UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ – UFPR

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANDRESSA BASSETTI DOS SANTOS

ESTIMADOR DE ESTADOS LINEAR COM MEDIÇÕES PROVENINENTES DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

CURITIBA

2019

ANDRESSA BASSETTI DOS SANTOS

ESTIMADOR DE ESTADOS LINEAR COM MEDIÇÕES PROVENINENTES DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação de Engenharia Elétrica, Área de Eletrotécnica, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dra. Elizete Maria Lourenço

CURITIBA

2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ariclé Bassetti dos Santos e Gilberto Tiago dos Santos, e a minha irmã, Laressa Bassetti dos Santos, que sempre apoiaram meus estudos, proporcionaram amor e carinho e me deram as forças necessárias para seguir em frente.

À minha tia, Neuza Bassetti, que dedicou grande parte de sua vida cuidando de mim desde a educação infantil até o ensino médio.

À minha avó, Nercy Aparecida dos Santos, que sempre realizou orações e torceu para o meu sucesso.

Aos meus amigos, que estiveram vibrando comigo nos momentos de alegria e me consolando nos momentos de dificuldade. Sem eles, todo o período da faculdade teria sido mais difícil. Agradeço principalmente ao Caio Gonçalves Natalino, que se tornou um grande amigo ao longo destes 5 anos, sempre me escutando e me aconselhando.

À prof. Dra. Elizete Maria Lourenço, pela sua dedicação, atenção e contribuições prestadas durante a execução deste trabalho. Principalmente por sua empatia demonstrada aos alunos ao longo destes anos.

Aos meus colegas que tive a oportunidade de conhecer durante meu período de estágio, Gilmar Francisco Krefta e Carlos Eduardo Monteiro Fernandes, que me incentivaram e forneceram os recursos necessários para a realização deste trabalho.

Agradecimento a Deus, que iluminou todo meu caminho para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

RESUMO

Com o passar dos anos, o sistema de potência se torna cada vez maior e mais complexo, sendo necessária a utilização de ferramentas para promover o controle e monitoramento desses sistemas. Dentro desse cenário, a estimação de estados (EE) é fundamental para manter o sistema operando em condições seguras. Essa ferramenta estima o estado em que o sistema se encontra e essas informações são enviadas aos operadores do sistema para auxiliá-los em suas tomadas de decisões. A nova tecnologia do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) surgiu no mercado para melhorar o processo de estimação de estados. As Unidades de Medição Fasorial (UMF) utiliza o *Global Positioning System* (GPS), que proporciona medições fasoriais sincronizadas e, como resultado, as equações do estimador de estado se tornam lineares. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo para o estimador de estados linear utilizando medições fasoriais de UMF. Ao final, foram efetuadas simulações para validar o processo de estimação de estado proposto e avaliar a observabilidade do sistema. Além disso, foram incluídos erros aleatórios nas medidas e outras grandezas elétricas foram calculadas utilizando os sistemas de teste da região do litoral do Paraná e do IEEE 30 barras.

Palavras-chaves: estimador de estados linear, Unidades de Medição Fasorial, medições fasoriais.

ABSTRACT

The growing size and complexity of the power system in recent years has required the use of tools to promote solutions for monitoring and controlling these systems. In this scenario, state estimation (SE) is essential to keep the system running in safety conditions. This tool estimates the electrical state of a power grid and this information is sent to system operators to help them make decisions. New synchronous phasor measurement technology has emerged to improve the state estimation process. The Phase Measurement Unit (PMU) uses the Global Positioning System (GPS) to provide synchronized phasor measurements. As a result, the SE equations became linear. This paper presents the development of a linear state estimation algorithm using PMU phasor measurements. In the end, simulations were made to validate the proposed state estimation process and to analyze the system observability. Besides, random errors were included in the measurements and other electrical quantities were calculated using the IEEE 30 bus test system and a 10 bus test system of the Paranaense coast.

