3. Modelagem de um Sistema Elétrico de Potência	19
3.1 Formulação Básica	19
3.2 Modelagem de linhas e transformadores	20
3.2.1 Linhas de Transmissão.....	21
3.2.2 Transformadores	22
3.2.3 Modelo Generalizado	23
3.3 Fluxo de Potência.....	24
3.4 Injeção de Potência	25
4. Estimação de Estado	27
4.1 Princípios Básicos de um Estimador de Estado	27
4.2 Estimador de Estado por Mínimos Quadrados Ponderados	28
4.3 Vetor de funções $h(x^k)$	32
4.4 Matriz Jacobiana	33
5. Estimação de Estado com Medidas Fasoriais Sincronizadas	37
5.1 Estimador proposto em Zhou et al (2006).....	38
5.2 Problemas Verificados	41
5.3 Referências Angulares Distintas	42
5.4 Obtenção da Matriz de Covariância para as medidas Obtidas a Partir das Estimativas da Fase 1	43
5.5 Algoritmo da Segunda Fase	44
6. Procedimentos para Simulações	46
6.1 Geração de Medidas	46
6.2 Ponderação de Medidas Convencionais e Fasoriais.....	47
6.3 Cálculo dos Desvios Padrões das Medidas	47
6.3.1 Desvios-Padrão de valor constante.....	48

6.3.2	Desvios-Padrão associado ao valor da medida	48
6.3.3	Desvios-Padrão em função do fundo de escala	49
6.4	Métricas para avaliação de desempenho	50
6.5	Resumo de metodologias	51
7.	Simulações e Resultados.....	53
7.1	Estudo de caso Sistema IEEE5.....	53
7.1.1	Desvio-Padrão de valor constante	55
7.1.2	Desvio-Padrão associado ao valor da medida.....	56
7.1.3	Desvio-Padrão em função do fundo de escala.....	58
7.2	Estudo de caso Sistema IEEE14.....	60
7.2.1	Desvio-Padrão de valor constante	62
7.2.2	Desvio-Padrão associado ao valor da medida.....	63
7.2.3	Desvio-Padrão em função do fundo de escala.....	65
7.2.4	Comparação entre ponderações.....	67
7.2.5	Simulações com MFSs de Corrente	69
7.2.6	Efeito da Precisão das Medidas Fasoriais.....	72
8.	Conclusões	77
	Referências Bibliográficas	79

1. Introdução

1.1 Resumo do Trabalho

A operação segura de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) necessita de uma monitoração detalhada de suas condições operativas. Isto é realizado nos centros de controle através do estimador de estado, que faz uso de medidas obtidas através das Unidades Terminais Remotas (UTRs). Assim, através das medidas lógicas (estado de chaves ou disjuntores) e analógicas (usualmente medidas de fluxo e injeção de potência, e algumas magnitudes de tensão), o estimador de estado proporciona uma estimativa das variáveis de estado do sistema elétrico, ou seja, das tensões complexas em todas as barras do SEP.

A Estimação de Estado em SEP (EESep) consiste do processamento de medidas redundantes com ruído, as quais estão relacionadas com as tensões complexas do sistema. Como os valores das medidas não são exatos, conclui-se que a estimação obtida para as variáveis de estado desconhecidas também não será exata.

O sucesso do estimador de estado depende da qualidade e redundância das informações que lhe são fornecidas, uma vez que, erros nessas informações podem levar o processo de estimação a valores estimados muito distantes dos valores verdadeiros, ou, até mesmo, à não convergência.

Tem-se verificado nos últimos anos um aumento na complexidade da operação dos SEPs, que está associado a vários fatores, como a crescente demanda por alta confiabilidade e qualidade da energia elétrica, as restrições impostas pela conscientização ambiental, a alta competitividade do mercado e a escassez de recursos aplicados no setor elétrico.

Diante disto, vem sendo abordada a possibilidade de obtenção de um sistema de medição sincronizada de Fasores (SMSF) (THORP et al., 1985 e PHADKE et al., 1986) e, atualmente, a implantação de equipamentos responsáveis por essas aferições, as Unidades de Medição Fasorial – PMUs (do inglês “Phasor Measurement Units”), já é uma realidade que se apresenta como uma forte tendência de utilização e tem recebido grande atenção de grupos de pesquisa e da indústria de energia elétrica.

A PMU é um instrumento de medição desenvolvido em meados da década de 80, que realiza a amostragem sincronizada das tensões e correntes analógicas trifásicas. A base de tempo utilizada, para a sincronização, é o sinal de relógio do Sistema de Geoposicionamento por Satélite – GPS. Através dessa nova tecnologia, cuja precisão é de aproximadamente 100 ns, foi possível solucionar os problemas ocorridos na sincronização das medidas coletadas ao longo de SEP de grande área.

A inclusão de medidas fasoriais sincronizadas (MFSs) no processo de EESEP revelou-se um desafio e vários modelos de implementação têm sido propostos. No processo de EESEP convencional, isto é, sem considerar MFSs, uma das barras do sistema é escolhida como referência angular. Assim, atribui-se o valor zero para o ângulo de tensão dessa barra e os ângulos estimados, para as demais barras, são referentes ao daquela barra. Tendo em vista que não é usual a monitoração direta dos ângulos de tensão via sistema supervisório (SCADA, do inglês “Supervisory Control and Data Acquisition”), essa prática é apropriada, uma vez que é irrelevante, para o processo de EESEP, o valor absoluto do ângulo de tensão da barra de referência. Porém, quando estão presentes medidas convencionais e MFSs, aquela prática não é adequada. Isto porque as medidas de ângulo de tensão, fornecidas pelas PMU, são obtidas a partir de outro referencial, que é determinado pelo instante de tempo fornecido pela recepção do sinal emitido pelo GPS.

Diversas soluções têm sido propostas para contornar o problema da escolha da referência de ângulo de tensão, no processo de estimação de estado híbrida, isto é, que faz uso de medidas convencionais e MFSs. Dentre estas, destaca-se o estimador híbrido proposto por ZHOU et al (2006), que trabalha em duas fases. Na primeira fase processa apenas as medidas convencionais, para parte observável do sistema, obtendo assim as estimativas das variáveis de estado através de um processo convencional de estimação via o método dos mínimos quadrados ponderados. As estimativas obtidas nessa primeira fase são então utilizadas na segunda fase do processo, como medidas de ângulo e de magnitude de tensão nas barras do SEP, juntamente com as MFSs. Desta forma, na segunda fase, realiza-se um processo de estimação de estado linear (sem iteração), pois, as medidas que serão processadas relacionam diretamente as variáveis de estado do sistema.

O objetivo deste trabalho é avaliar os benefícios da incorporação das medidas fasoriais sincronizadas sobre a exatidão das estimativas obtidas. Para isso, o estimador de estado convencional por mínimos quadrados ponderados e o estimador de estado híbrido proposto por ZHOU et al (2006) foram implementados, em linguagem C++, e apli-

cados em sistemas testes do IEEE, possibilitando assim a análise das principais características que influem no processo de estimação híbrida, como número de medidores fasoriais, ponderação das medidas, precisão dos medidores fasoriais e distribuição dos medidores no sistema.

1.2 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado do seguinte modo:

Capítulo 2: breve introdução à tecnologia PMU.

Capítulo 3: modelagem matemática para análise de fluxo de potência em SEP.

Capítulo 4: conceitos básicos de estimação de estado; formulação matemática de um estimador de estado convencional baseado no método dos mínimos quadrados.

Capítulo 5: formulação matemática do estimador de estado proposto por Zhou et al (2006), soluções de problemas não tratados no artigo de referência propostas neste trabalho.

Capítulo 6: procedimentos e metodologias utilizados para as simulações numéricas.

Capítulo 7: resultados e discussões das simulações.

Capítulo 8: conclusão final do trabalho.

2. Sistema de Medição Sincronizada de Fasores

2.1 Definição

SMFS é um sistema medição simultânea de fasores de grandezas elétricas obtidos por meio de dispositivos denominados PMU (*Phase Measurement Unit*), localizados nos principais pontos de monitoração, que são conectados a um ou mais concentradores de dados fasoriais denominados PDC (*Phasor Data Concentrator*), ou concentrador de dados. A sincronização é realizada via satélite por GPS (*Global Positioning System*), o que possibilita a utilização de dados coletados em grandes áreas (*wide area data*) para o monitoramento e controle dinâmico dos sistemas de potência. Um modelo simplificado é exposto na figura 2.1.

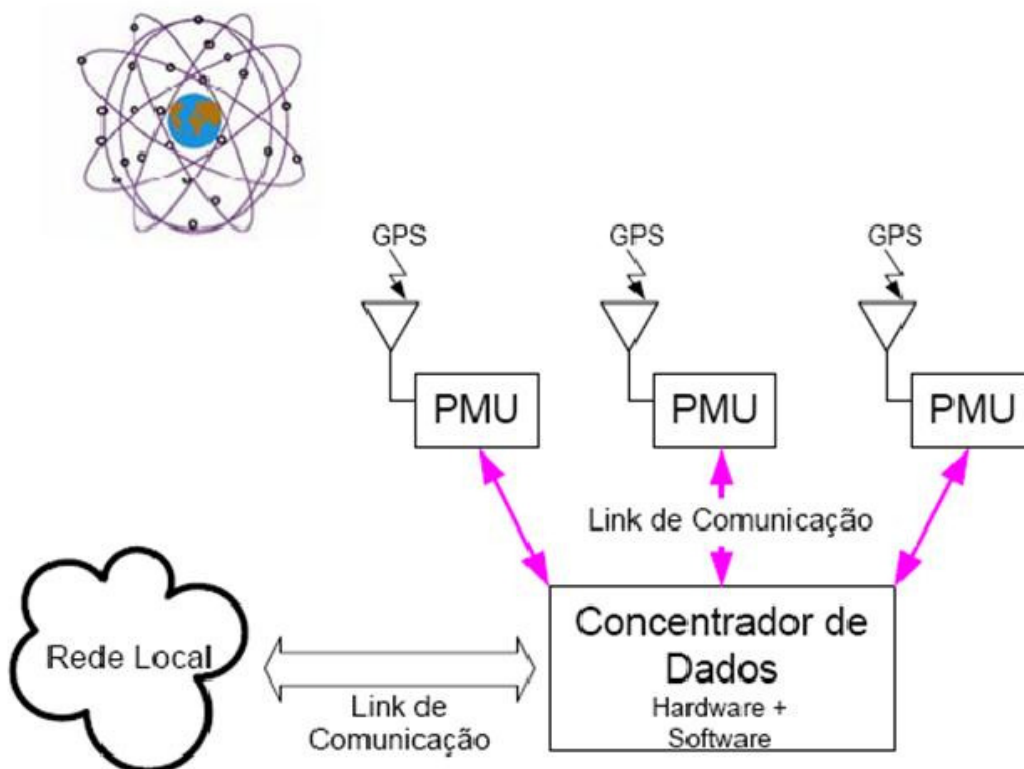


Figura 2.1 - Visão geral de um sistema de medição sincronizada de fasores

2.2 Definição de Fasor

Fasor é uma ferramenta matemática para analisar circuitos elétricos de corrente alternada em regime permanente, utilizada para representar a forma de onda de um sinal senoidal de tensão ou corrente na frequência fundamental de um sistema de potência. São compostos por uma amplitude, representada em valores eficazes, e um ângulo. Através da equação (2.1), obtém-se uma relação entre as formas trigonométricas e complexas, ou polares e retangulares, dos fasores:

$$e^{j\phi} = \cos(\phi) + j \operatorname{sen}(\phi) \quad (2.1)$$

O grande mérito dos fasores consiste em transformar as equações diferenciais dos circuitos elétricos em equações algébricas comuns.

2.3 Fasores Sincronizados

Sincrofasor é um fasor medido com relação a uma referência de tempo absoluta, possibilitando determinar a relação de fase absoluta entre outras quantidades de fase em diversas localidades de um SEP. Devido a esta simultaneidade das medições fasoriais, é possível que sejam tiradas “fotografias” do estado do SEP.

A figura 2.2 ilustra a sincronia da medição de fasores em posições geográficas distantes.

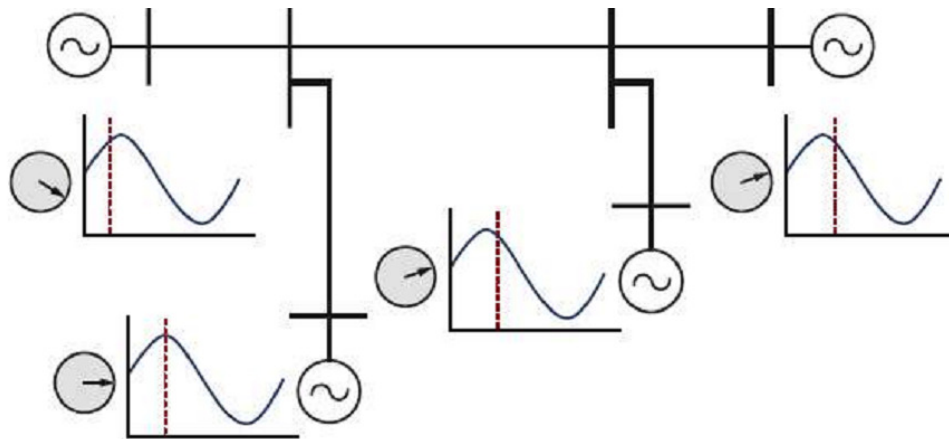


Figura 2.2 - Sincronização para medição de fasores

Para uma medição de sincrofasores confiável, a precisão temporal deve necessariamente atender a alguns pré-requisitos. Para sistemas de frequência fundamental de 60 Hz, estimou-se que erros temporais de ordem de $1\mu\text{s}$ produzam erros angulares de aproximadamente $0,02^\circ$, enquanto erros temporais de ordem de 1ms poderiam gerar erros superiores a 20° .

Também é necessário estabelecer um referência de tempo para medir ângulos sincronizadamente. De acordo com a norma IEEE 1344-1995, o ângulo é definido em 0° no momento em que o valor máximo do sinal coincide com a passagem pelo UTC (Tempo Universal Coordenado, representando a hora do dia no meridiano primal da Terra, em 0° de latitude) e -90° quando passagem do zero positivo coincide com passagem pelo UTC.

2.4 Funcionamento de uma PMU

A PMU é um instrumento de medição desenvolvido em meados da década de 80 (ZHOU et al., 2006) e, como mencionado nas seções anteriores, realiza: aquisição das tensões e correntes nas barras do sistema; processamento dos dados amostrados, efetuando assim a medição das grandezas fasoriais; para, em seguida, enviá-las ao concentrador de dados.

A PMU tem como funções a aquisição das tensões e correntes nas barras do SEP, o processamento e formatação dessas informações e o envio ao concentrador de dados. O concentrador de dados (PDC) recebe e organiza as medidas fasoriais enviadas pelas PMUs, disponibilizando-as para uso em diversas aplicações (entre elas, a estimação

de estado). Os canais de comunicação, por sua vez, têm a função de viabilizar a transferência de dados entre as PMUs e o concentrador de dados. Atualmente, os canais de comunicação usados em um SMFS possuem opções de estruturas que operam tanto através de meios físicos específicos (linhas telefônicas, cabos de fibra ótica ou mesmo a rede de baixa ou média tensão), quanto através de tecnologia *wireless* (canais de microondas ou de sistemas de satélites).

A figura 2.3 ilustra a estrutura simplificada de uma PMU, que consiste basicamente de um sistema de aquisição de dados [onde se encontram os filtros *anti-aliasing*, um circuito oscilador (*phase-locked oscillator*), um módulo de conversão analógica/digital] e de um microprocessador que realiza o processamento matemático dos dados. Cada PMU deve estar acoplada a um equipamento receptor de sinal de GPS.

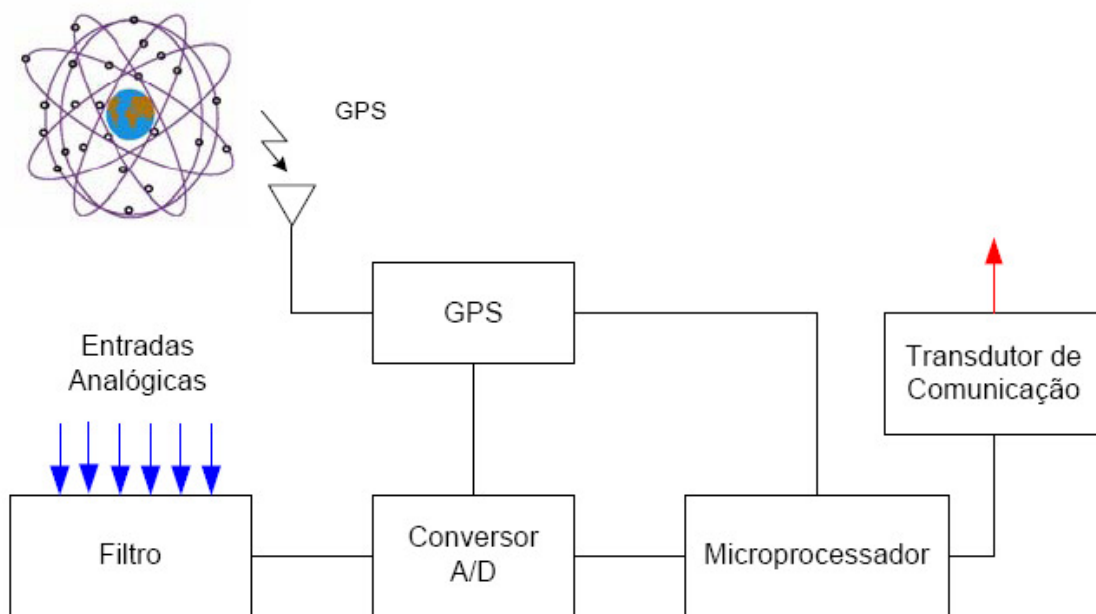


Figura 2.3 - Estrutura básica de uma PMU (EHRENSPERGER, 2004)

Em razão de as PMUs utilizarem uma fonte eficaz de sincronização, fornecida pelo sistema GPS, elas viabilizam a realização da medição de grandezas fasoriais a uma taxa de até 60 medidas por segundo e com precisão angular adequada aos requisitos da maioria das aplicações de monitoração e controle em tempo real (EHRENSPERGER, 2004).