Keywords: Linear State Estimation, Phasor Measurement Unit, phasor measurement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Aquisição de medidas no Sistema de Potência	. 11
Figura 2 – Representação gráfica do fasor	. 15
Figura 3– Convenção da referência de ângulo dos sincrofasores	. 16
Figura 4- Arquitetura do UMFS	. 17
Figura 5– Estrutura básica da UMF	. 18
Figura 6– Referência de tempo comum para a sincronização dos fasores	. 19
Figura 7- Modelo π da linha de transmissão	. 27
Figura 8 – Fluxograma funcional do processo de EEL	. 33
Figura 9– Sistema de teste da região do litoral do Paraná – 10 barras	. 35
Figura 10- Gráfico dos resíduos das medidas do sistema de teste litoral	do
Paraná - Módulo	. 42
Figura 11- Gráfico dos resíduos das medidas do sistema de teste litoral	do
Paraná – Ângulo	. 42
Figura 12– Resíduos do fluxo de potência ativa e reativas nas linhas	. 46
Figura 13– Diagrama unifilar IEE 30 barras	. 46
Figura 14 - Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 1 e caso	2 –
Módulo	. 51
Figura 15- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 1 e caso	2 -
Ângulo	. 52
Figura 16- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 3 e caso	4 –
Módulo	. 54
Figura 17- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 3 e caso	4 —
Ângulo	. 54
Figura 18– Resíduos do fluxo de potência ativa e reativas nas linhas	. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre tecnologia SCADA x UMF 12
Tabela 2– Dados de linha do sistema da região do litoral do Paraná
Tabela 3- Variáveis de estados para o Caso 1 e Caso 2 - Sistema de teste
litoral do Paraná
Tabela 4 - Variáveis de estados para o Caso 3 e Caso 4 - Sistema de teste
litoral do Paraná
Tabela 5– Valores das medidas estimadas para o caso 3 e caso 4 40
Tabela 6- Resíduos das medidas para o caso 1, caso 3 e caso 4 41
Tabela 7- Resultados do fluxo de potência real e estimado - Sistema de teste
litoral do Paraná
Tabela 8- Resultados das perdas reais e estimadas - Sistema de teste litoral
do Paraná
Tabela 9 – Dados de linha do sistema de teste IEE 30 barras 47
Tabela 10 – Variáveis de estados estimados para o caso 1 e caso 2 49
Tabela 11- Variáveis de estados estimados para o caso 3 e caso 4 53
Tabela 12- Resultados do fluxo de potência real e estimado 55
Tabela 13 – Resultados das perdas reais e estimadas

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DFT	Discret Fourier Transformation
EEL	Estimador de Estado Linear
EMS	Energy Management System
GPS	Global Positioning System
IED	Dispositivos Eletrônicos Inteligentes
PDC	Phasor Data Concetrator
PMU	Phasor Measurement Unit
SCADA	Sistema Supervisório de Controle e de Aquisição de Dados
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SMFS	Sistema de Medição Fasorial Sincronizada
UMF	Unidade de Medição Fasorial
WLS	Weighted Least Squares
тс	Transformadores de Corrente
ТР	Transformadores de Potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 SINCROFASORES	14
2.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA	17
2.2.1 Unidades de Medição Fasorial	18
2.2.2 Concentrador de Dados Fasoriais	19
2.3 ESTIMADOR DE ESTADOS	20
2.3.1 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDER (W <i>EIGHTED LEAST</i> SQ <i>UARES</i> - WLS)	ADOS 20
2.3.2 Observabilidade	26
2.3.3 Modelo equivalente π da linha de transmissão	27
3 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO ESTIMADOR ESTADOS LINEAR	R DE
4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	34
4.1 SISTEMA DA REGIÃO DO LITORAL DO PARANÁ – 10 BARRAS	34
4.2 SISTEMA DE TESTE IEEE 30 BARRAS	46
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
5 CONCLUSÃO	60
6 REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica acompanha a expansão de indústrias, os investimentos em infraestrutura, as mudanças políticas, o crescimento econômico e da população mundial. Para atender a todo esse consumo, os governos e empresas investem na expansão do Sistema Elétrico de Potência (SEP), construindo novas subestações, usinas, linhas de transmissão, diversificando a matriz elétrica e utilizando fontes de geração distribuída.