Continuamente, o sistema GPS envia sinal de um pulso por segundo às estações receptoras. Considerando que esse trem de pulsos é enviado com precisão maior do que 1 μ s e que pode ser recebido por estações distantes entre si com igual precisão, é possí-

vel a sincronização das amostras obtidas por diversas PMUs, instaladas em diferentes pontos de um SEP.

As PMUs disponíveis atualmente têm a capacidade de medir fasores de tensão, corrente e potência, além da frequência e variação da frequência no tempo. Os dados medidos são exteriorizados em grandezas de fase ou grandezas de seqüência positiva, em forma polar ou retangular. Em seguida, esses dados são transferidos, através de canais de comunicação, ao concentrador de dados, utilizando um formato de dados padronizado.

Para o processo de cálculo dos sincrofasores, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier. Entretanto, este tópico não é abordado neste trabalho, pois foge do tema a ser posteriormente discutido.

3. Modelagem de um Sistema Elétrico de Potência

O objetivo principal do cálculo do fluxo de carga (ou fluxo de potência) é determinar as variáveis de estado de um SEP. No estudo do fluxo de potência, assim como no estudo do estimador de estado estático (tipo de estimador que será estudado nesse projeto), a modelagem da rede é estática, isto é, não se considera a variação entre as grandezas e a variável tempo.

Desta forma, o SEP é apresentado apenas por um conjunto de equações e inequações algébricas, que tem por objetivo a determinação das variáveis de estado da rede, da distribuição dos fluxos e de outras grandezas de interesse. Este capítulo foi escrito tomando com base a referência (Monticelli, 1983).

3.1 Formulação Básica

Na formulação básica do fluxo de potência, a cada barra do SEP estão associadas quatro variáveis:

v_k - magnitude da tensão nodal (barra k)

θ_k - ângulo da tensão nodal

P_k - geração líquida (geração menos carga) de potência ativa

Q_k - injeção líquida de potência reativa

Essas quatro variáveis se encontram aos pares como incógnitas e dados, ou seja, duas delas são considerados dados e as outras duas consideradas incógnitas. Em razão disso, definem-se três tipos de barra:

- **PQ** – são dados P_k e Q_k , e calculados V_k e θ_k ;

- **PV** – são dados P_k e V_k , e calculados Q_k e θ_k ;
- **V θ (Referência)** – são dados V_k e θ_k , e calculados P_k e Q_k .

As barras do tipo PQ e PV são utilizadas para representar, respectivamente, barras de carga e barras de geração (incluindo os condensadores síncronos). A barra V θ fornece a referência angular do sistema (a referência de magnitude de tensão é dada pelo nó terra) e também é utilizada para fechar o balanço de potência do sistema, levando em conta as perdas de transição não conhecidas antes de se ter a solução final do sistema.

A cada barra são atribuídas duas equações, pela imposição da Primeira Lei de Kirchhoff:

$$P_k = \sum_{m \in \Omega_k} P_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.1)$$

$$Q_k + Q_k^{sh}(V_k) = \sum_{m \in \Omega_k} Q_{km}(V_k, V_m, \theta_k, \theta_m) \quad (3.2)$$

em que:

$k = 1, \dots, NB$, sendo NB o número de barras da rede;

Ω_k é o conjunto das barras vizinhas à barra k;

V_k, V_m são as magnitudes das tensões das barras terminais do ramo k-m;

θ_k, θ_m são ângulos de fase das tensões das barras terminais do ramo k-m;

P_{km} é fluxo de potência ativa no ramo k-m;

Q_{km} é o fluxo de potência reativa no ramo k-m;

Q_k^{sh} é a componente da injeção de potência reativa devida ao elemento shunt da barra k.

3.2 Modelagem de linhas e transformadores

Os modelos de linha de transmissão, de transformadores em-fase e defasadores são apresentados nesta seção.

3.2.1 Linhas de Transmissão

O modelo equivalente de uma linha de transmissão π de uma linha transmissão é representado na Fig 3.1. Três parâmetros definem o modelo equivalente π de uma linha de transmissão: a resistência série r_{km} ; a reatância série x_{km} ; e a susceptância shunt b_{km}^{sh} .

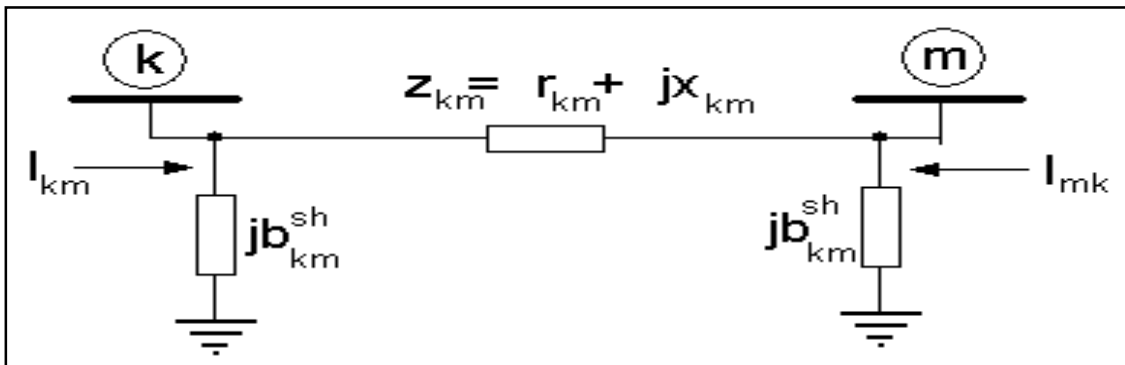


Figura 3.1: Modelo equivalente π de uma linha de transmissão

A impedância série e a admitância série são, respectivamente:

$$z_{km} = r_{km} + jx_{km} \quad (3.3)$$

$$y_{km} = (z_{km})^{-1} = g_{km} + jb_{km} \quad (3.4)$$

sendo a condutância série g_{km} e a susceptância série b_{km} dadas respectivamente por:

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.5)$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (3.6)$$

A corrente I_{km} é calculada a partir das tensões terminais a partir das tensões terminais e dos parâmetros do modelo equivalente π :

$$I_{km} = y_{km}(E_k - E_m) + jb_{km}^{sh} \cdot E_k \quad (3.7)$$

onde :

$$E_k = V_k \cdot e^{j\theta_k}; E_m = V_m \cdot e^{j\theta_m} \quad (3.8)$$

A corrente I_{mk} é obtida analogamente:

$$I_{mk} = \gamma_{km}(E_m - E_k) + j b_{km}^{sh} \cdot E_m \quad (3.9)$$

3.2.2 Transformadores

A representação geral de transformadores (em fase e defasadores), apresentada na Figura 3.2, é constituída por uma impedância série z_{km} e um autotransformador ideal com relação de transformação 1: t. Para o transformador em fase t é um numero real (t = a) e, para o defasador, t é um número complexo (t = $a e^{j\phi}$).

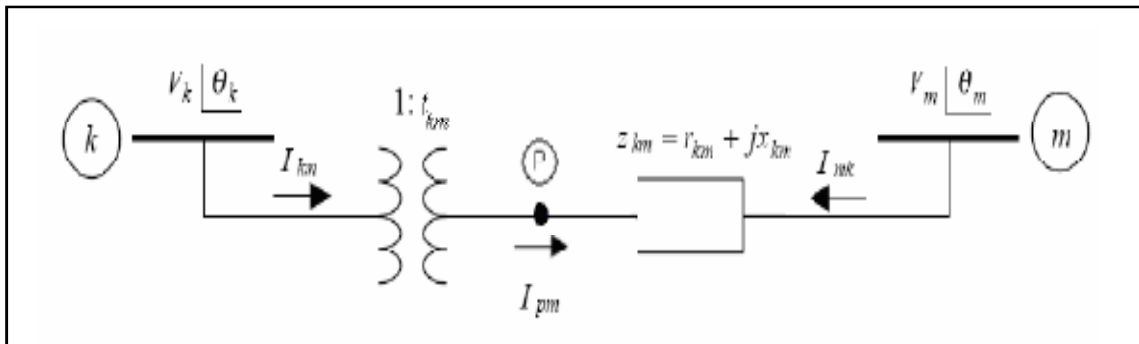


Figura 3.2: Modelo equivalente π de um transformador

Nos transformadores em-fase, $t=a$; no defasador puro, $t = e^{j\phi}$, e no defasador, $t = a \cdot e^{j\phi}$.

Para defasores, a relação entre as tensões complexas E_p e E_k

$$\frac{E_p}{E_k} = \frac{V_p \cdot e^{j\theta_p}}{V_k \cdot e^{j\theta_k}} = a \cdot e^{j\phi} \quad (3.10)$$

O fato do transformador k-p ser ideal implica que as potências complexas na entrada e na saída sejam iguais:, ou seja, não há potência ativa ou reativa dissipada entre os nós p e k:

$$E_k \cdot I_{km}^* + E_m \cdot I_{mk}^* = 0 \quad (3.11)$$

Combinando as equações:

$$\frac{I_{km}}{I_{mk}} = - - a_{km} \cdot e^{j\varphi_{km}} \quad (3.12)$$

Juntamente com a relação:

$$I_{km} = -a_{km} \cdot e^{j\varphi_{km}} \cdot y_{km} (E_p - E_m) \quad (3.13)$$

Chega-se a:

$$I_{km} = (a_{km}^2 y_{km}) V_k e^{j\theta_k} + (-a_{km} e^{j\varphi_{km}} y_{km}) V_m e^{j\theta_m} \quad (3.14)$$

3.2.3 Modelo Generalizado

Através dos possíveis modelos calculados anteriormente, é utilizado um modelo único para tratar de todos os casos. O modelo generalizado pode ser visualizado na figura 3.3:

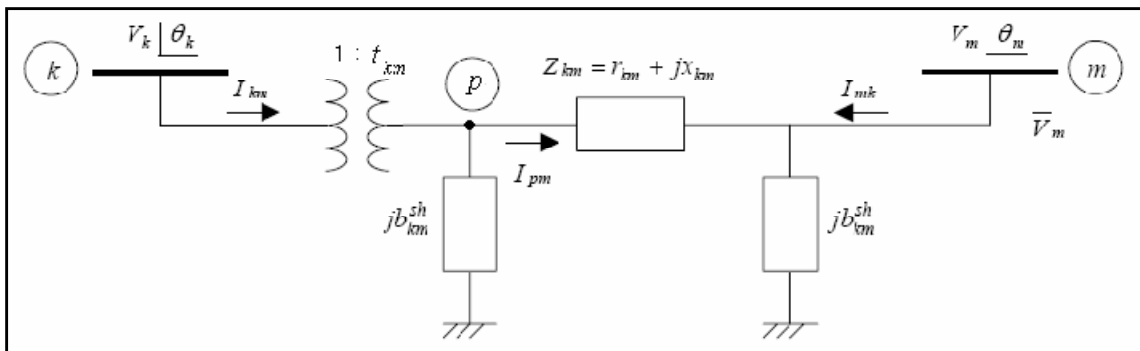


Figura 3.3: Modelo equivalente π generalizado

A corrente I_{km} é constituída por uma componente série e um componente shunt, e pode ser calculada a partir das tensões terminais E_k e E_m e dos parâmetros do modelo equivalente π generalizado:

$$I_{km} = (a_{km}^2 y_{km} + j b_{km}^{sh}) V_k e^{j\theta_k} + (-a_{km} e^{j\varphi_{km}} y_{km}) V_m e^{j\theta_m} \quad (3.15)$$

Para cada diferente tipo de modelo π , as variáveis a_{km} , φ_{km} e b_{km}^{sh} assumem valores particulares mostrados na tabela a seguir:

Equipamento	a_{km}	φ_{km}	b_{km}^{sh}
Linha de transmissão	1	0	\forall valor
Trafo defasador	\forall valor	\forall valor	0
Trafo em fase	\forall valor	0	0
Trafo defasador puro	1	\forall valor	0

Tabela 3.1: Valores particulares das variáveis para modelo generalizado

3.3 Fluxo de Potência

Através dos modelos obtidos anteriormente, pode-se calcular os fluxos de potência ativa P_{km} e reativa Q_{km} entre linhas de transmissão e transformadores. Será demonstrado somente o caso do modelo generalizado para estes cálculos

O fluxo de potência aparente entre os ramos é:

$$S_{km}^* = E_k^* \cdot I_{km} = (a_{km}^2 y_{km} + j b_{km}^{sh}) V_k^2 + (-a_{km} e^{j\varphi_{km}} y_{km}) V_k V_m e^{j(\theta_m - \theta_k)} \quad (3.16)$$

Através de uma extensa manipulação algébrica, com o uso das equações, separa-se o termo em componentes reais e imaginárias, que são a potência ativa e reativa, respectivamente:

$$P_{km} = (a_{km}^2 V_k^2) g_{km} - a_{km} V_k V_m [g_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) + b_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (3.17)$$

$$Q_{km} = -(a_{km}^2 V_k^2) (b_{km} + b_{km}^{sh}) + a_{km} V_k V_m [b_{km} \cos(\theta_{km} + \varphi_{km}) - g_{km} \sin(\theta_{km} + \varphi_{km})] \quad (3.18)$$

Assim, conhecendo-se os estados de duas barras k e m , o tipo de transmissão entre estas e seus parâmetros, é possível calcular o fluxo de potência tanto da barra k para m quanto da barra m para k .

3.4 Injeção de Potência

Considerando I_{km} dado por (3.7), a corrente I_k , corrente injetada na barra k , pode ser escrita da seguinte forma:

$$I_k = \left[j b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (a_{km}^2 Y_{km} + j b_{km}^{sh}) \right] E_k + \sum_{m \in \Omega_k} (-a_{km} e^{j\varphi_{km}} Y_{km}) E_m \quad (3.19)$$

Expressando o problema do fluxo de potência na forma matricial:

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}\mathbf{E} \quad (3.20)$$

onde:

\mathbf{I} – vetor das injeções de corrente, cujas componentes são I_k ($k = 1, NB$)

\mathbf{E} – vetor das tensões nodais, cujas componentes são $E_k = V_k e^{j\theta_k}$

$\mathbf{Y} = \mathbf{G} + j\mathbf{B}$ – matriz admitância nodal.

Os elementos da matriz \mathbf{Y} são:

$$Y_{km} = -a_{km} e^{-j\varphi_{km}} Y_{km} \quad (3.21)$$

$$Y_{kk} = j b_k^{sh} + \sum_{m \in \Omega_k} (j b_{km}^{sh} + a_{km}^2 Y_{km}) \quad (3.22)$$

A matriz Y pode ser decomposta em uma matriz real G e uma matriz imaginária B . Logo as expressões de injeção de corrente e de injeção de potência complexa S_k tornam-se, respectivamente:

$$I_k = \sum_{m \in K} (G_{km} + jB_{km}) E_m \quad (3.22)$$

$$S_k^* = P_k - jQ_k = E_k^* I_k \quad (3.23)$$

Separando a parte real e a parte imaginária de (2.14), chega-se às expressões de injeção de potência ativa e reativa, respectivamente:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (3.24)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (3.25)$$

onde K representa as barras pertencentes ao conjunto Ω_k adjacentes a própria barra k .

4. Estimação de Estado

4.1 Princípios Básicos de um Estimador de Estado

A estimação de estado consiste na obtenção, em tempo real, das variáveis de estado de um SEP, através do processamento de um conjunto redundante de medidas.

Tradicionalmente são quatro as etapas envolvidas no processo de estimação de estado:

- **1ª Etapa: Obtenção da topologia do sistema, no modelo barra linha.**

A partir das medidas lógicas, bem como de informações quanto ao tipo e a localização dos estimadores instalados no sistema, o configurador de sistemas permite determinar a topologia e a correspondente configuração de medidores, no modelo barra linha.

- **2ª Etapa: Análise e Restauração da Observabilidade do Sistema.**

Utilizando o modelo barra linha, obtido pelo configurador do sistema, verifica-se se é possível, através das medidas analógicas e virtuais disponíveis, determinar o estado em todas as barras do sistema. Em caso afirmativo, o sistema é dito observável. Caso contrário, esta falta de medidas pode ser suprida, em algumas situações, por pseudo-medidas, através das quais o sistema se torna observável como um todo

Uma alternativa para essa situação é determinar as partes observáveis do sistema, isto é, as “ilhas observáveis”.

- **3ª Etapa: Estimação de Estado.**

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

- **4ª Etapa: Processamento de Erro Grosseiros em Medidas Analógicas.**

As medidas analógicas, fornecidas ao estimador de estado, estão sujeitas aos EGs, que levam o processo de estimação de estado a variáveis de estado “não-verdadeiras”, ou, até mesmo, à não convergência. Devido a essa fragilidade do conjunto de medidas, o estimador de estado deve ser robusto o suficiente para detectar e identificar a ocorrência de EGs nas medidas. Em seguida, as medidas identificadas como portadoras de EGs. são eliminadas e as variáveis de estado são estimadas novamente. Vale destacar que dentre os métodos já desenvolvidos para detecção e identificação de EGs. os mais empregados são aqueles que se baseiam na análise estatística dos resíduos das medidas. Tais métodos baseiam-se na hipótese de que os erros nas medidas são Gaussianos, isto é, têm distribuição normal (caso não haja nenhuma medida com EG). Em razão disso, para entender o funcionamento dos métodos para detecção e identificação de EGs, baseados na análise dos resíduos de estimação, é necessário estudar algumas propriedades fundamentais da distribuição normal.

4.2 Estimador de Estado por Mínimos Quadrados Ponderados

Há dois tipos de estimador de estado: estático e dinâmico. O estimador estático estima as variáveis de estado do sistema em um dado instante de tempo. Compara-se a estimação estática de estado com uma “fotografia” de um SEP. Neste trabalho, será apenas abordada a utilização do estimador estático.

A estimação de estado consiste no cálculo de variáveis de estado desconhecidas, através de um conjunto de medidas não exatas. Logo, a estimação obtida para as variáveis de estado desconhecidas também não será exata.

Por meio de critérios estatísticos, a estimação de estado busca encontrar a melhor estimativa para o estado de um sistema. O mais utilizado atualmente em SEP é o dos mínimos quadrados ponderados.