Para monitorar as interconexões desses sistemas e garantir a segurança, qualidade e confiabilidade da rede é necessário que existam mecanismos que possam auxiliar nesse controle. Acompanhando o crescimento da demanda de energia elétrica, a evolução da tecnologia dos equipamentos de proteção também se fez necessária. Os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) são equipamentos que possuem aplicações variadas, possibilitando a proteção, controle, automação, medição e monitoramento do sistema (SCHWEITZER, 2010). As informações adquiridas por esses dispositivos são transmitidas para o Energy Management System (EMS) através de uma rede de comunicação. Uma das funcionalidades desse sistema é a estimação de estado, que consiste em estimar o estado que o sistema elétrico se encontra em tempo real a partir das medidas de campo coletadas pelos IEDs, disponibilizando esses dados por meio de uma interface amigável aos operadores do SEP, permitindo a análise de parâmetros como limites para o controle de tensão, carregamento de linhas e transformadores, fluxo de potência, contingências na rede e despacho econômico, auxiliando-os nas tomadas de decisões para assegurar o funcionamento do sistema.



Figura 1: Aquisição de medidas no Sistema de Potência

Fonte: adaptado de Abur e Exposito (2004)

Neste Trabalho de Conclusão de Curso será desenvolvido um Estimador de Estados Linear (EEL) com medições provenientes de Unidades de Medição Fasorial (UMF ou, em inglês, Phasor *Measurement Unit* – PMU), tendo como objetivo estimar os estados através de uma formulação linear, baseada exclusivamente nesse tipo de medida. O sistema de aquisição de dados tradicional consiste no Sistema Supervisório de Controle e de Aquisição de Dados (SCADA - Supervisory Control and Data Acquisition), que emprega um conjunto de telemedidas digitais e analógicas (LIRA, 2010) para determinar o módulo das grandezas elétricas convencionais (magnitude de tensão, corrente, injeções e fluxo de potência), sendo que a atualização dessas medidas ocorre em torno de 5 segundos. Já as Unidades de Medição Fasorial contam com o sistema de satélite *Global Positioning System* (GPS) que realiza o sincronismo das medidas, permitindo a obtenção das amplitudes e dos ângulos dos

sincrofasores de tensão e corrente localizados em pontos geográficos distantes (LEITES, 2010). A taxa de atualização das informações neste caso ocorre com a aquisição de 30 até 60 fasores por segundo (COELHO, 2012). Devido aos fasores possuírem a mesma estampa de tempo, a estimação de estado com dados provenientes de UMF se torna linear, não necessitando de um processo iterativo para a solução convergir (BOSE; YANG, 2009). Na tabela abaixo, é apresentada uma comparação entre as duas tecnologias.

	SCADA	UMF
Medidas	Injeção e fluxo de	Fasor de corrente e
	potência, magnitudes	tensão
	da tensão e corrente	
Estimador de estados	Não linear	Linear
Solução	Iterativa	Direta
Tempo de aquisição	Uma medição a cada 4-	30-60 medições por
	6 segundos	segundo
Sincronização	Não há	Sinal GPS

Tabela 1 – Comparação entre tecnologia SCADA x UMF

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é desenvolver um Estimador de Estado Linear com medições provenientes exclusivamente de Unidades de Medição Fasorial. Visto que essas informações já estão disponíveis nos IEDs, essas unidades farão a leitura desses dados que posteriormente serão aplicados no EEL, tendo como objetivo alcançar uma boa estimação do estado do sistema de potência.

1.1.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, tem-se:

- Aprendizado de conceitos relacionados à Estimação de Estados e Unidades de Medição Fasorial;
- Desenvolvimento do Estimador de Estados Linear utilizando o software Octave;
- Simulação do EEL a partir de um sistema de teste da região do litoral do Paraná com 10 barras e do sistema de teste IEEE 30 barras;
- 4. Análise e comparação dos resultados obtidos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste primeiro capítulo, foram apresentados a contextualização e os objetivos da execução deste trabalho. No capítulo 2, é realizado a fundamentação teórica, em que são descritos os conceitos essenciais para auxiliar na compreensão deste trabalho. Assuntos como estrutura do Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, além do detalhamento sobre o processo de estimação de estados foram abordados na seção. No capítulo 3 é apresentado a metodologia para o desenvolvimento do estimados de estados linear, em que é descrito em um fluxograma o passo a passo de como o algoritmo encontra a solução do problema da estimação de estados. No capítulo 4 são mostrados os resultados das simulações e suas devidas comparações, em que foram considerados cinco análises de casos. O caso 1 consiste na validação do modelo de estimação de estados. No caso 2, não foram inseridas UMF em todas as barras do sistema. No caso 3 foram inseridos erros aleatórios considerados normais e no caso 4 foram inseridos erros grosseiros às medidas. No caso 5 foram calculadas outras grandezas elétricas a partir das variáveis de estado encontradas. Por fim, no capítulo 5 foram expostos as conclusões e os possíveis temas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SINCROFASORES