As equações não-lineares para estimação de estado do SEP são definidas por:

$$z = h(x) + w \quad (4.1)$$

onde:

z = vetor de medidas ($m \times 1$);

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

x = vetor de variáveis de estado ($n \times 1$);
 w = vetor de erros de medidas ($m \times 1$);
 m = numero de medidas;
 n = numero de variáveis de estado a serem estimadas;

Os erros das medidas são tratados como variáveis aleatórias e independentes, com distribuição normal de média zero. Chamando de W a matriz de covariância do erro de medida, com dimensão $m \times m$, tem-se:

$$W = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & & & \\ & \sigma_2^2 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \sigma_{m-1}^2 & \\ & & & & & \sigma_m^2 \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Onde, σ_i^2 é a variância do erro da medida z_i .

Aplicando a teoria dos mínimos quadrados ponderados, obtém-se a melhor estimativa dos estados do sistema, cujo vetor será designado por \hat{x} , ao se minimizar o índice $J(x)$, que é dada por:

$$J(x) = \frac{1}{2} w^t W^{-1} w \quad (4.3)$$

ou

$$J(x) = \frac{1}{2} [z - h(x)]^t W^{-1} [z - h(x)] \quad (4.4)$$

Quando o índice $J(x)$ é mínimo:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 0 \quad (4.5)$$

ou

$$H^t(\hat{x}) W^{-1} [z - h(\hat{x})] = 0 \quad (4.6)$$

Sendo $H(\hat{x})$ representado por:

$$H(\hat{x}) = \left. \frac{\partial h(x)}{\partial x} \right|_{x = \hat{x}} \quad (4.7)$$

Como normalmente o índice $J(x)$ é representado por um vetor de equações não-lineares, é necessário a execução de um método iterativo para que seja obtida a solução \hat{x} . No método iterativo, resolve-se um conjunto de equações lineares a cada iteração, de modo a calcular a estimativa do vetor de variáveis de estado após sucessivas correções dadas por:

$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (4.8)$$

No entanto, para a determinação da correção Δx^k , considera-se inicialmente a linearização das equações $h(x)$ em torno do ponto x^k , representada pela expressão:

$$h(x^{k+1}) = h(x^k) + H(x^k)\Delta x^k \quad (4.9)$$

Reescrevendo a equação (3.17) considerando as aproximações realizadas em $h(x)$, obtêm-se o modelo de medição linearizado:

$$z = h(x^k) + H(x^k)\Delta x^k + w \quad (4.10)$$

ou ainda

$$\Delta z(x^k) = z - h(x^k) = H(x^k)\Delta x^k + w \quad (4.11)$$

sendo $\Delta z(x^k)$ definido como vetor dos resíduos de medição.

A partir do modelo de medição linearizado, a função objetiva $J(\Delta x)$ torna-se:

$$J(\Delta x) = [\Delta z(x^k) - H(x^k)\Delta x^k]^t W^{-1} [\Delta z(x^k) - H(x^k)\Delta x^k] \quad (4.12)$$

cujo mínimo é calculado a partir de

$$\frac{\partial J(\Delta x)}{\partial \Delta x} = H(x^k)^t W^{-1} [\Delta z(x^k) - H(x^k)\Delta x^k] = 0 \quad (4.13)$$

Logo, a solução pode ser processada pela seguinte expressão:

$$\Delta x^k = [H(x^k)^t W^{-1} H(x^k)]^{-1} H(x^k)^t W^{-1} \Delta z(x^k) \quad (4.14)$$

que é denominada Equação Normal, onde

$$H(x^k)^t W^{-1} H(x^k) = G^k \quad (4.15)$$

representa a matriz ganho(G).

A solução é obtida resolvendo o seguinte sistema linear:

$$[G(x^k)] \Delta x^k = H(x^k)^t W^{-1} [z - h(x^k)] \quad (4.16)$$

Ou podemos conseguir diretamente a partir de:

$$\Delta x^k = [G(x^k)]^{-1} H(x^k)^t W^{-1} [z - h(x^k)] \quad (4.17)$$

O processo iterativo começa a partir de uma estimativa inicial x^0 , e a cada iteração as correções nas variáveis de estado Δx são obtidas da equação (4.17). A atualização do vetor de variáveis de estado é obtida através da relação iterativa representada na equação (4.18), até que o seguinte critério de parada seja satisfeito:

$$\max |\Delta x_i| \leq \varepsilon \quad (4.18)$$

No qual ε denota uma tolerância previamente estabelecida. Assim, este critério indica que o processo iterativo é encerrado quando a magnitude dos ajustes nas variáveis de estado for desprezível.

O algoritmo do processo é mostrado na figura 4.1:

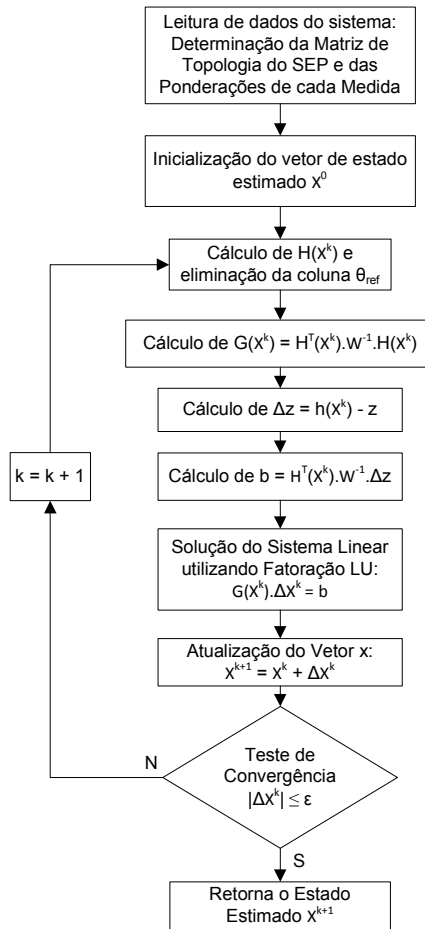


Figura 4.1 Algoritmo do Estimador de Estado Convencional

4.3 Vetor de funções $h(x^k)$

As medidas usualmente utilizadas na estimação de estado convencional são: medidas de injeção de potência ativa e reativa, medidas de fluxo de potência ativa e reativa e medidas de magnitude de tensão. O vetor de funções relaciona-se com essas medidas conforme visto na equação (4.10) e é dado pelas seguintes equações, considerando-se um modelo π equivalente da figura (3.3):

Injeção de potencia ativa e reativa na barra k:

$$P_k = V_k \sum_{j \in N_i} V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.19)$$

$$Q_k = V_k \sum_{j \in N_i} V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.20)$$

Fluxo de potencia ativa e reativa da barra k para a barra m:

$$P_{km} = V_k^2 (g_k^{sh} + g_{km}) - V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.21)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (g_k^{sh} + b_{km}) - V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} + b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.22)$$

4.4 Matriz Jacobiana

A matriz Jacobiana H, apresentada na figura (4.2), apresenta a seguinte forma:

	V	θ
P_i	$\frac{\partial P_i}{\partial V}$	$\frac{\partial P_i}{\partial \theta}$
Q_i	$\frac{\partial Q_i}{\partial V}$	$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta}$
P_f	$\frac{\partial P_f}{\partial V}$	$\frac{\partial P_f}{\partial \theta}$
Q_f	$\frac{\partial Q_f}{\partial V}$	$\frac{\partial Q_f}{\partial \theta}$
V_m	1	0

Figura 4.2 Matriz Jacobiana da estimação de estado tradicional

Os índices das colunas, V e θ , indicam as variáveis de estado do sistema, ou seja, as magnitudes e os ângulos de fase das tensões nodais respectivamente. Os índices das linhas correspondem às medidas disponíveis, sendo: P_i medida de injeção de potên-

cia ativa; Q_i medida de injeção de potência reativa; P_f medida de fluxo de potência ativa; Q_f medida de fluxo de potência reativa e V^m medida de magnitude de tensão

As fórmulas de cada derivada, considerando novamente o modelo π equivalente da figura (3.1), são:

Para medidas de injeção de potência ativa:

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} = \sum_{m=1}^n V_k V_m (-G_{km} \sin \theta_{km} + B_{km} \cos \theta_{km}) - V_k^2 B_{kk} \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.24)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) + V_k G_{kk} \quad (4.25)$$

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.26)$$

Para medidas de injeção de potência reativa:

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} = \sum_{m=1}^n V_k V_m (G_{km} \cos \theta_{km} + B_{km} \sin \theta_{km}) - V_k^2 G_{kk} \quad (4.27)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} = V_k V_m (-G_{km} \cos \theta_{km} - B_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.28)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) - V_k B_{kk} \quad (4.29)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_m} = V_k (G_{km} \sin \theta_{km} - B_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.30)$$

Para medidas de fluxo de potência ativa:

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_k} = V_k V_m a_{km} (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial \theta_m} = -V_k V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_k} = -V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) + 2(g_{km} + g_k^{sh}) V_k \quad (4.33)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.34)$$

Para medidas de fluxo de potência de reativa:

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_k} = -V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial \theta_m} = V_k V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (4.36)$$

$$\frac{\partial Q_{km}}{\partial V_k} = -V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) - 2(b_{km} + b_k^{sh}) V_k \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial P_{km}}{\partial V_m} = -V_k (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (4.37)$$

Para medidas de magnitude de tensão:

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_k} = 0 \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_m} = 0 \quad (4.39)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_k} = 1 \quad (4.40)$$

$$\frac{\partial V_k}{\partial V_m} = 0 \tag{4.41}$$

5. Estimação de Estado com Medidas Fasoriais Sincronizadas

Justifica-se o interesse crescente pela inclusão de MFSs no processo de EESEP, não apenas pelo fato de as MFS apresentarem em geral um nível maior de precisão que as medidas adquiridas pelo sistema SCADA. Há também outra justificativa relevante que é o fato de que variáveis cuja medição era antes inviável passam a ser monitoradas através das MFS. Este é o caso dos ângulos de fase das tensões nodais e dos fasores de corrente nos ramos da rede elétrica.

Pesquisas recentes demonstram que a inclusão de MFS no processo de EESEP proporciona uma melhoria significativa no desempenho e na robustez do estimador (ZHOU et al, 2006; ZHU & ABUR, 2007). Além disto, desde que todas as tensões complexas nodais do sistema sejam monitoradas por PMUs, o problema de estimação pode ser resolvido utilizando somente MFS [PHADKE (2002); CEASE & FELDHAUS (1999)]. Neste caso o problema torna-se linear, já que as medidas relacionam diretamente as variáveis de estado, ao contrário das medidas convencionais de potência, as quais relacionam medidas e variáveis através de funções não-lineares.

Importa lembrar, entretanto, que os elevados custos envolvidos para instalação de PMUs, principalmente decorrentes das necessidades de telecomunicação num SEP de grande dimensão, inviabilizam a obtenção de sistemas de medição para estimação de estado constituídos apenas por PMUs. Observa-se, assim, que as PMUs devem ser instaladas por etapas, ao longo dos próximos anos, e que serão utilizadas no processo de EESEP em conjunto com as medidas convencionais (medidas de potência ativa e reativa e medidas de magnitude de tensão obtidas pelo sistema SCADA).

Dentre os estimadores de estado que fazem uso de medidas convencionais e MFSs propostos na literatura, destaca-se o estimador proposto por ZHOU et al (2006). Nas próximas seções, apresenta-se a formulação desse estimador.

5.1 Estimador proposto em Zhou et al (2006)

O estimador de estado proposto por Zhou et al (2006) é uma alternativa interessante para utilização em conjunto de medidas convencionais e MFSs. Para contornar o problema da referência angular, este estimador faz o processamento dessas medidas em fases distintas, conforme será apresentado a seguir.

. Na primeira processa apenas as medidas convencionais, para parte observável do sistema através exclusivamente dessas medidas, obtendo assim as estimativas das variáveis de estado através de um processo convencional de estimação via o método dos mínimos quadrados ponderados. As estimativas obtidas nessa primeira fase são então utilizadas, na segunda fase do processo, como medidas de ângulo de fase e de magnitude de tensão nas barras do SEP, juntamente com as MFSs. Desta forma, na segunda fase, realiza-se um processo de estimação de estado linear (sem iteração), pois, as medidas que serão processadas relacionam diretamente as variáveis de estado do sistema.

O vetor dado como resultado pela estimação tradicional $[V^1]$ (primeira fase), constituído pelas magnitudes e pelos ângulos de fase das tensões, é usado como um o vetor de medidas z' no novo processo (segunda fase).

Nesse estimador, a fim de se possibilitar a realização de uma estimação de estado linear, trabalhar-se-á com medidas na forma retangular. A forma retangular da medida de tensão complexa da barra k pode ser obtida, a partir da sua forma polar, da seguinte forma:

$$V_{(k)r} = V_k \cos(\theta_k) \quad (5.1)$$

$$V_{(k)i} = V_k \sin(\theta_k) \quad (5.2)$$

sendo $V_{(k)r}$ a componente real da medida fasorial de tensão da barra k e $V_{(k)i}$ a componente imaginária da medida fasorial de tensão da barra k .

A relação entre incrementos representados em coordenadas polares e retangulares é dada pela rotação:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{(1)r} \\ \Delta V_{(2)r} \\ \dots \\ \Delta V_{(1)i} \\ \Delta V_{(1)i} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \dots & -V_1 \text{sen}(\theta_1) & 0 \\ 0 & \cos(\theta_2) & \dots & 0 & -V_2 \text{sen}(\theta_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \text{sen}(\theta_1) & 0 & \dots & -V_1 \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & \text{sen}(\theta_2) & \dots & 0 & -V_2 \cos(\theta_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \dots \\ \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Em termos mais gerais, pode-se escrever essa rotação do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ret} \\ \Delta I_{ret} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} \Delta V_{pol} \\ \Delta I_{pol} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Com a matriz de rotação R é possível obter a matriz de covariância do erro de medidas na forma retangular.

Primeiramente será calculada W_1' , que é a matriz de covariância do erro das medidas obtidas a partir do vetor de estado estimado na primeira fase na forma retangular. A matriz de covariância do erro da estimativa $[V^1]$, em coordenadas polares, é dada por:

$$Cov([V^{(1)}]) = [H_1^T W_1^{-1} H_1]^{-1} \quad (5.5)$$

Rotacionando essa matriz:

$$Cov([V^{(1)}])_{ret} = [R_1] [Cov([V^{(1)}])] [R_1]^T = W_1' \quad (5.6)$$

Assim, W_1' pode ser escrita em função de W_1 , matriz de covariância de erro relativa às medidas convencionais, do seguinte modo:

$$W_1' = [R_1] [H_1^T W_1^{-1} H_1]^{-1} [R_1]^T \quad (5.7)$$

As medidas fasoriais coletadas pelas MFSs serão também utilizadas na forma retangular. Desse modo, deve-se também utilizar a matriz de covariância do erro, dessas medidas fasoriais, rotacionada. A matriz de covariância de erro das medidas obtidas pelas MFSs será dada por:

$$W_2' = [R_2][W_2][R_2]^T \quad (5.8)$$

Notar que R_2 abrange tanto as medidas de tensão quanto as medidas de corrente. Já R_1 se restringe às medidas de tensão.

Considerando todas as medidas disponíveis, é possível relacioná-las do seguinte modo:

$$\begin{bmatrix} V_r^{(1)} \\ V_i^{(1)} \\ V_r \\ V_i \\ I_r \\ I_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1' & 0 \\ 0 & 1' \\ C1 & C2 \\ C3 & C4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ V_i \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} V_r \\ V_i \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

O termo “1” na equação acima representa uma matriz identidade e o termo “1'” representa uma matriz identidade com zeros em posições da diagonal onde não há medidas fasoriais. O índice (1) nas medidas indica que são medidas obtidas a partir das estimativas da primeira fase. As medidas sem o índice (1) são MFSs processadas apenas na segunda fase. As matrizes C's são compostas pelos termos da condutância e susceptância das linhas onde a medição da corrente fasorial foi efetuada. Considerando, por exemplo, a medição fasorial de corrente da barra “k” para barra “m” (I_{km}), as matrizes C's podem ser calculadas da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} I_{(km)r} \\ I_{(km)i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{(km)} & -g_{(km)} & (-b_{(km)} - b_{(km)}^{sh}) & b_{(km)} \\ (b_{(km)} + b_{(km)}^{sh}) & -b_{(km)} & g_{(km)} & -g_{(km)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{(k)r} \\ V_{(k)i} \\ V_{(m)r} \\ V_{(m)i} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

A equação (5.9) é linear e utilizando o método dos mínimos quadrados ponderados chegar-se-á a:

$$\hat{V} = [A^T W^{-1} A]^{-1} [[A^T W^{-1}] [z']] \quad (5.11)$$

Onde $[A]$ é definida em (5.9) e $[W]$ é a matriz de covariância:

$$[W] = \begin{bmatrix} W_1' & 0 \\ 0 & W_2' \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Sendo que ambas as submatrizes de covariância do erro foram transformadas através de rotação para ser possível a realização dos cálculos com coordenadas retangulares. W_1' é a matriz de covariância dos erros das medidas, em coordenadas retangulares, obtidas a partir do vetor estimado na primeira fase e W_2' é a matriz de covariância dos erros das medidas fasoriais, em coordenadas retangulares, obtidas através das MFSs.

5.2 Problemas Verificados

O primeiro problema encontrado, que não é destacado no artigo de Zhou et al (2006), é o fato de as estimativas da primeira fase, que são usadas como medidas na segunda fase, e as MFSs, também utilizadas na segunda fase, possuem referências angulares distintas. Observe que esse problema deve ser resolvido antes de essas medidas serem processadas na primeira fase do processo.

Para calcular a matriz $\text{Cov}([V^{(1)}])$, a partir da equação (5.5), nos deparamos com outro problema, pois, a matriz Jacobiana H_l , que aparece naquela equação e que está associada com as medidas convencionais, não possui coluna alguma associada com o ângulo de fase de tensão da barra de referência. Dessa forma, utilizando diretamente aquela matriz, na formulação supracitada, torna-se impossível obter a ponderação para a medida que será obtida a partir da estimativa do ângulo de tensão da barra de referência. Isso inviabilizaria a utilização dessa medida na segunda fase do estimador proposto por Zhou et al (2006).

5.3 Referências Angulares Distintas

Conforme mencionado anteriormente, são distintas as referências de tensão para as medidas obtidas a partir da primeira fase (utiliza uma das barras do sistema como referência) e as MFSs (referência é o sinal de GPS). Na implementação do estimador de Zhou et al (2006) esse problema foi resolvido da seguinte forma:

- Escolhe-se, como referência de ângulo de fase de tensão na primeira fase, uma barra com PMU;
- Para colocar as medidas de PMU na mesma referência das estimativas obtidas na primeira fase, basta subtrair, das medidas de ângulo de fase de tensão de PMU, o valor do ângulo de fase de tensão medido pela PMU na barra escolhida como referência na fase 1.