Para realizar a análise de circuitos elétricos em corrente alternada, é comum a utilização de fasores para a representação de sinais senoidais de tensão e de corrente na frequência fundamental do sistema (ANDRADE, 2008).

Dada a seguinte senoide:

$$x(t) = Xm \cdot \cos(\omega t + \Phi)$$
(1)

Em que:

Xm: amplitude do sinal

 ω : frequência do sinal (rad/s)

 Φ : ângulo de fase (rad)

t: tempo (s)

Pela identidade de Euler:

$$e^{\pm j\Phi} = \cos(\Phi) \pm j \operatorname{sen}(\Phi)$$
(2)

Sabe-se que:

$$Xrms = \frac{Xm}{\sqrt{2}}$$
(3)

Reescrevendo a equação (1) da seguinte forma:

 $x(t) = \operatorname{Re}\{\operatorname{Xrms.} e^{j(\omega t + \Phi)}\}$ (4)

ou

$$\mathbf{x}(t) = \operatorname{Re}\left\{\operatorname{Xrms.} e^{(j\Phi)} e^{(j\omega t)}\right\}$$
(5)

Onde:

$$\mathbf{X} = \text{Xrms.} \, \mathrm{e}^{(\mathrm{j}\Phi)} \tag{6}$$

A equação (6) apresenta a senoide em sua representação fasorial expressa em termos do seu valor rms (Xrms) e de sua fase (Φ) (PHADKE e THORP, 2008; ALEXANDER e SADIKU, 2013). A figura 2 mostra as grandezas associadas a senoide e a representação gráfica no plano complexo do fasor.



Figura 2 - Representação gráfica do fasor

Fonte: adaptado de Phadke e Thorp (2008)

Os sincrofasores recebem essa denominação pois utilizam uma base de tempo única como referência para medição dos fasores de tensão e corrente, tornando-os sincronizados. Dessa forma, é possível saber a diferença angular entre pontos geograficamente afastados devido a sincronização (LEITES, 2010).

A norma IEEE C37.118.1/2011 estipula a definição de sincrofasor da seguinte forma:

O ângulo de fase (Φ) do sincrofasor relativo à função cossenoidal na frequência fundamental do sistema é sincronizada baseada no *Universal Time Coordinated* (UTC).

Em t = 0, o ângulo do sincrofasor (Φ) é igual a zero quando o máximo do sinal cossenoidal x(t) ocorrer na virada do segundo UTC (1 PPS – *Pulse Per Second*) e corresponde a -90 graus quando o cruzamento pelo zero positivo ocorrer na virada do segundo UTC, conforme equação (1).

Em outras palavras: quando acontecer a transição do nível lógico do sinal de 1 PPS fornecido a partir do relógio disponível em um receptor GPS (*GLOBAL POSITION SATELITE*) e no mesmo momento o sinal cossenoidal atingir seu valor máximo, convencionou-se pela norma que $\Phi=0^{\circ}$. Da mesma forma que, se um sinal senoidal cruzar o zero positivo no instante da passagem do nível lógico 0 para o nível lógico 1, $\Phi=-90^{\circ}$ (OLIVEIRA, 2012). As representações das convenções adotadas são apresentadas na figura 3.



Figura 3– Convenção da referência de ângulo dos sincrofasores

Fonte: adaptado de Oliveira (2012)

2.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) é composto pela Unidade de Medição Fasorial, pelo Concentrador de Dados Fasoriais (*Phasor Data Concetrator* - PDC), por canais de comunicação e conta com receptor GPS para a sincronização. A sua função é coletar os dados analógicos adquiridos em campo pelos equipamentos como Transformadores de Corrente (TC) e Transformadores de Potencial (TP), transformá-los em dados digitais e transmiti-los até os PDCs para que as informações cheguem até os Centros de Operação sendo possível desempenhar ações de monitoramento e de controle do sistema elétrico (LEITES, 2010). A arquitetura desse sistema é demonstrada na figura 4.