Observe que esse procedimento exige que a barra tomada como referência, na primeira fase, possua PMU. Porém, tal procedimento pode ser melhorado da seguinte forma:

- Calcula-se a média da diferença entre os ângulos de fase de tensão medidos pelas PMU (θ_{PMU}) e os estimados na primeira fase ($\theta_{fase\ 1}$), para todas as m_{pmu} barras supervisionadas por PMUs. Esse valor médio será chamado de $\theta_{correção}$, calculado da seguinte forma:

$$\theta_{correção} = \frac{1}{m_{pmu}} \sum_{i=1}^{m_{pmu}} (\theta_{PMU(i)} - \theta_{fase\ 1(i)}) \quad (5.13)$$

- Acrescenta-se, aos valores estimados para os ângulos de fase na primeira fase, o valor médio previamente calculado, da seguinte forma:

$$\theta_{fase\ 1(i)} = \theta_{fase\ 1(i)} + \theta_{correção} \quad (5.14)$$

- Dessa forma, todas as medidas de ângulo de fase de tensão (obtidas na primeira fase e as MFSs) estarão na mesma referência e poderão ser processadas simultaneamente na segunda fase.

5.4 Obtenção da Matriz de Covariância para as medidas Obtidas a Partir das Estimativas da Fase 1

Para contornar esse problema, foram realizadas algumas alterações na matriz Jacobiana H_1 , utilizada na formulação previamente apresentada. As alterações são as seguintes:

- Inclusão de uma coluna de derivadas em relação ao ângulo de fase de tensão da barra de referência;
- Inclusão da linha de derivadas de uma pseudo-medida de ângulo de fase de tensão da barra de referência. Para ponderar essas medidas foi utilizada a menor ponderação (ou maior desvio padrão) das medidas convencionais consideradas na primeira fase.

A primeira alteração supracitada é necessária para possibilitar o cálculo das ponderações para as medidas obtidas a partir de todas as variáveis de estado estimadas na primeira fase. Caso fosse utilizada a matriz Jacobiana convencional, não seria possível calcular a ponderação para medida de ângulo de fase de tensão da barra de referência, o que inviabilizaria a utilização das medidas de estado retangulares (real e imaginária) relativas à barra de referência.

A segunda alteração foi necessária devido à matriz Jacobiana obtida não possuir inversa. Com a inclusão de uma pseudo-medida de ângulo de fase de tensão na barra de referência, resolve-se tal problema. As derivadas da pseudo-medida para barra de referência k são:

$$\frac{\partial \text{Pseudo}_k}{\partial \theta_k} = 1 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial \text{Pseudo}_k}{\partial \theta_m} = 0 \quad (5.16)$$

$$\frac{\partial \text{Pseudo}_k}{\partial V_k} = 0 \quad (5.17)$$

$$\frac{\partial \text{Pseudo}}{\partial V_m} k = 0 \quad (5.18)$$

5.5 Algoritmo da Segunda Fase

1. Formar o vetor de medidas z' , formado a partir das estimativas da primeira fase e das MFSs de tensão e corrente disponíveis.
2. Ajustar as referência angulares das medidas, conforme apresentado na seção 3.2..
3. Transformar o vetor de medidas z' da forma polar para a forma retangular.
4. Calcular as ponderações das medidas obtidas a partir das estimativas da primeira fase, conforme apresentado na seção 6.
 - 4.1 Formação da matriz jacobiana completa H , com a inclusão da pseudo-medida do ângulo de fase de tensão da barra de referência.
 - 4.2 Calcular matriz $G = H^t.W.H$
 - 4.3 Inverter matriz G , obtendo a matriz de covariância de erro W_1 dos resultados da primeira fase.
5. Rotação das ponderações.
 - 5.1 Calcular matrizes de rotação R_1 , R_2 , R_3 , referentes às medidas estimadas, MFSs de tensão e de corrente, respectivamente.
 - 5.2 Rotacionar as matrizes de ponderação. $W' = R.W.R^T$

- 5.3 Obter matriz de covariância W' de z' na forma retangular.
6. Calcular matriz jacobiana A .
 7. Resolver o sistema linear dado por: $[A^{-1}W'^{-1}A]. V = [A^{-1}W'^{-1}][z']$, onde V é o resultado final das medidas de variáveis de estado das barras.
 8. Transformar o vetor V da forma retangular para a forma polar.

6. Procedimentos para Simulações

A análise do desempenho do estimador de estado híbrido proposto por Zhou et al (2006) será realizada através de diversas simulações computacionais, seguindo um procedimento bem definido e que reflete o caráter estatístico do estimador.

6.1 Geração de Medidas

A partir do software ANAREDE, executa-se um estudo de fluxo de carga para o sistema a ser analisado. Através do resultado desse estudo obtém-se um conjunto de medidas "verdadeiras" (sem ruído) que caracterizam o sistema.

Por meio de simulações, verificou-se que utilizando as medidas obtidas pelo fluxo de carga em um estimador convencional, foram encontradas medidas com ruídos significativos. Isto ocorre porque o arquivo com os resultados do estudo de fluxo de carga apresentam uma precisão numérica limitada pelo número de caracteres do arquivo. Portanto, não se utiliza as medidas do fluxo de carga como medidas verdadeiras.

Com os valores das variáveis de estado estimadas, calculam-se novamente todas as medidas, obtendo o vetor de medidas convencionais e fasoriais sincronizadas “verdadeiro”, isto é, sem ruído.

A partir do vetor de medidas “verdadeiro”, também se calcula o desvio padrão de cada medida, passo que será detalhado na seção 6.2. Acrescenta-se, enfim, ao vetor de medidas “verdadeiro”, erros aleatórios com distribuição Gaussiana de média zero e de desvios-padrão anteriormente calculados, acrescentando ruído de no máximo 3 desvios-padrão, conforme a equação:

$$z^m = z^{real} + 3 * \sigma * \alpha, \quad (6.1)$$

onde: α é uma variável aleatória $N(0,1)$, isto é, variável aleatória com distribuição normal de média zero e variância 1.

6.2 Ponderação de Medidas Convencionais e Fasoriais

A presença de erros inerentes aos valores das medidas de SEP implica na necessidade de uma filtragem numérica das medidas nos centros de controle e operação do sistema. A qualidade e a precisão das medidas estão associados à qualidade e à precisão dos medidores e dos transformadores dos instrumentos utilizados. Assim, torna-se necessário que um peso maior seja atribuído às medidas de maior qualidade e precisão. Portanto, as medidas são ponderadas pelo inverso dos seus desvios-padrão, calculados de acordo com a seção 6.3.

6.3 Cálculo dos Desvios Padrões das Medidas

Os desvios-padrão serão calculados de três maneiras:

1. Desvios Padrões de valor constante
2. Desvio Padrão associado à medida
3. Desvio Padrão considerando fundo de escala

Vale destacar que todas as possibilidades de cálculo de desvio padrão já foram empregadas em outras pesquisas desenvolvidas na área, conforme apresentado por Castillo-Albertini (2010). Importa lembrar que nessa referência realizou-se uma sucinta revisão de diferentes proposições para cálculo dos desvios padrão de medidas, para efeito de estimação de estado.

6.3.1 Desvios-Padrão de valor constante

Valores utilizados são constantes para cada tipo de medida, conforme apresentado na tabela:

Tipo de Medição	Desvio Padrão (pu)
Magnitude de Tensão	0.002
Injeção de Potência	0.013
Fluxo de Potência	0.013
Ângulo de Tensão	0.0004
Magnitude de Corrente	0.001
Ângulo de Corrente	0.0004

Tabela 6.1 – Desvios constantes para medidas

6.3.2 Desvios-Padrão associado ao valor da medida

Determina-se o valor do desvio padrão pela equação 6.2:

$$\sigma = \frac{pr \cdot |Z_{real}|}{3} \quad (6.2)$$

onde pr é a precisão, que varia conforme o tipo de medida e pode ser obtida da tabela 6.2, e $|Z_{real}|$ o módulo do valor “real” da medida.

Tipo de Medição	Precisão (%)
Magnitude de Tensão	0.6
Injeção de Potência	5.0

Fluxo de Potência	5.0
Ângulo de Tensão	0.1
Magnitude de Corrente	0.3
Ângulo de Corrente	0.1

Tabela 6.2 – Precisão de medidas

6.3.3 Desvios-Padrão em função do fundo de escala

Utiliza-se o valor de fundo de escala (f_e) para calcular o desvio padrão, dado na tabela 6.3. As medidas fasoriais sincronizadas foram ponderadas da mesma maneira descrita na ponderação constante

Intervalo	Fundo de Escala (f_e)
$2.00 \leq Z \leq 2.80$	2.80
$1.80 \leq Z \leq 2.00$	2.00
$1.00 \leq Z \leq 1.80$	1.80
$0.50 \leq Z \leq 1.00$	1.00
$0.20 \leq Z \leq 0.50$	0.50
$0.10 \leq Z \leq 0.20$	0.20
$0.00 \leq Z \leq 0.10$	0.10

Tabela 6.3 - Fundo de escala para medidores

Obtido valor, realiza-se o seguinte cálculo:

$$\sigma = \frac{pr \cdot f_e}{3} \quad (6.3)$$

onde pr é a precisão da tabela.

Vale ressaltar que os medidores convencionais são projetados para medir com boa exatidão considerando o sistema em regime permanente ou variando muito lentamente. Isso se dá pelo fato de que medidas convencionais têm uma constante de tempo

elevada e pela forma de transmissão de dados para os centros de operação (MORAES, 2009). “Assim estimadores de estado convencionais não seriam adequados para reproduzir o comportamento dinâmico do sistema de potência, e sim para a medição de regimes permanentes sucessivos, nos quais as mudanças ocorrem com constantes de tempo lentas” (MORAES, 2009).

6.4 Métricas para avaliação de desempenho

Este trabalho tem como principal objetivo a avaliação dos benefícios da incorporação de MFSs no processo de EESEP. Para isso, serão adotados critérios de desempenho baseados em métricas numéricas, propostas por COSTA et al(2008).

Assim, foram adotadas três métricas para avaliar o desempenho do estimador:

Desvio: calculada como uma função da diferença entre os valores dos estados (magnitude e ângulo de tensão) “verdadeiros”, isto é oriundos do estudo de fluxo de carga, e estimados::

$$Desvio = \sum_{k=1}^{n^{\circ} \text{ de estados}} \left[\frac{(x_k^{\text{verdadeiro}} - x_k^{\text{est}})^2}{\sigma_{xi}} \right] \quad (6.4)$$

sendo:

$$\sigma_{xi} = \sqrt{G_{ii}^{-1}} \quad (6.5)$$

onde G_{ii}^{-1} é o i-ésimo termo da diagonal da matriz covariância das variáveis de estado formada na segunda etapa (inverso da matriz ganho).

Métrica para valores de fluxo: calculada como uma função da diferença entre os valores complexos do fluxo verdadeiro e do fluxo estimado:

$$Macc_S = \left\{ \sum_{k=1}^{n^{\circ} \text{ de linhas}} \left[\left(\overrightarrow{S_{k,de}^{verdadeiro}} - \overrightarrow{S_{k,de}^{est}} \right)^2 + \left(\overrightarrow{S_{k,para}^{verdadeiro}} - \overrightarrow{S_{k,para}^{est}} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (6.7)$$

Métrica para valores de tensão: calculada como uma função da diferença entre os fasores de tensão real e estimada:

$$Macc_V = \left[\sum_{k=1}^{n^{\circ} \text{ de barras}} \left(\overrightarrow{V_k^{verdadeiro}} - \overrightarrow{V_k^{est}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (6.8)$$

6.5 Resumo de metodologias

Para as simulações numéricas realizadas, foram utilizados planos de medição nos sistemas IEEE5 e IEEE14 .

No IEEE5 foi avaliado o desempenho ao se incluir MFSs de tensão.

No IEEE14 foram avaliados separadamente o desempenho das MFSs de tensão, MFSs de corrente e os efeitos gerados ao se alterar os desvios-padrão das MFSs de tensão.

Conforme será visto, as MFSs de corrente apresentaram problemas, portanto, apresentou-se apenas um teste no sistema IEEE14 considerando medidas fasoriais de corrente.

Em cada sistema, foram realizadas simulações numéricas para 100 diferentes amostras de medidas, de um mesmo plano de medição. Dessa forma obteve-se assim uma média e um desvio-padrão das métricas para maior segurança.

O resumo dos procedimentos adotados é:

- 1- Um estudo de fluxo de carga é executado sobre o sistema em análise

- 2- A partir do resultado obtido no fluxo de carga, insere-se um conjunto de medidas no estimador WLS convencional, obtendo-se os valores “verdadeiros” para as medidas.
- 3- Com o conjunto de medidas “verdadeiras” calcula-se os desvios-padrão de cada medida.
- 4- Através dos desvios, gera-se 100 diferentes amostras de medidas com ruído de no máximo 3 desvios-padrão.
- 5- As medidas geradas são inseridas no estimador proposto por Zhou et al(2006), obtendo-se conjuntos de estados estimados.
- 6- Através do conjunto de medidas “verdadeiras” e estimadas, calculam-se as métricas.

Os ruídos gerados apresentam uma distribuição normal de média zero e de desvios-padrão relativo à medida. Para gerar esses ruídos em linguagem C++, implementou-se o algoritmo de Box-Muller (PRESS,2002), para gerar os ruídos com um distribuição normal.

7. Simulações e Resultados

Conforme mencionado anteriormente, as simulações foram realizadas em dois sistemas: IEEE5 e IEEE14.

Na maioria dos testes, as mudanças ocorridas das métricas de desvio, tensão e fluxo foram tabeladas conforme se acrescentava MFSs de tensão. Deve-se destacar, desde já, que não se obteve convergência em qualquer caso de ponderação ao se inserir MFSs de corrente no sistema. Portanto, esse capítulo trabalha, em sua maioria, apenas com testes de MFSs de tensão. Para estas, detectou-se melhorias na estimação de estado, algumas mais visíveis dependendo do tipo de cálculo de desvio-padrão inserido.

Também foram aplicados testes variando a precisão das MFSs de magnitude e ângulo de tensão, para verificar as vantagens de uma instrumentação mais precisa e também para analisar o efeito separado das duas medidas, que devem necessariamente trabalhar em conjunto no estimador proposto por Zhou et al (2006)

Para todos os testes, considerou-se uma diferença de 0.01 radianos (0.573°) entre a referência da barra $V\theta$ escolhida no primeiro caso e a referência angular do GPS do SMFS. Vale ressaltar que essa diferença altera o resultado dos testes no caso em que se utiliza desvio-padrão associado à medida, pois o desvio é calculado diretamente através do valor absoluto de todas as medidas.

Por motivos práticos, os valores dos ângulos estimados foram todos convertidos para referência em relação a Barra 1, após o final da segunda fase do estimador híbrido, mesmo em casos em que a barra de referência não é a primeira, ou seja, casos em que não há instrumento de medição fasorial instalado na Barra 1, tradicionalmente utilizada como referência na estimação de estado convencional.

7.1 Estudo de caso Sistema IEEE5

O IEEE5 é uma versão simplificada do sistema IEEE14. Neste sistema, foram avaliados apenas os efeitos das MFSs de tensão.

O plano de medição base, com as medidas convencionais que serão utilizadas ao longo de todos os testes envolvendo o sistema IEEE5, encontram-se na tabela 7.1.

Tipo	Medida	Unidade	Locais	Quantidade
<i>Injeção</i>	<i>P</i>	MW	Barras 1; 3	2
<i>Injeção</i>	<i>Q</i>	MVAr	Barras 1; 3	2
<i>Fluxo</i>	<i>Pkm</i>	MW	Ramos 1-2; 2-5; 4-5	3
<i>Fluxo</i>	<i>Pmk</i>	MW	Ramos 1-5, 2-3, 2-4	3
<i>Fluxo</i>	<i>Qkm</i>	MVAr	Ramos 1-2; 2-5; 4-5	3
<i>Fluxo</i>	<i>Qmk</i>	MVAr	Ramos 1-5, 2-3, 2-4	3
<i>Tensão</i>	<i>V</i>	pu	Barra 1;	1

Tabela 7.1 – Plano de medição base – sistema IEEE5

Na tabela 7.2 estão os estados “verdadeiros”, obtidos após inserir as medidas do fluxo de carga em um estimador WLS convencional. Através desses valores, calcula-se todo o conjunto de medidas verdadeiras do plano de medição utilizado no sistema IEEE5.

Barra	Tensão (pu)	Ângulo de Fase (°)
Barra 1	1.05995	0.000
Barra 2	1.04492	-2.941
Barra 3	1.00993	-9.317
Barra 4	1.03215	-5.982
Barra 5	1.03821	-4.790

Tabela 7.2 – Estado “Real – sistema IEEE5

Os testes a seguir foram feitos para estudar a influência das MFSs de tensão no desempenho da estimação de estado e fluxo. Executaram-se os procedimentos descritos no capítulo anterior e obteve-se as métricas para cada caso de quantidade de MFSs de tensão. O acréscimo foi feito acompanhando as barras do sistema.

7.1.1 Desvio-Padrão de valor constante

As figuras 7.1, 7.2 e 7.3 apresentam a relação das métricas de desvio, tensão e fluxo, respectivamente, conforme MFSs de tensão são inseridas.