Fonte adaptado de LEITES (2010)

2.2.1 Unidades de Medição Fasorial

As Unidades de Medição Fasorial são constituídas basicamente por um sistema de aquisição de dados, sendo composto por um filtro anti-aliasing e um conversor A/D, além de um receptor de sinal GPS e um microprocessador (KREFTA, 2008). A figura 5 apresenta a estrutura básica de uma UMF.





Os sinais analógicos derivados dos TCs e TPs passarão por um filtro, que evita a ocorrência do fenômeno de *aliasing*: se a frequência do sinal amostrado não for duas vezes maior do que a frequência máxima do sinal a ser amostrado (também conhecida como frequência de Nyquest), ocorrerá uma sobreposição do espectro, impedindo que o sinal original seja recuperado (HIGUTI). Após esse processo, ocorre a conversão do sinal analógico em digital e é nessa etapa que as medidas recebem uma referência de tempo única gerada a partir do receptor GPS, permitindo a sincronização desse sinal (LIRA, 2010), conforme explicado no item 2.1. A figura 6 ilustra essa característica, sendo possível calcular a diferença angular entre os fasores de duas subestações localizadas distante uma da outra já que ambas possuem a mesma referência de tempo fornecida pelo GPS.

Fonte: Leites (2010)



Figura 6– Referência de tempo comum para a sincronização dos fasores

Fonte: adaptado de Ghosh, Kumar, Ghose, Mohanta (2014)

O microprocessador irá estimar os fasores de tensão e corrente utilizando como ferramenta a Transformada Discreta de Fourier (*Discret Fourier Transformation* – DFT), que extrai a componente fundamental do sinal. Além dessas grandezas, pode-se calcular a potência, frequência, taxa de variação de frequência (FONSECA, 2014). Por fim, as medições fasoriais são formatadas e enviadas ao Concentrador de Dados Fasoriais por meio dos canais de comunicação.

2.2.2 Concentrador de Dados Fasoriais

O Concentrador de Dados Fasoriais recebe os sincrofasores provenientes das diversas Unidades de Medição Fasorial. O volume de dados recebidos é intenso, assim as informações não chegam de forma ordenada ao PDC. Cabe ao Concentrador de Dados Fasoriais promover a correlação das estampas de tempo dos sincrofasores para garantir que eles estejam referenciados ao mesmo instante de tempo (LEITES, 2010). Outras funções exercidas são a de tratamento de erros de transmissão de dados,

armazenamento de dados para a realização de análises de contingência, perturbações pós-falta (KREFTA, 2008) e distribuição dessas informações obtidas para controle e monitoramento em tempo real do sistema elétrico.

2.3 ESTIMADOR DE ESTADOS

A função do estimador de estados é estipular o estado da rede a partir de um conjunto de dados medidos no sistema elétrico, entretanto qualquer recurso de medição possui erros envolvidos. Dessa forma, o processo de estimação de estados dispõe de medições redundantes e com erros associados, tendo como objetivo identificar e eliminar erros grosseiros para que as grandezas estimadas sejam confiáveis e representem de forma mais verdadeira o real estado que o sistema se encontra (MONTICELLI, 1983).

2.3.1 MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS PONDERADOS (WEIGHTED LEAST SQUARES - WLS)

2.3.1.1 Estimação de estados não-linear

Z

O modelo de medição utilizado no problema da estimação de estados é descrito da seguinte forma (MONTICELLI, 1999):

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \varepsilon$$
(7)
ou
$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_1 \\ \mathbf{z}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{z}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_1 (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \mathbf{h}_2 (x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ \mathbf{h}_m (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{bmatrix}$$

Em que:

z: vetor dos valores medidos (*mx1*);

h(x): vetor que associa as funções não-lineares ao vetor das variáveis de estado (*mx1*);

x: vetor de variáveis a serem estimadas (*nx1*);

ε: vetor associado aos erros das medições (*mx1*);

N: número de barras presentes no sistema de potência a ser analisado;

m: quantidade de medidas;

n: quantidade de variáveis de estado.

Como já citado, nenhum processo de medição é livre de erros. Os equipamentos que coletam as medidas que serão utilizadas no estimador de estados possuem imprecisões que estão atreladas a exatidão dos medidores e dispositivos (LEITES, 2010). Assim, o vetor ε apresenta média zero e tem seus elementos independentes entre si. A matriz **R** (dimensão *mxm*) representa a covariância das medidas do vetor de erros e traz em sua diagonal principal as variâncias (σ^2) dos erros medidos (COELHO, 2012).

O Método dos Mínimos Quadrados Ponderados consiste em minimizar a soma do quadrado dos resíduos das medidas ponderados pelo inverso da variância do equipamento de medição, em que o vetor de resíduos é dado por:

$$\mathbf{r} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}) \tag{8}$$

Minimizando a função objetivo, tem-se:

$$J(x) = \sum_{j=1}^{m} \frac{(zj - h_j(x))^2}{R_{jj}} = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)]$$
(9)

Na condição de mínimo, a equação (9) deverá satisfazer as condições de otimalidade de primeira ordem e pode ser escrita como (ABUR e EXPOSITO, 2004):

$$g(x) = \frac{\partial J(x)}{\partial x} = -H^{T}(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0$$
(10)

Onde:

$$H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \tag{11}$$

Realizando a expansão da série de Taylor da função não-linear (10) em torno do vetor de estado (x^k) e eliminando os termos de ordem superior pelo método de Gauss-Newton:

$$g(x) = g(x^k) + G(x^k)(x - x^k) + \dots = 0$$
(12)

$$x^{k+1} = x^k - [G(x^k)]^{-1} g(x^k)$$
(13)

Onde k indica o índice das interações do problema e x^k representa o vetor na interação k.

A matriz $G(x^k)$ é conhecida como matriz Ganho. Sendo que:

$$G(x^k) = \frac{\partial g(x^k)}{\partial x} \tag{14}$$

Substituindo (10) em (14):

$$G(x^k) = H^T(x^k). R^{-1}. H(x^k)$$
 (15)

Sabe-se que:

$$\Delta x^k = x^{k+1} - x^k \tag{16}$$

Substituindo (16) em (13), a equação encontrada é chamada de Equação Normal e tem a seguinte formulação:

$$[G(x^k)]\Delta x^k = H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)]$$
(17)

Reescrevendo a equação acima:

$$\Delta x^{k} = [G(x^{k})]^{-1} (H^{T}(x^{k})R^{-1}[z - h(x^{k})]$$
(18)

Para a resolução do algoritmo WLS, a iteração inicia com a estimativa inicial x^0 e a cada iteração é encontrado um novo valor para Δx^k . Para que esse processo iterativo se encerre, é necessário verificar a convergência do problema, que é dada por:

$$\max|\Delta x^k| \le \epsilon \tag{19}$$

Em que ϵ é limite de tolerância estipulado previamente.

Utilizando a abordagem linear para o problema de estimação de estados, o vetor **h(x)** passa a associar funções lineares $f_i = (x_1 x_2, ..., x_n)$ às variáveis de estado. Escrevendo as funções lineares na forma de vetor (KREFTA, 2008):

$$f_{i} = (x_{1} x_{2}, \dots, x_{n}) = f_{i}(X) = \begin{vmatrix} f_{1}(x) \\ f_{2}(x) \\ \vdots \\ f_{m}(x) \end{vmatrix} = \overline{H}x$$
(20)

Onde:

 $\overline{\overline{H}}$: matriz (mxn) que associa os coeficientes das funções lineares $f_i(x)$.

O mesmo processo de minimização ocorre para o problema linear:

min J(x) =
$$\sum_{i=1}^{m} \frac{(z_i - f_i(x_1, x_2, \dots, x_n))^2}{R_{ii}} = [z - f(x)]^T R^{-1} [z - f(x)]$$
 (21)

Substituindo (20) em (21):

$$\min J(x) = \{ z^T [R^{-1}] z - x^T \overline{[H]}]^T [R^{-1}] z - z^T [R^{-1}] \overline{\overline{H}} x + x^T \overline{[H]}]^T [R^{-1}] \overline{\overline{H}} x \}$$
(22)