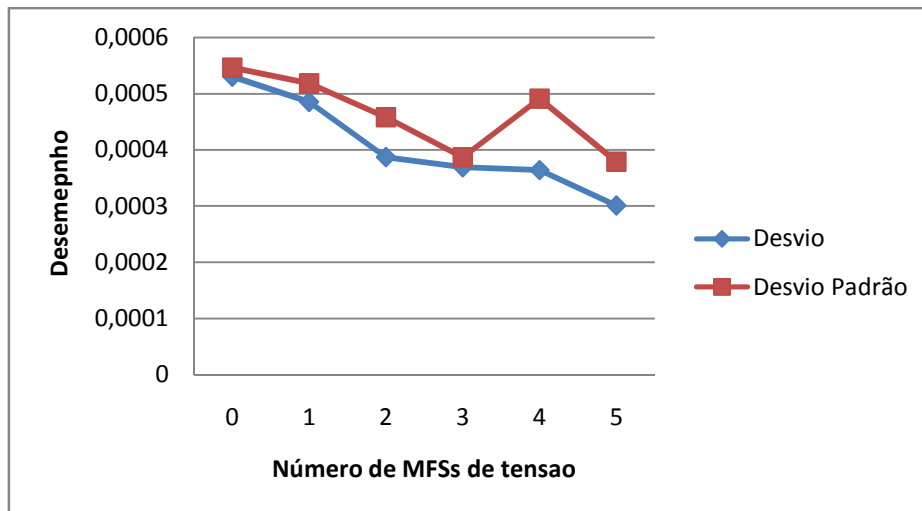


Figura 7.1 - Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão Constante

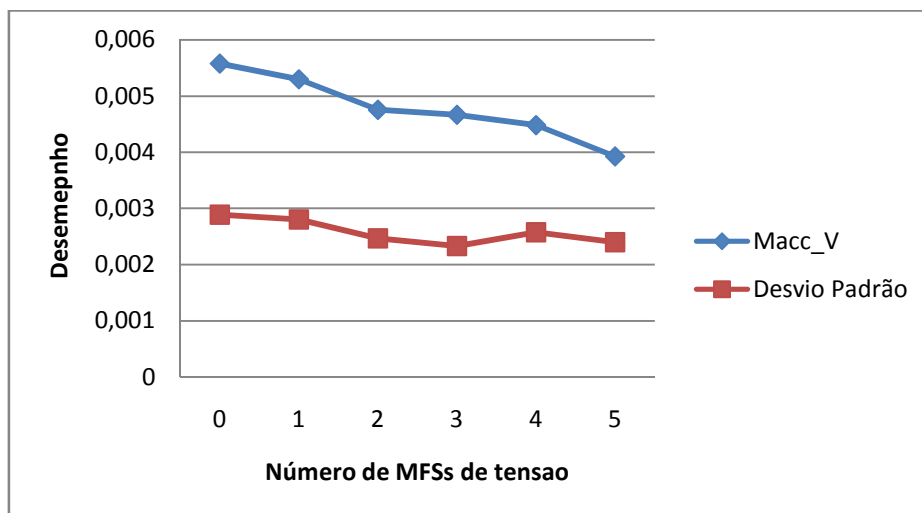


Figura 7.2 - Macc_V em função de MFSs de tensão - IEEE5 – Desvio-Padrão Constante

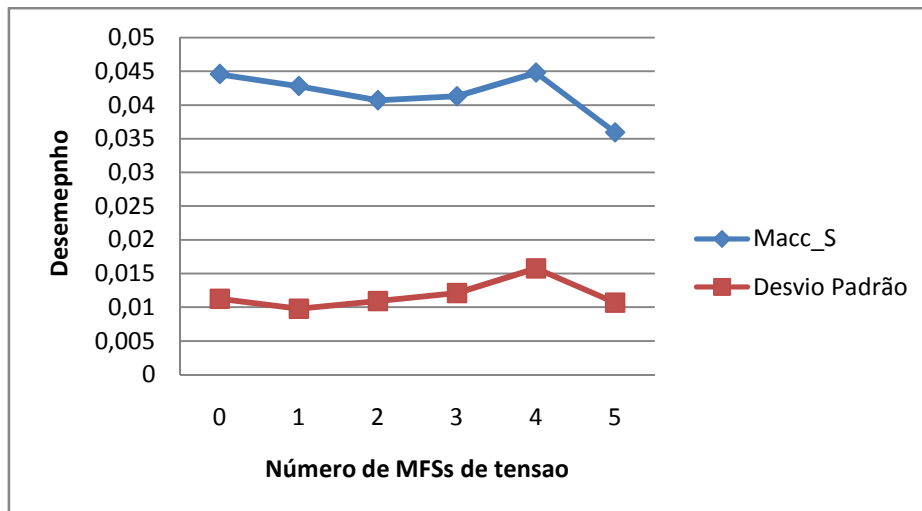


Figura 7.3 - Macc_S em função de MFSs de tensão - IEE5 – Desvio-Padrão Constante

O desempenho da estimação de estado é ligeiramente melhorado pela adição contínua das medidas fasoriais. O comportamento de queda das métricas de desvio e tensão (Desvio e Macc_V) indicam que a precisão dos estados estimados é beneficiada.

A precisão do fluxo estimado comporta-se de maneira quase similar, com a exceção do momento em que se adiciona a MFSs da Barra 4. Deve-se notar, entretanto, que o desvio-padrão de todas as métricas elevou-se, indicando que os ruídos tenham sido mais intensos.

7.1.2 Desvio-Padrão associado ao valor da medida

As figuras 7.4, 7.5 e 7.6 apresentam a relação das métricas de desvio, tensão e fluxo, respectivamente, conforme MFSs de tensão são inseridas.

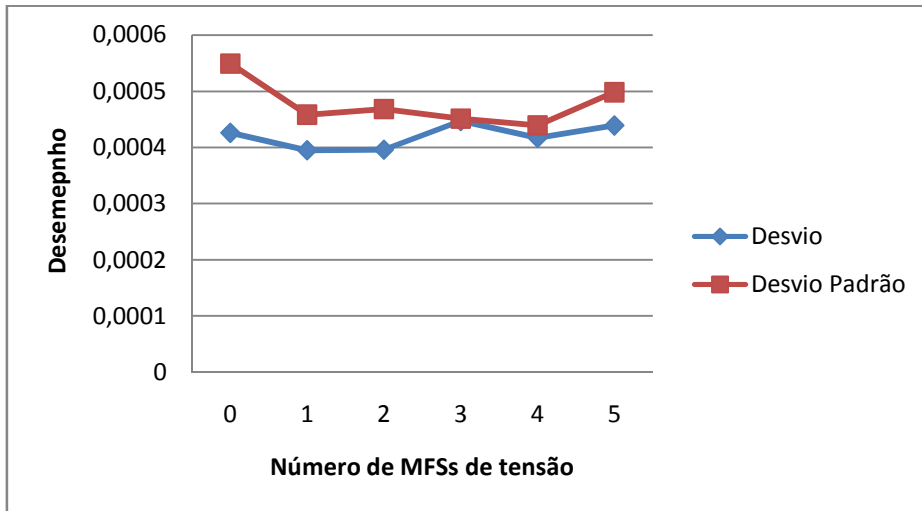


Figura 7.4 - Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão associado à medida

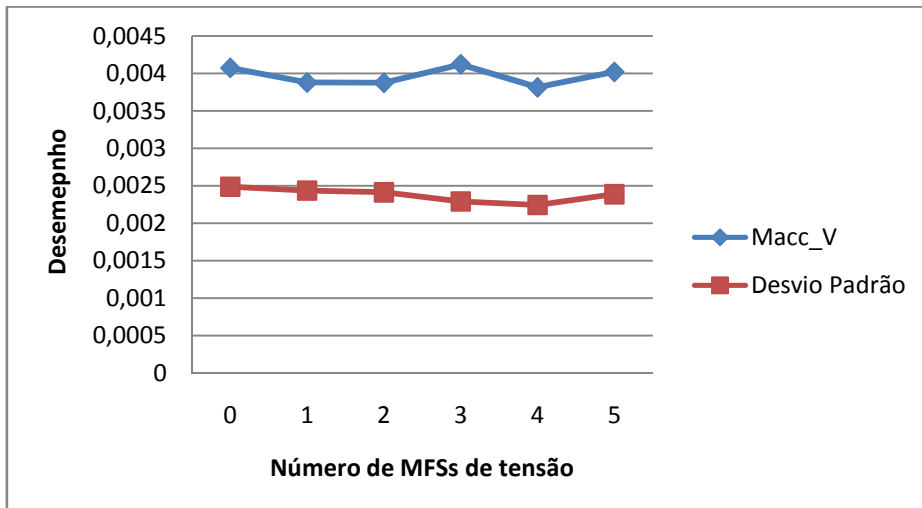


Figura 7.5 – Macc_V em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão associado à medida

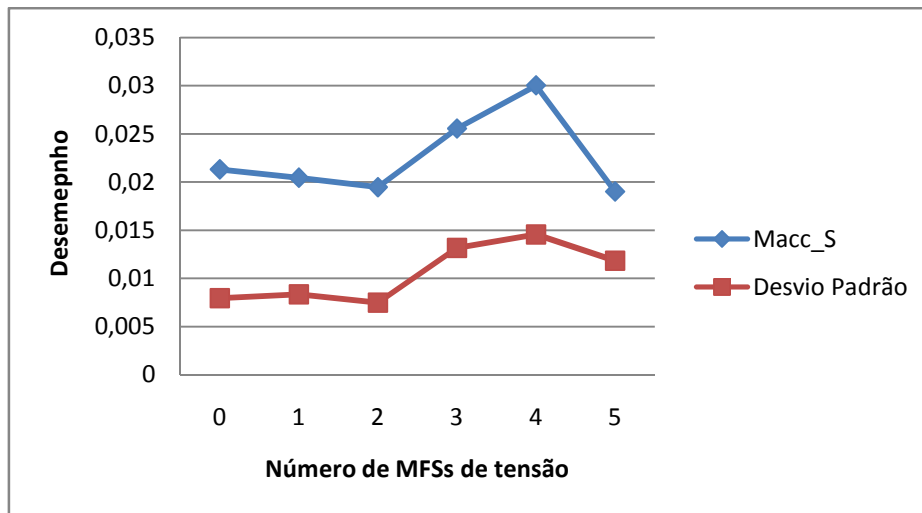


Figura 7.6 – Macc_S em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão associado à medida

Para este caso de ponderação, os resultados não demonstraram benefício na incorporação de MFSs à estimação de estado. A precisão dos estados estimados manteve-se praticamente constante, enquanto a precisão do fluxo claramente piorou ao se adicionar 3 ou 4 MFSs.

7.1.3 Desvio-Padrão em função do fundo de escala

As figuras 7.7, 7.8 e 7.9 apresentam a relação das métricas de desvio, tensão e fluxo, respectivamente, conforme MFSs de tensão são inseridas.

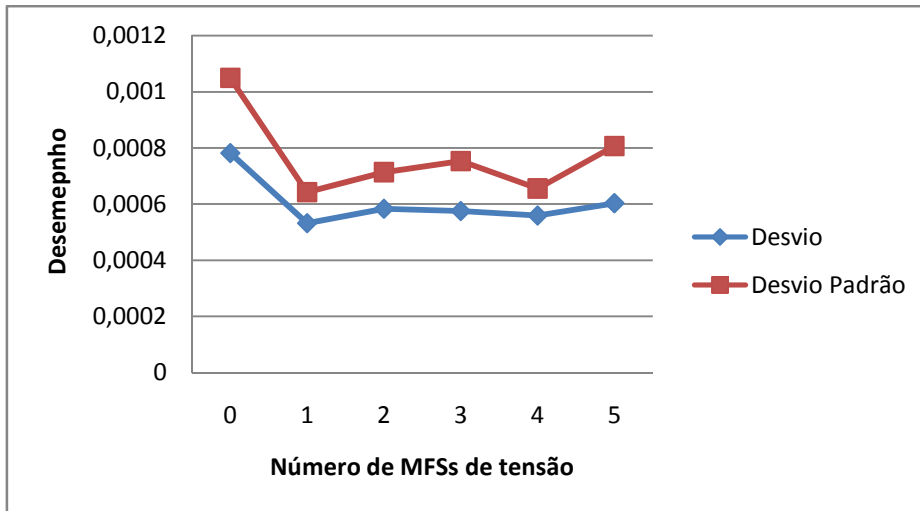


Figura 7.7 - Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

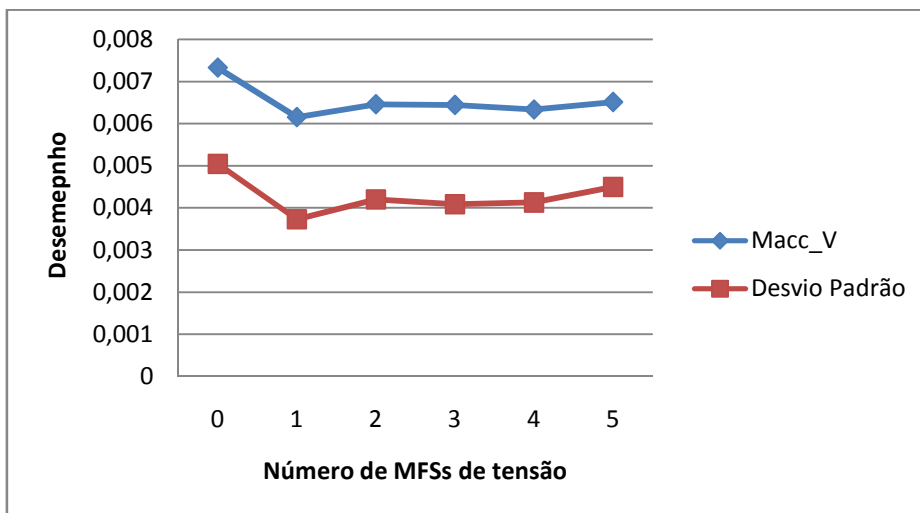


Figura 7.8 – Macc_V em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

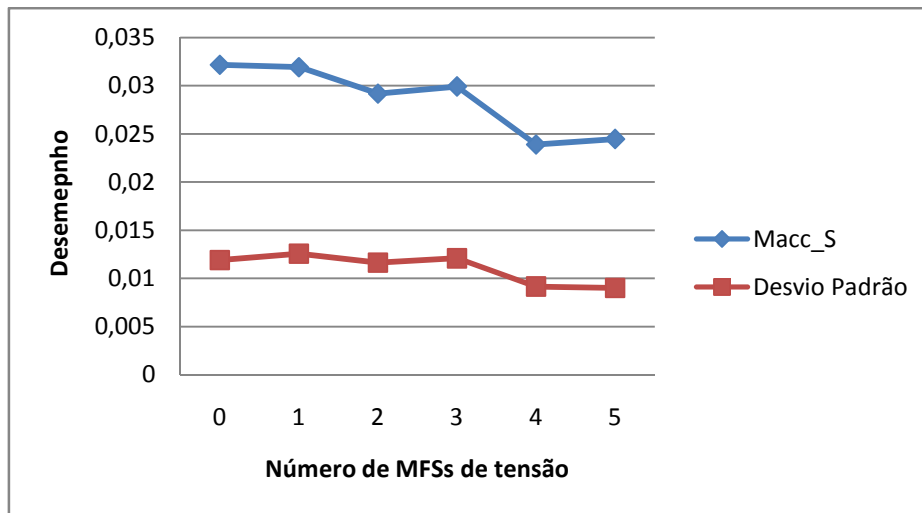


Figura 7.9 – Macc_S em função de MFSs de tensão – IEEE5 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

A adição de somente uma MFSs de tensão provocou uma melhoria na precisão dos estados estimados, entretanto, outras MFSs não pareceram causar grande influência. O desempenho da estimação dos fluxos foi ligeiramente melhorado ao se inserir mais MFSs.

7.2 Estudo de caso Sistema IEEE14

Neste sistema, foram analisados os efeitos separados das MFSs de tensão, para as três diferentes ponderações propostas, e das MFSs de corrente, utilizando a ponderação de valores constantes. Também foi realizado um estudo do desempenho do estimador híbrido ao se variar os desvios-padrão das MFSs de tensão.

Na tabela 7.3, está o plano de medição base, com a localização e o tipo das medidas convencionais utilizadas. Este plano de medição das medidas convencionais será usado ao longo de todos os testes realizados nesta seção.

Tipo	Medida	Unidade	Locais	Quantidade
<i>Injeção</i>	<i>P</i>	MW	Barras 3; 6; 10; 13	4
<i>Injeção</i>	<i>Q</i>	MVAr	Barras 3; 6; 10; 13	4
<i>Fluxo</i>	<i>Pkm</i>	MW	Ramos 1-2; 1-5; 2-3; 4-7; 4-9; 5-6; 6-11; 6-13; 7-8; 9-10; 9-14; 10-11; 12-13	13
<i>Fluxo</i>	<i>Pmk</i>	MW	Ramos 2-5; 7-8	2
<i>Fluxo</i>	<i>Qkm</i>	MVAr	Ramos 1-2; 1-5; 2-3; 4-7; 4-9; 5-6; 6-11; 6-13; 7-8; 9-10; 9-14; 10-11; 12-13	13
<i>Fluxo</i>	<i>Qmk</i>	MVAr	Ramos 2-5; 7-8	2
<i>Tensão</i>	<i>V</i>	pu	Barras 1	1

Tabela 7.3 – Plano de medição base – sistema IEEE14

Na tabela 7.4, estão as medidas “reais” geradas por um estimador WLS convencional utilizando como entrada as medidas obtidas pelo estudo do fluxo de carga:

Barra	Tensão (pu)	Ângulo de Fase (°)
<i>Barra 1</i>	1.05997	0.000
<i>Barra 2</i>	1.04502	-4.985
<i>Barra 3</i>	1.00996	-12.781
<i>Barra 4</i>	1.01765	-10.420
<i>Barra 5</i>	1.01947	-8.774
<i>Barra 6</i>	1.07020	-14.220
<i>Barra 7</i>	1.06173	-13.469
<i>Barra 8</i>	1.08546	-15.411
<i>Barra 9</i>	1.05599	-14.947
<i>Barra 10</i>	1.05111	-15.105
<i>Barra 11</i>	1.05711	-14.793
<i>Barra 12</i>	1.05567	-15.078
<i>Barra 13</i>	1.05061	-15.150
<i>Barra 14</i>	1.03595	-16.019

Tabela 7.4 – Estado “Real – sistema IEEE14

Nos próximos testes analisou-se a variação do desempenho do estimador ao se inserir MFSs. Nas simulações envolvendo apenas MFSs de tensão, a cada nova simulação adicionou-se duas MFSs de magnitude e ângulo de tensão.

7.2.1 Desvio-Padrão de valor constante

É apresentado nas figuras 7.10, 7.11, 7.12 do desempenho do estimador em relação o às métricas de desvio, tensão e fluxo, considerando o acréscimo gradual de duas MFSs de tensão e o sistema de ponderação constante.

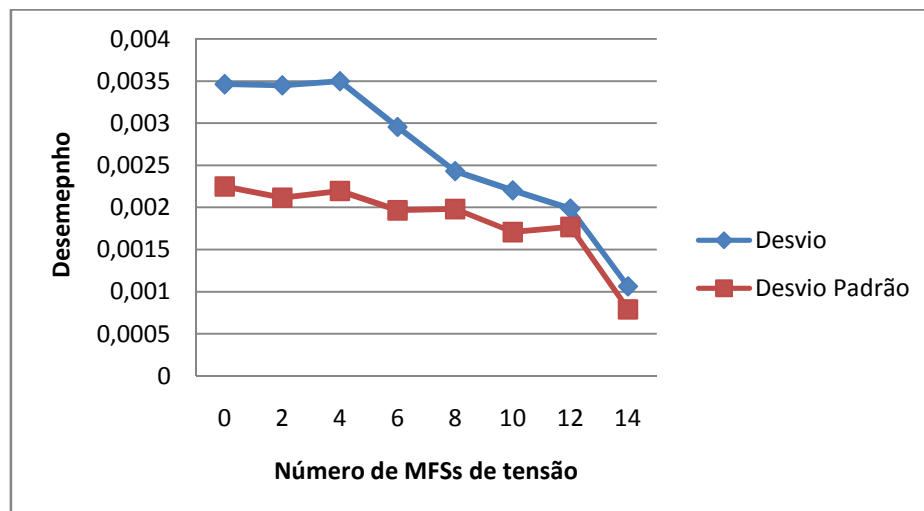


Figura 7.10 - Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

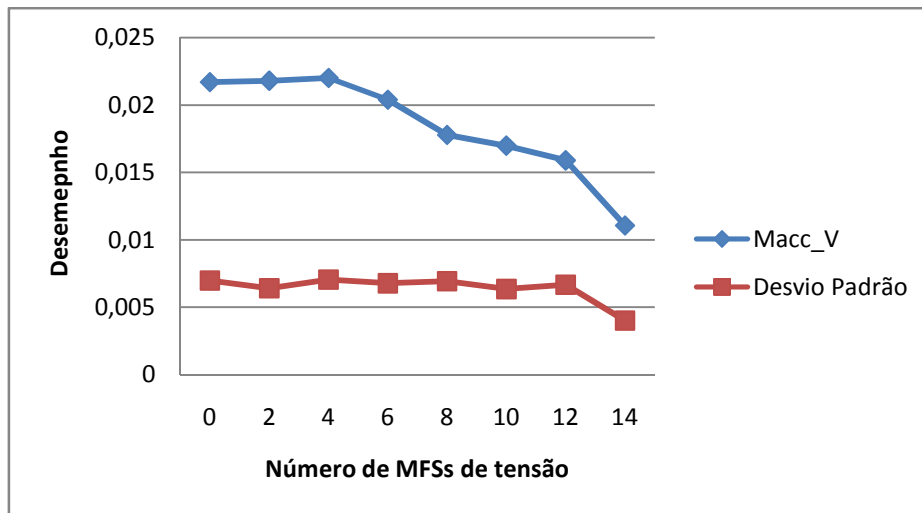


Figura 7.11 – Macc_V em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

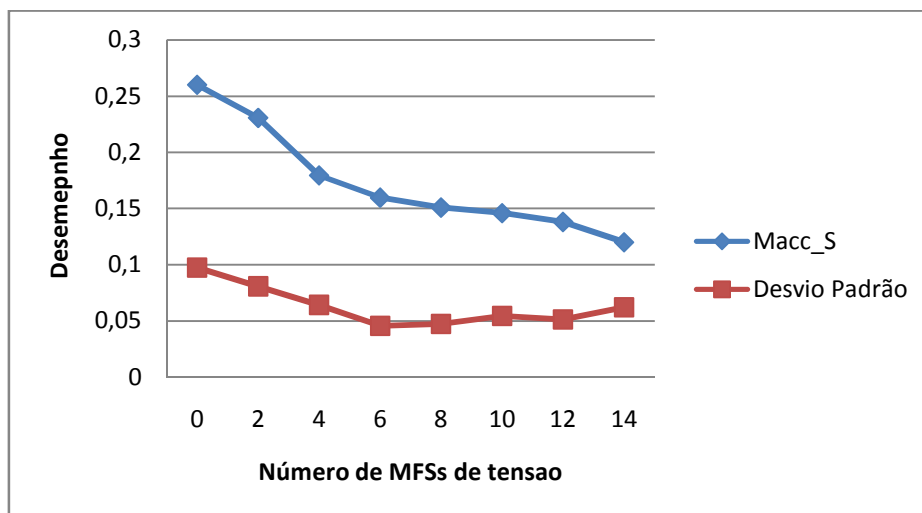


Figura 7.12 – Macc_S em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

Mais uma vez para a ponderação constante, a influência positiva no desempenho do estimador é nítida em todas as métricas. Para o sistema IEEE14, a influência das MFSs é ainda mais nítida do que no sistema IEEE5.

7.2.2 Desvio-Padrão associado ao valor da medida

É apresentado nas figuras 7.13, 7.14, 7.15 do desempenho do estimador em relação às métricas de desvio, tensão e fluxo, considerando o acréscimo gradual de duas MFSs de tensão e o sistema de ponderação associado ao valor da medida.

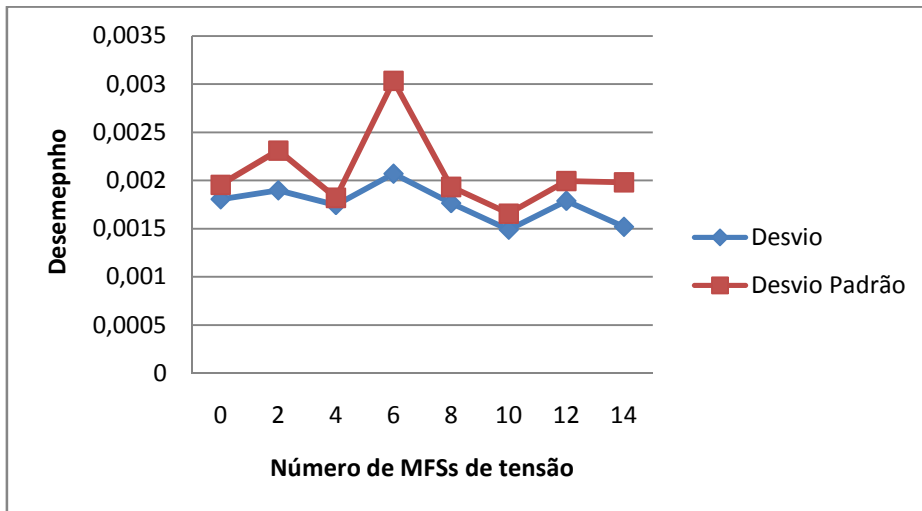


Figura 7.13 – Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão associado à medida

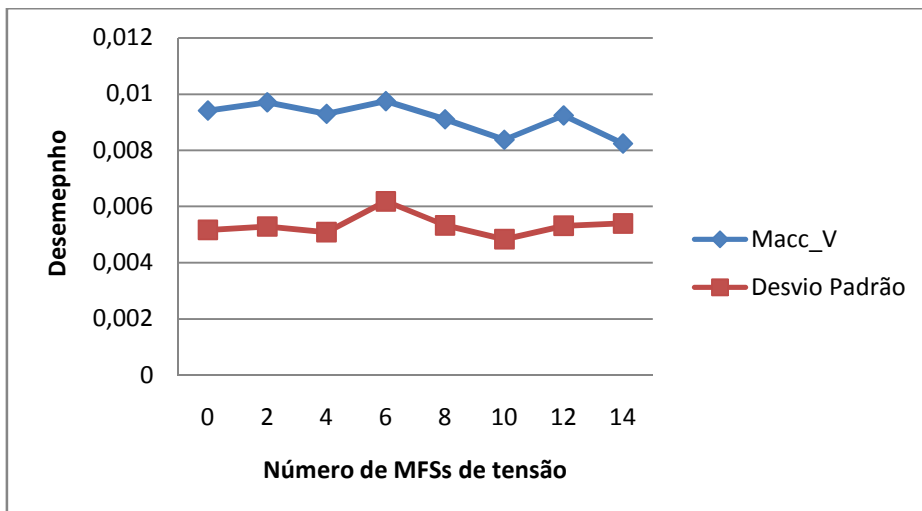


Figura 7.14 – Macc_V em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão associado à medida

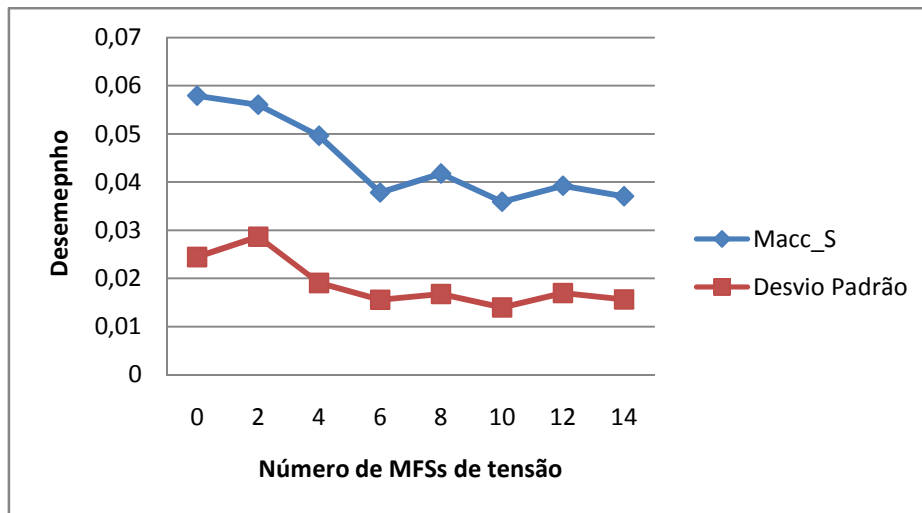


Figura 7.15 – Macc_S em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão associado à medida

O comportamento das métricas relacionadas à precisão dos estados estimados foi similar ao visto no estudo de caso IEEE5. Não foi notada grande diferença, permanecendo o desempenho muito próximo daquele obtido somente por medidas convencionais.

Para o fluxo estimado, nota-se que houve uma melhoria de sua precisão. Interessante destacar que a partir da sexta MFSs de tensão adicionada, não houve melhorias adicionais visíveis. Na seção anterior, utilizando ponderação constante, há apenas uma pequena queda da métrica.

7.2.3 Desvio-Padrão em função do fundo de escala

É apresentado nas figuras 7.16, 7.17, 7.18 do desempenho do estimador em relação às métricas de desvio, tensão e fluxo, considerando o acréscimo gradual de duas MFSs de tensão e o sistema de ponderação associado ao valor da medida.

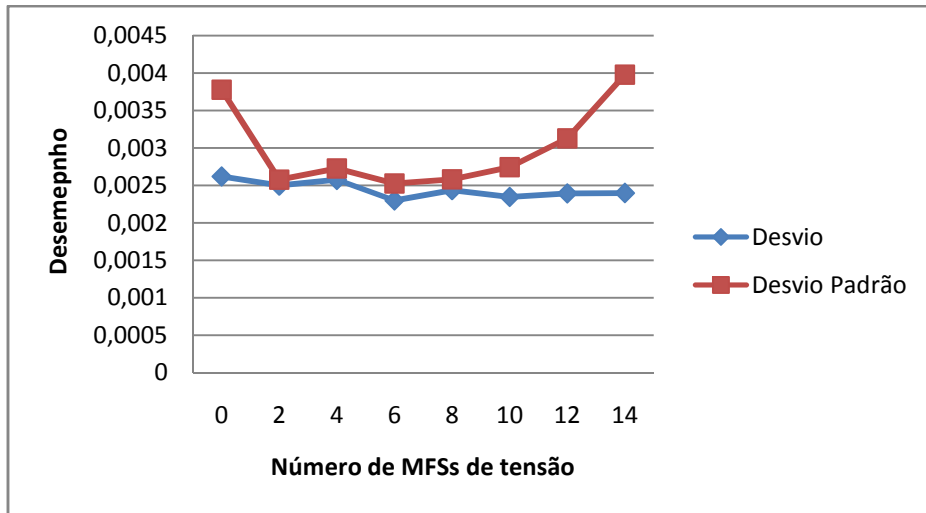


Figura 7.16 – Desvio em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

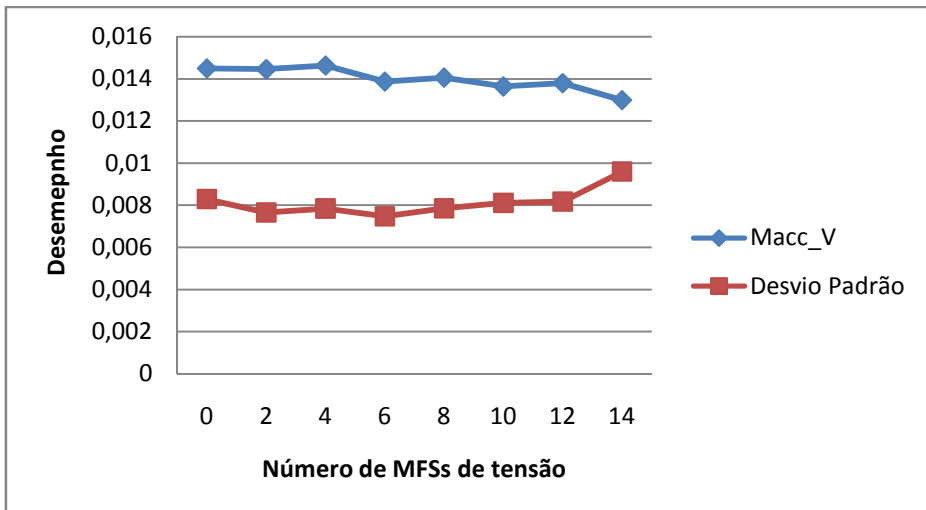


Figura 7.17 – Macc_V em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

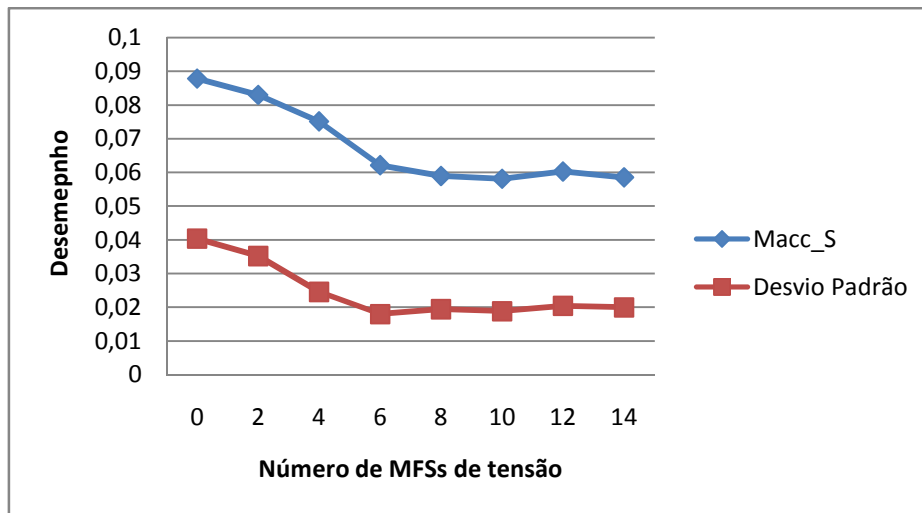


Figura 7.18 – Macc_S em função de MFSs de tensão – IEEE14 – Desvio-Padrão em função do fundo de escala

Novamente houve uma melhoria da precisão do fluxo estimado. Interessante destacar que a partir da sexta MFSs de tensão adicionada, não houve melhorias adicionais visíveis. Na seção anterior, utilizando ponderação constante, há uma apenas uma pequena queda da métrica.

7.2.4 Comparação entre ponderações

Nesta seção, compara-se o funcionamento de cada sistema de ponderação utilizado. As figuras 7.19, 7.20 e 7.21 ilustram a variação das métricas de desvio, tensão e fluxo dos três diferentes casos de ponderação ao se acrescentar MFSs de tensão no sistema.