Nas condições de mínimo, $\nabla J(x) = 0$. Assim:

$$\nabla J(\mathbf{x}) = -2\overline{[\mathbf{H}]}^T [R^{-1}]\mathbf{z} + 2\overline{[\mathbf{H}]}^T [R^{-1}]\overline{\mathbf{H}}\mathbf{x} = 0$$
(23)

Rearranjando a equação (23):

$$\overline{[\overline{H}]}^{T}[R^{-1}]\overline{\overline{H}}x = \overline{[\overline{H}]}^{T}[R^{-1}]z$$
(24)

Da mesma forma que a matriz Ganho foi definida, tem-se:

$$\overline{\boldsymbol{G}} = \overline{[\boldsymbol{H}]}^T [R^{-1}] \overline{\boldsymbol{H}}$$
(25)

Fazendo:

$$\boldsymbol{b} = \overline{[\boldsymbol{H}]}^T [R^{-1}] \boldsymbol{z}$$
(26)

A equação (24) pode ser escrita como:

$$\overline{\boldsymbol{G}}.\,\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{27}$$

$$\boldsymbol{x} = \overline{\boldsymbol{G}}^{-1}.\,\boldsymbol{b} \tag{28}$$

Na estimação de estados linear, o valor estimado das variáveis de estado é encontrado de forma direta, sem a necessidade de um processo iterativo. Com o vetor x, é possível encontrar o valores estimados das grandezas medidas, conforme equação (FONSECA, 2014):

$$z^{est} = \overline{H}.x \tag{29}$$

Para encontrar o vetor de resíduos das medidas, utiliza-se a equação abaixo, em que se pode analisar o desempenho do processo de estimação de estados.

$$r = z - \overline{H} \cdot x \tag{39}$$

Assim, dependendo do nível de erro presente na medida, a qualidade da estimação de estados do sistema pode ser prejudicada. Os erros de medições podem ser classificados nas seguintes classes: (ALBERTINI, 2010):

Erro extremo | valor da medição – valor verdadeiro da medida | > 20σ;

Erro grosseiro | valor da medição – valor verdadeiro da medida | = 3σ a
 20σ;

• Ruído normal | valor da medição – valor verdadeiro da medida | < 3σ.

σ: desvio padrão

2.3.2 Observabilidade

No contexto da estimação de estados, a observabilidade de Sistemas Elétricos de Potência tem como objetivo verificar se todas as variáveis de estados podem ser estimadas a partir do conjunto de medidas disponíveis para o processamento (FANTIN, 2012).

A análise de observabilidade é garantida no processo da estimação de estado quando a matriz Ganho (equação 25) é não singular, ou seja, admite inversa. Para isso, o posto da matriz Ganho deve ser igual ao número de variáveis de estados que se deseja estimar no sistema.

2.3.3 Modelo equivalente π da linha de transmissão

Considerando o modelo π da linha de transmissão abaixo:



Figura 7- Modelo π da linha de transmissão

Fonte: adaptado de Coelho (2012)

Em que:

 \dot{V}_k : fasor da tensão na barra k

 \dot{V}_m : fasor da tensão na barra m

$$y_{km} = g_{km} + jb_{km} \tag{30}$$

 y_{km} : admitância série do ramo

gkm: condutância série

bkm: susceptância série

E:

$$y_{km}^{sh} = jb_{km}^{sh}$$
(31)

 y_{km}^{sh} : admitância shunt

A corrente que flui nos ramos da linha de transmissão pode ser escrita por:

$$\dot{I}_{km} = y_{km} (\dot{V}_k - \dot{V}_m) + y_{km}^{sh} \dot{V}_k$$
(32)

$$\dot{I}_{mk} = y_{km} (\dot{V}_m - \dot{V}_k) + y_{km}^{sh} \dot{V}_m$$
(33)

Os fluxos de potência ativa e reativa nas linhas são dados por:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km})$$
(34)

$$P_{mk} = V_m^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) + V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km})$$
(35)

$$Q_{km} = -V_k^2(b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m bcos(\theta_{km}) - V_k V_m g_{km} sen(\theta_{km})$$
(36)

$$Q_{mk} = -V_m^2(b_{km} + b_{km}^{\rm sh}) + V_k V_m b\cos(\theta_{km}) + V_k V_m g_{km} sen(\theta_{km})$$
(37)