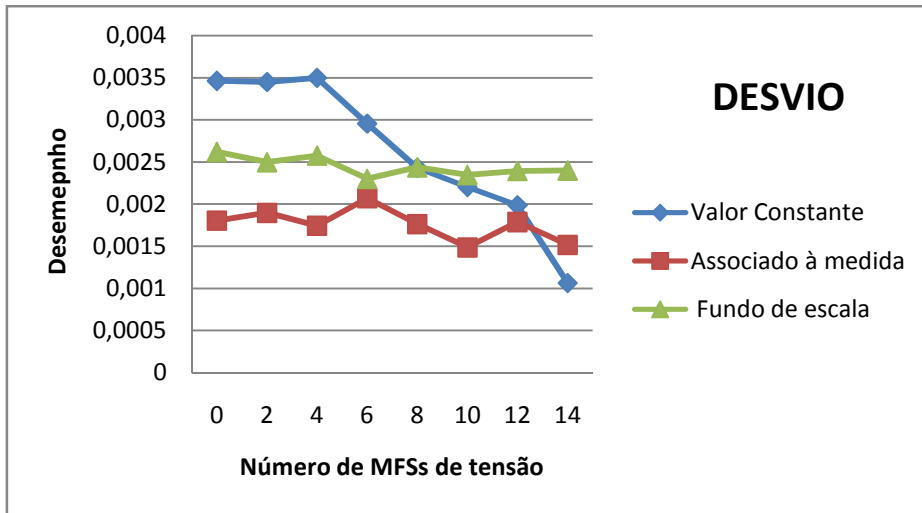


Figura 7.19 – Desvio para diferentes ponderações – IEEE14

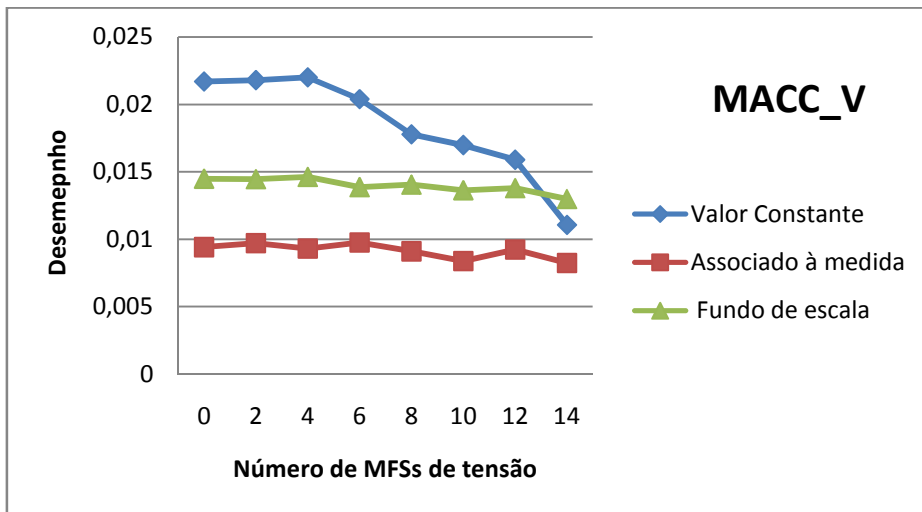


Figura 7.20 – Macc_V para diferentes ponderações – IEEE14

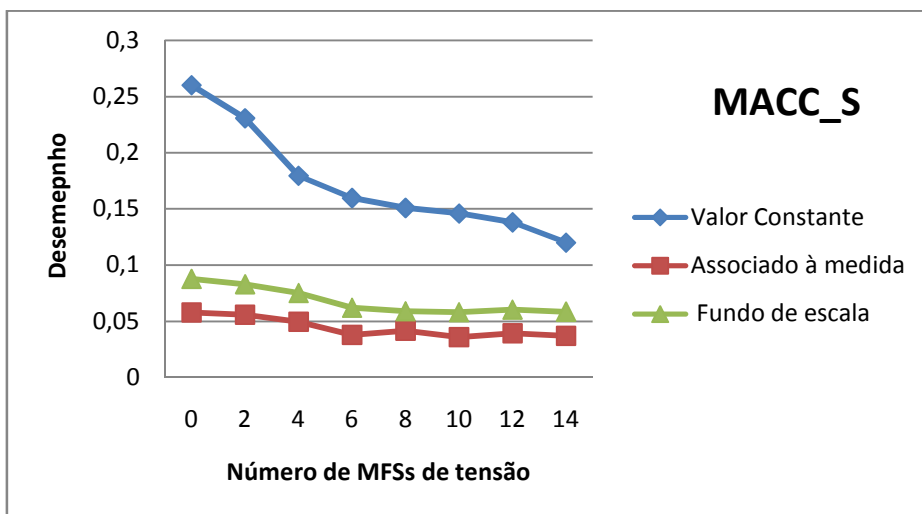


Figura 7.21 – Macc_S para diferentes ponderações – IEEE14

Ao se utilizar somente medidas convencionais, nota-se o melhor desempenho para a ponderação associada à medida, seguido pela ponderação em função do fundo de escala. A ponderação constante claramente apresentou os piores resultados para a estimação de estado convencional.

Inserindo-se MFSs de tensão, nota-se que o desempenho da estimação de estado e de fluxo é amplamente beneficiado ao se utilizar ponderação constante para as medidas. As métricas avaliadoras da precisão dos estados estimados (Desvio e $Macc_V$) descrecem até atingirem valores próximos às precisões dos estados estimados utilizando ponderação associada à medida e em função do fundo de escala, que por sua vez foram pouco afetadas pela adição de MFSs de tensão.

Para o fluxo estimado, notou-se uma contribuição positiva na adição de MFSs de tensão para os três casos de ponderação. É perceptível pelo gráfico que o maior efeito foi causado ao se utilizar ponderação constante, reduzindo mais que 50% do valor do valor da métrica de fluxo obtida no estimador convencional. Este valor, entretanto, ainda continuou maior que os valores da métrica de fluxo obtidos utilizando os outros dois tipos de ponderação, que diminuíram aproximadamente 30%.

7.2.5 Simulações com MFSs de Corrente

Nesta seção, analisou-se separadamente as medidas as MFSs de corrente. Conforme já mencionado, as simulações com as MFSs de corrente não exibiram resultados satisfatórios, e em todos os casos acarretaram em um pior desempenho para a estimação de estado. Só foi documentada a ponderação de valor constante, pois comportamento similar foi verificado utilizando outras ponderações.

Nas figuras , estão a relação entre as métricas de desempenho considerando um acréscimo gradual de quatro MFSs de corrente.

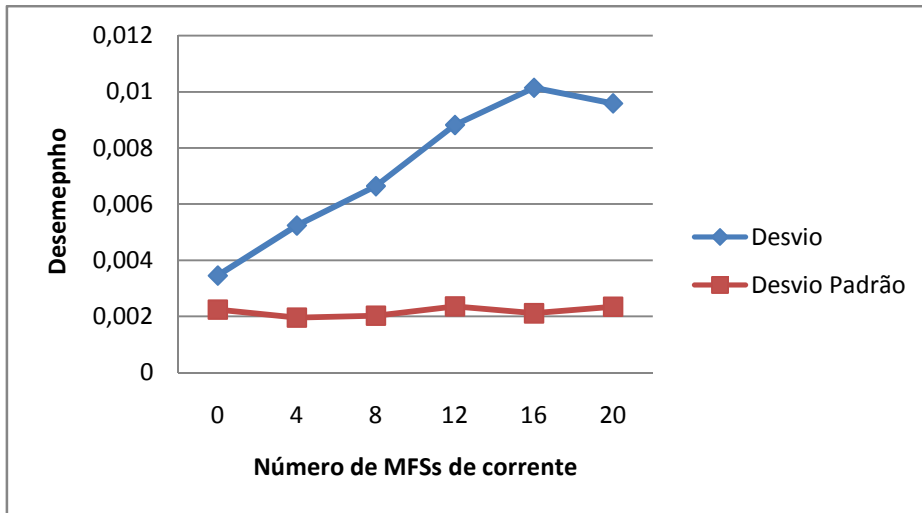


Figura 7.22 - Desvio em função de MFSs de corrente – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

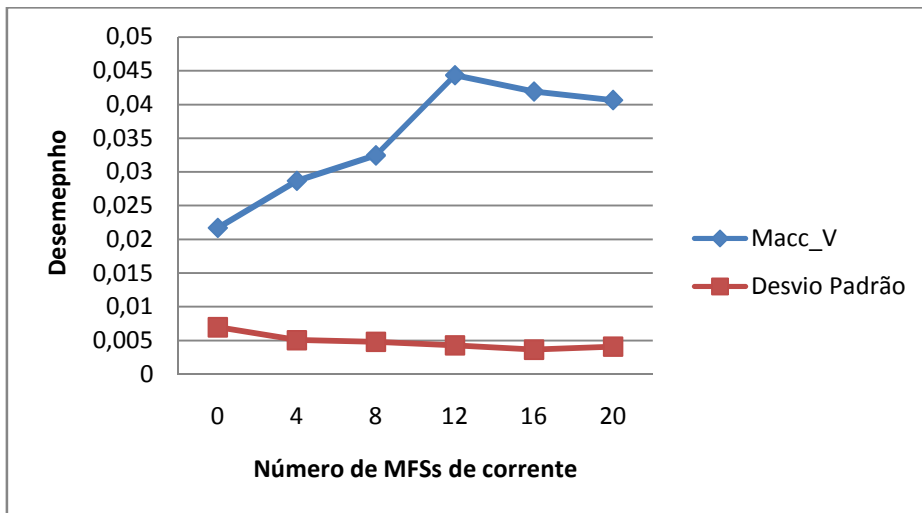


Figura 7.23 – Macc_V em função de MFSs de corrente – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

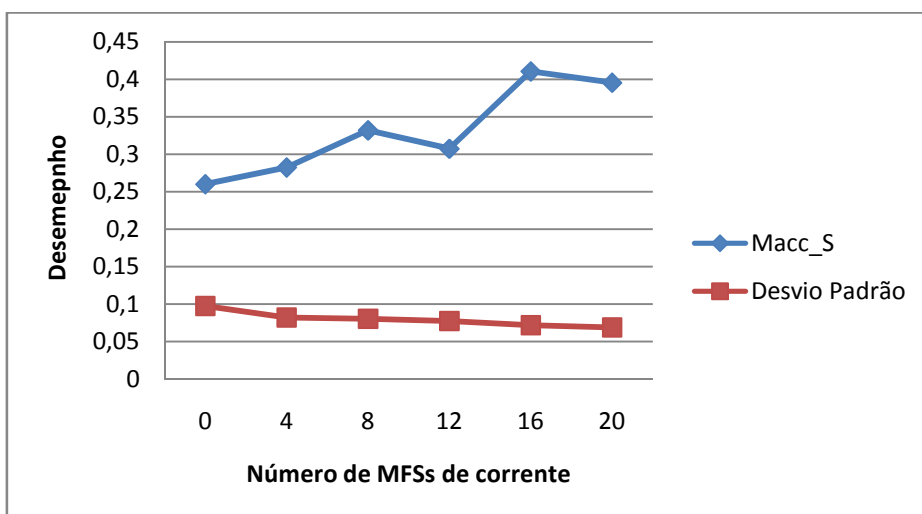


Figura 7.24 – Macc_S em função de MFSs de corrente – IEEE14 – Desvio-Padrão Constante

Nos três resultados obtidos, é nítida a queda no desempenho do estimador ao se acrescentar MFSs de corrente. Para os sistemas de ponderação associado à medida e em função de fundo de escala houve um comportamento similar das MFSs.

Os motivos disto podem ser vários e exigem maiores estudos para um mapeamento melhor do problema. Dentre esses motivos, pode-se destacar: falha do algoritmo implementado, formulação errônea ou má escolha das ponderações. Vale destacar que em (Massignan, 2011) foi demonstrado, também através de simulações computacionais, que a inserção de MFSs de ângulo de fase de corrente prejudica o desempenho de outro estimador de estado híbrido, o estimador proposto por (Zhu & Abur, 2007).

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos após a primeira fase (ou seja, através da estimação de estados convencional) e a segunda fase do estimador proposto por Zhou et al (2006) em uma das amostras de medidas geradas. Há 20 MFSs de corrente e nenhuma MFSs de tensão neste plano de medição

Os resultados obtidos na segunda fase não são extremamente divergentes, em algumas barras foram mais próximos ao estado verdadeiro do que o estado estimado pelas medidas convencionais. Entretanto, no geral, houve um distanciamento em relação aos valores de estado “verdadeiros”, o que explica o aumento considerável de todas as métricas de desempenho avaliadas.

Barra	Tensão Real	Tensão 1° Fase	Tensão 2° Fase
<i>Barra 1</i>	1.05997	1.05661	1.05661
<i>Barra 2</i>	1.04502	1.04230	1.04229
<i>Barra 3</i>	1.00996	1.00913	1.00913
<i>Barra 4</i>	1.01765	1.01585	1.01588
<i>Barra 5</i>	1.01947	1.01668	1.01888
<i>Barra 6</i>	1.07020	1.06927	1.06854
<i>Barra 7</i>	1.06173	1.06211	1.05751
<i>Barra 8</i>	1.08546	1.08831	1.07466
<i>Barra 9</i>	1.05599	1.05606	1.05860
<i>Barra 10</i>	1.05111	1.05195	1.05503
<i>Barra 11</i>	1.05711	1.05844	1.05194
<i>Barra 12</i>	1.05567	1.05060	1.05453
<i>Barra 13</i>	1.05061	1.05062	1.04999
<i>Barra 14</i>	1.03595	1.03910	1.04236

Tabela 7.5– Resultados de tensão adicionando MFSs de corrente

Barra	Ângulo Real	Ângulo 1° Fase	Ângulo 2° Fase
<i>Barra 1</i>	0.000	0.000	0.000
<i>Barra 2</i>	-4.985	-5.000	-5.000
<i>Barra 3</i>	-12.781	-12.726	-12.726
<i>Barra 4</i>	-10.420	-10.370	-10.375
<i>Barra 5</i>	-8.774	-8.877	-8.707
<i>Barra 6</i>	-14.220	-14.284	-14.487
<i>Barra 7</i>	-13.469	-13.361	-13.223
<i>Barra 8</i>	-15.411	-15.455	-15.374
<i>Barra 9</i>	-14.947	-15.020	-14.734
<i>Barra 10</i>	-15.105	-15.203	-14.934
<i>Barra 11</i>	-14.793	-14.963	-15.215
<i>Barra 12</i>	-15.078	-15.091	-15.282
<i>Barra 13</i>	-15.150	-15.230	-15.355
<i>Barra 14</i>	-16.019	-15.806	-16.201

Tabela 7.6– Resultados de ângulo adicionando MFSs de corrente

7.2.6 Efeito da Precisão das Medidas Fasoriais

Para esta análise, foram realizadas simulações considerando diferentes desvios-padrão para as MFSs de magnitude e ângulo de tensão. Como estes dois tipos de medidas devem obrigatoriamente ser utilizadas em conjunto no estimador proposto por Zhou et al (2006), analisou-se separadamente a variação dos desvios-padrão de cada uma, para ser possível observar em que pontos estas possuem mais influência.

Para os testes, foi considerada a mesma topologia do sistema IEEE14 utilizada nos testes anteriores. Inclui-se MFSs de tensão em todas as barras e nenhuma de corrente. Foi utilizada a ponderação de valor constante, de tal maneira que o somente os desvios-padrão das MFSs foram alterados. Também comparou-se com o desempenho obtido ao se utilizar somente medidas convencionais, isto é, sem ambas as MFSs de magnitude e ângulo de tensão.

As figuras 7.25 , 7.26 e 7.27 apresentam o desempenho do estimador ao se alterar os desvios-padrão das MFSs de magnitude de tensão em relação às métricas de desvio, tensão e fluxo, respectivamente. Para cada caso, foram realizados novamente 100

diferentes casos de simulações, possibilitando inferir-se estaticamente sobre a influência.

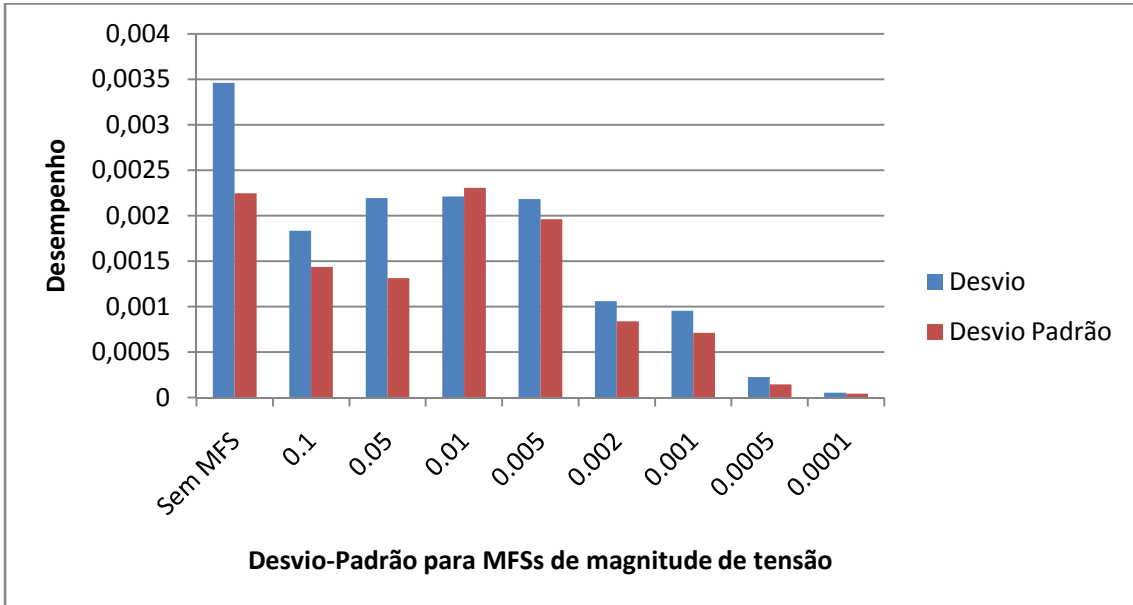


Figura 7.25 – Desvio em função da precisão da MFSs de magnitude de tensão

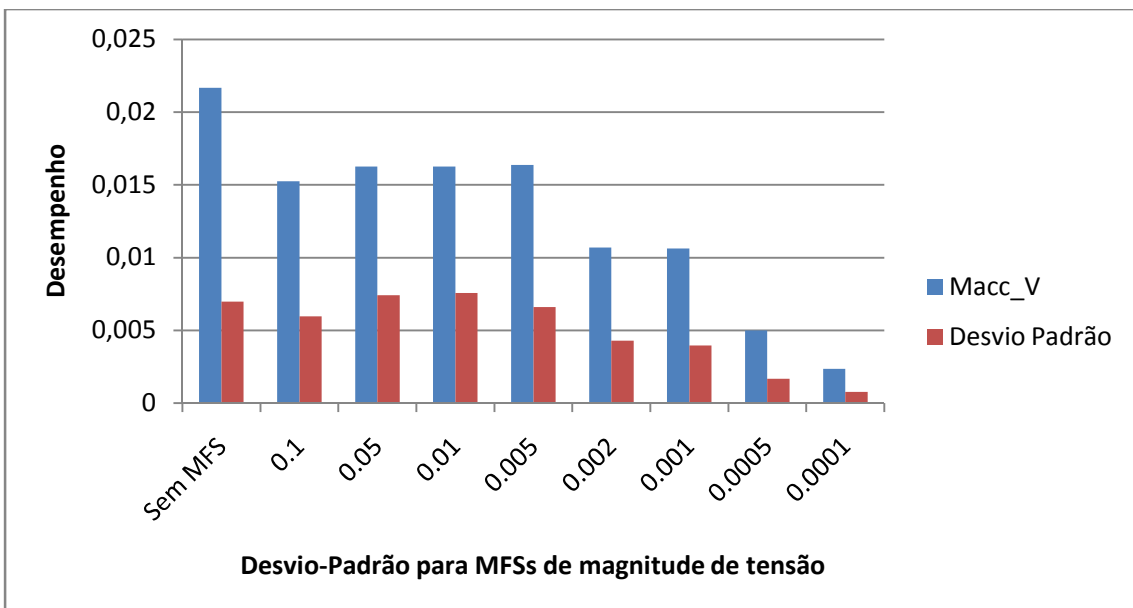


Figura 7.26 – Macc_V em função da precisão da MFSs de magnitude de tensão

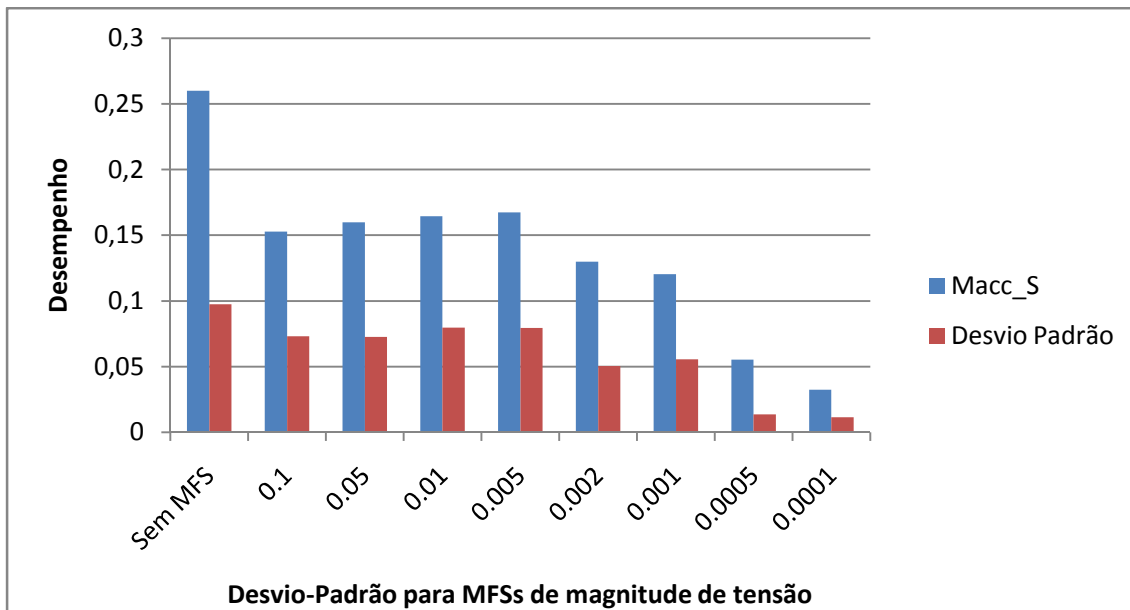


Figura 7.27 – Macc_S em função da precisão da MFSs de magnitude de tensão

A influência das MFSs de magnitude de tensão sobre o desempenho da estimação de estado são facilmente vistas, diminuindo gradativamente ao aumentar a precisão. Não foi encontrado limites para a melhoria causada no desempenho do estimador pela precisão das MFSs de magnitude de tensão. Apesar de as MFSs de magnitude de tensão serem obtidas pelos mesmos instrumentos responsáveis pela medição convencional de magnitude de tensão, vale ressaltar que alguns estudos consideram a MFSs de magnitude de tensão mais precisa, o que não foi considerado nos sistemas de ponderações utilizados. Caso isso seja comprovado, melhores resultados poderão provir do estimador proposto por Zhou et al(2006), que mostrou-se sensível às variações da precisão das MFSs de magnitude de tensão.

Nos testes seguintes, variou-se o desvio padrão das MFSs de ângulo de tensão. Manteve-se o mesmo quadro de medidas e sistema de ponderação utilizada anteriormente, mantendo as MFSs de magnitude de tensão em seus valores fixos (0.002).

As figuras 7.28 , 7.29 e 7.30 apresentam o desempenho do estimador ao se alterar os desvios-padrão das MFSs de ângulo de tensão em relação às métricas de desvio, tensão e fluxo, respectivamente.

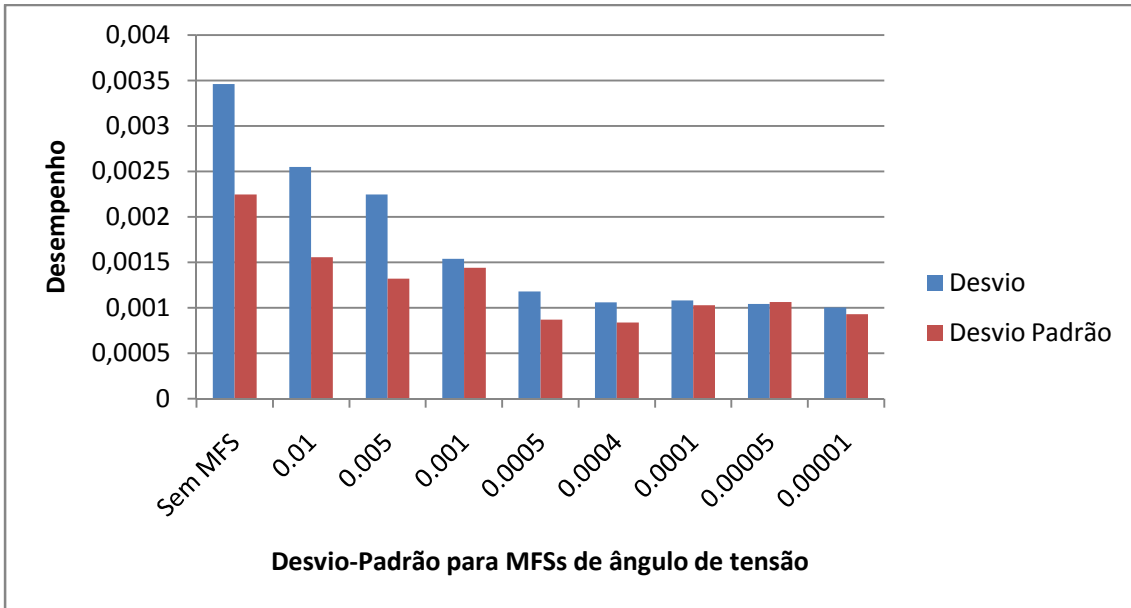


Figura 7.28 – Desvio em função da precisão da MFSs de ângulo de tensão

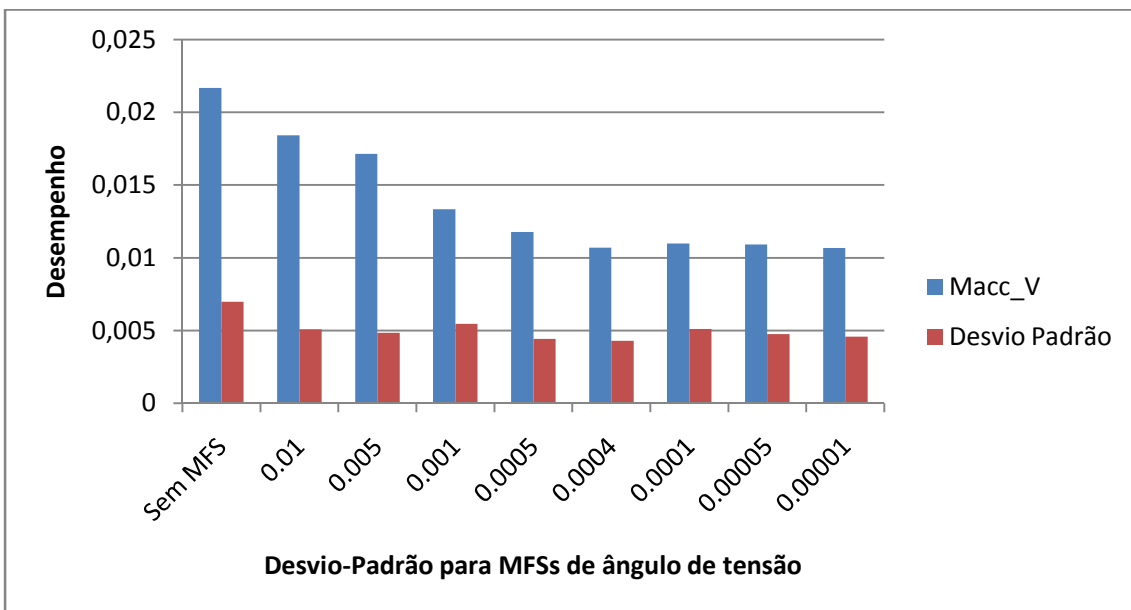


Figura 7.29 – Desvio em função da precisão da MFSs de ângulo de tensão

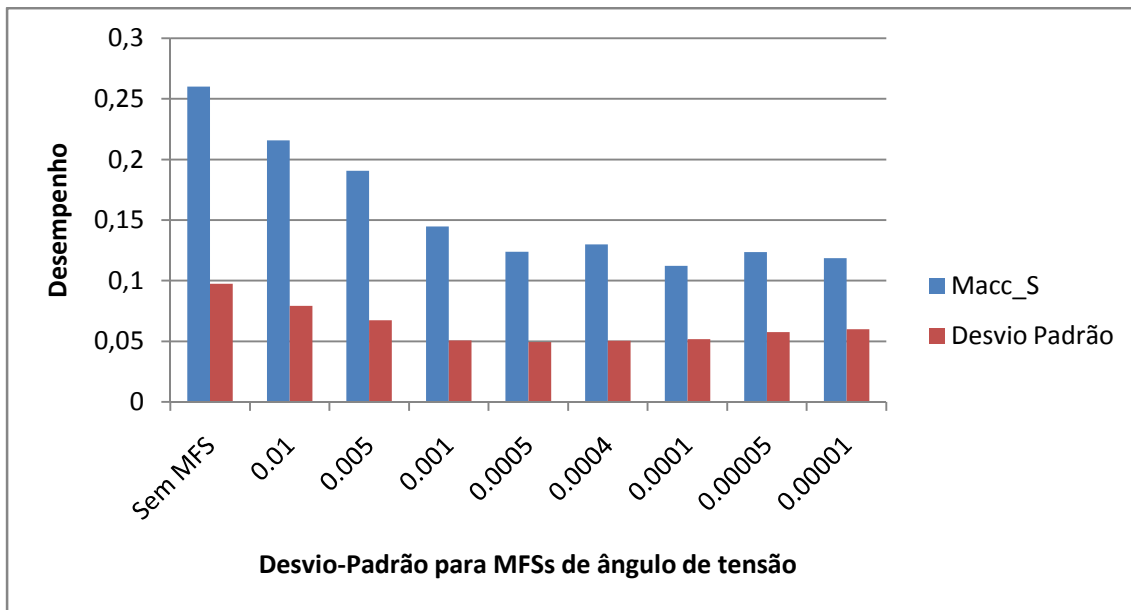


Figura 7.30 – Desvio em função da precisão da MFSs de ângulo de tensão

Desta vez, não houve uma melhoria contínua do desempenho do estimador. Após a o desvio-padrão de 0.0005 para as MFSs de ângulo de tensão, as métricas estabilizam-se. Um fato interessante, pois a precisão da medida angular está diretamente ligada à precisão temporal da tecnologia PMU, indicando que não há necessidade para precisões temporais muito elevadas.

8. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho consistiu em verificar se realmente é vantajoso incluir MFSs no processo de estimação de estado. Conforme anteriormente mencionado, vários estimadores híbridos já foram propostos na literatura especializada. Dentre esses, utilizou-se, neste trabalho, o estimador proposto por Zhou et al(2006).

O estimador proposto por Zhou et al (2006) foi escolhido em razão de o mesmo tratar as MFSs e as medidas convencionais de forma separada, diminuindo a possibilidade de problemas numéricos apresentados nos estimadores híbridos que tratam ambas as medidas de uma só vez.

Para desenvolvimento deste trabalho os seguintes estudos foram realizados:

1. Estudo do Sistema de Medição Sincronizada de Fasores. Esses estudos possibilitaram entender o funcionamento da tecnologia PMU e da aquisição das medidas fasoriais sincronizadas e sua diferença em relação às medidas convencionais.
2. Estudo do estimador de estado convencional. Analisou-se desde a modelagem matemática de um SEP até ao tratamento matemático do estimador de estado por mínimos quadrados ponderados. O entendimento do processo convencional e sua implementação foram necessárias para desenvolvimento deste trabalho.
3. Estudo do estimador proposto por Zhou et al(2006). Nesse estudo foi introduzido o modelo de estimador de estado híbrido proposto por Zhou et al(2006). Foram encontrados e contornados alguns problemas que não são mencionados no artigo de Zhou et al(2006), como o da matriz ganho necessária para formar a matriz covariância das variáveis de estado estimadas na primeira fase e do tratamento da referência angular.
4. Estudo das ponderações e gerações de medidas. Conforme foi visto, as ponderações causam um grande efeito na estimação de estado.
5. Estudo das métricas de desempenho. Foram escolhidas três métricas de desempenho: desvio, de fluxo e de tensão. Através destas métricas foi possível analisar o efeito da inclusão de MFSs na estimação de estado.
6. Por fim, programou-se o estimador proposto por Zhou et al(2006) e os procedimentos posteriormente estudados em C++.

Interessante destacar que, em outro estudo, realizado no Trabalho de Conclusão de Curso do engenheiro Julio Massignan (Massignan, 2011), foi analisado o estimador de estado híbrido proposto por Zhu & Abur (2007). Neste estimador, as MFSs são incluídas na etapa única do estimador de estado convencional. Analisando o trabalho do Julio e os resultados deste trabalho, é possível realizar uma comparação entre os dois diferentes estimadores híbridos.

O resultado de diversas simulações computacionais, algumas das quais apresentados na seção anterior, demonstrou que:

- No geral, as MFSs de tensão melhoram o desempenho da estimação de estado híbrida;

- Apesar das MFSs de corrente não conduzirem à estimativas absurdas, sua inclusão traz efeitos negativos para o desempenho da estimação de estado. Vale ressaltar, que em (Massignan, 2011) também houve problemas na inclusão das MFSs de ângulo de corrente, o que indica que talvez uma formulação diferente seja necessária para o tratamento das MFS de corrente.

Nas simulações realizadas utilizaram-se três maneiras distintas para cálculo do desvio padrão das medidas, todas estas já utilizadas em trabalhos da área. Para cada uma delas, observou-se que:

- **Ponderação de valor constante:** Foi a menos eficiente para estimação de estado convencional. Entretanto, com a inclusão de MFSs de tensão, houve uma grande melhoria do desempenho para a estimação das variáveis de estado e dos fluxos de potência.

- **Ponderação associada à medida:** Mostrou-se a mais eficiente para a estimação convencional. Inclusão de MFSs não demonstrou benefícios consideráveis para a precisão dos estados estimados, apesar de ter influenciado significativamente na precisão dos fluxos estimados.

- **Ponderação em função de fundo de escala:** Um pouco menos precisa que a ponderação anterior para estimação de estados convencionais. Os efeitos das MFSs para este tipo de ponderação foram idênticos aos detectados na ponderação associada à medida.

Essa pequena alteração do desempenho da estimação de estado utilizando as ponderações mais eficientes para o estimador convencional pode ser um sinal de que o estimador proposto por Zhou et al(2006) não seja tão eficaz quanto esperado.

Referências Bibliográficas

- ABUR, A. & EXPÓSITO, A.G. (2004).** “Power system state estimation: theory and implementation”. Marcel & Dekker Publishers, Nova York, EUA.
- BENEDITO, R. A. S. (2007),** “Avaliação da qualidade e redundância das medidas para estimação de estado em sistemas elétricos de potência”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, USP.
- CASTILLO-ALBERTINI, M. R. M. (2010).** Metodologia para Depuração off-line de Parâmetros Série e Shunt de Linhas de Transmissão Através de Diversas Amostras de Medidas. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Brasil.
- CEASE, T. W.; Feldhaus, B. (1999).** Real-time monitoring of the TVA power system. IEEE Comput. Appl. Power, vol. 7, no. 3, pp. 47–51, Jul. 1999.
- COSTA, A.S.; MEYER, B.T.; DECKER, I. (2008)** Análise dos benefícios de medições fasoriais sincronizadas quanto ao desempenho da estimação de estados em sistemas de potência. *XVII Brazilian Conference on Automatic Control*. Juiz de Fora, MG.
- EHRENSPERGER, J.G. (2004).** “Sistemas de medição fasorial sincronizada: análise do estado da arte e aplicações no monitoramento de sistemas de energia elétrica”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica, Santa Catarina – Florianópolis – Brasil.
- IEEE 1344-1995 - Standard for Synchrophasors for Power Systems**
- LEITES, E.C.; COSTA, A.S. (2010)** Um estimador de estados ortogonal com capacidade para processar medidas fasoriais de tensão e corrente. *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Belém, PA
- LONDON JR., J. B. A.; PIERETI, S.A.R.; BENEDITO, R.A.S. AND BRETAS, N.G. (2009).** “Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements”, IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 3, pp. 1629–1630, August.
- MASSIGNAN, J. A. D. (2011).** Análise do desempenho do estimador de estado híbrido, por mínimos quadrados ponderados, que faz uso de medidas convencionais e medidas fasoriais sincronizadas. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), Brasil.

- MORAES, R. M. (2009).** Sincrofasores em Sistemas de Potência: Aplicações na Estimacão de EStado. Tese de Doutorado, Pós-Graduaçãõ em Computaçãõ, Instituto de Computaçãõ, Universidade Federal Fluminense, Brasil.
- MONTICELLI, A. J. (1983).** “Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica”, São Paulo - Brasil: Edgard Blucher.
- PHADKE, A.G. (2002).** Synchronized phasor measurements—a historical overview. in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Asia Pacific Transmission Distribution Conf. Exhib., Oct. 6–10, 2002, vol. 1, pp. 476–479.
- PHADKE, A.G.; THORP, J.S.;KARIMI, K.J. (1986).** State estimation with phasor measurements. IEEE Trans. Power Syst., vol. 1, no. 1, pp.233-240, fevereiro.
- PRESS, W.H.; et al (2002) .** *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing.* Cambridge : Cambridge University Press.
- SIMÕES-COSTA, A.; MEYER, B. T. & DECKER, C. (2008).** Análise dos benefícios de medições fasoriais sincronizadas quanto ao desempenho da estimacão de estados em sistemas de potências. In: XVII Congresso Brasileiro de Automática, Juiz de Fora - MG, 2008 (CD, artigo número 40817).
- THORP, J.S.; PHADKE, A.G.; KARIMI, K.J. (1985).** Real time voltage-phasor measurements for static state estimation. IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, no. 11, pp. 3098–3104, Novembro.
- ZHOU, M; CENTENO, V.A.; THORP, J.S.; PHADKE, A.G. (2006).** “An Alternative for Including Phasor Measurements in State Estimators”. IEEE Transactions on Power Systems,. Vol. 21, N°4, p. 1930-1937, novembro.
- ZHU, J. & ABUR, A. (2007).** Effect of Phasor Measurements on the Choice of Reference Bus for State Estimation. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting 2007.