E as perdas podem ser obtidas por:

$$Perdas ativas = P_{km} + P_{mk}$$
(38)

Perdas reativas =
$$Q_{km} + Q_{mk}$$
 (39)

2.3.3.1 Estimador de estados linear com medições provenientes de Unidades de Medição Fasorial

As Unidades de Medição Fasorial possuem medidas sincronizadas e, devido a essa característica, o processo de estimação de estados é linear. A

$$z_{med} = \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_V \\ \varepsilon_I \end{bmatrix}$$
(40)

Onde:

 z_{med} : vetor das medições dos fasores de tensão e corrente;

V e I: vetores das medições dos fasores da tensão e corrente, respectivamente, provenientes das barras em que existe alocação de UMF;

 ε_V : erros associados às medições de tensão;

 ε_l : erros associados às medições de corrente.

Pelo modelo π da linha de transmissão, é possível representar o vetor da corrente da equação (32) de outra forma:

$$\mathbf{I} = [Y_{se}A^T + y_d] \times V \tag{41}$$

Em que:

 Y_{se} : matriz diagonal das admitâncias série dos ramos (medições de corrente x medições de corrente);

A^T: matriz incidência de medições de corrente (medições de corrente x variáveis de estado);

 y_d : matriz de todas as susceptâncias em derivação (medições de corrente x variáveis de estado);

V: vetor das tensões complexas das barras (variáveis de estado x 1).

Reescrevendo a equação (34) e sendo \overline{I} a matriz identidade:

$$z_{med} = \begin{bmatrix} \bar{I} \\ Y_{se}A^T + y_d \end{bmatrix} V + \begin{bmatrix} \varepsilon_V \\ \varepsilon_I \end{bmatrix}$$
(42)

A equação acima também pode ser reproduzida por:

$$z_{med} = B \times V + \varepsilon \tag{43}$$

Realizando a minimização conforme item 2.3.2.1, a solução do estimador de estados linear é:

$$V = \bar{G}^{-1} B^T R^{-1} z_{med} \tag{44}$$

Onde: $\bar{G} = B^T R^{-1} B$ (Matriz Ganho)

3 METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO ESTIMADOR DE ESTADOS LINEAR

Para a implementação computacional do Estimador de Estados Linear é necessário dividir o processo em duas etapas: a geração de medidas e a estimação de estados. As ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do código foram o Matpower, que consiste em um pacote gratuito de arquivos com extensão .m fornecido pelo programa MATLAB, que permite o cálculo do fluxo de potência na etapa de geração de medidas e o Octave, que é um software livre que possibilita o desenvolvimento de computação matemática e execução de scrips.

PRIMEIRA ETAPA: GERAÇÃO DE MEDIDAS

O objetivo desta etapa é a obtenção do vetor de medidas (z_{med}) para ser aplicado no Estimador de Estados Linear.

Passo 1: Entrada de dados de topologia da rede dos sistemas de teste;

Passo 2: Cálculo do fluxo de potência não linear realizado pelo Matpower e obtenção de grandezas como magnitude e ângulos das tensões, fluxo e injeção de potência ativa e reativa, perdas;

Passo 3: Cálculo dos fasores das correntes dos ramos utilizando a equação 32 e 33, a partir dos dados de linha e fasores de tensão conhecidos nos passos anteriores;

Passo 4: Obtenção do vetor z_{med} de medidas de fasores de tensão e corrente do sistema de teste.

SEGUNDA ETAPA: ESTIMAÇÃO DE ESTADOS LINEAR

O objetivo desta etapa é encontrar o vetor de variáveis de estados a serem estimadas. No problema, esse vetor corresponde ao fasor da tensão em todas as barras do sistema.

Passo 1: Inserção de erros aleatórios das medidas (Ligado/Desligado);

Passo 2: Cálculo da matriz de incidência de corrente (A^T) ;

Passo 3: Cálculo da matriz das susceptâncias em série (Y_{se});

Passo 4: Cálculo da matriz das susceptâncias em derivação (y_d) ;

Passo 5: Formação da matriz B conforme equação 42 e 43;

Passo 6: Cálculo da matriz Ganho (\overline{G});

Passo 7: Verificação da observabilidade do sistema através do cálculo do posto da matriz Ganho. Se sistema for observável, continuar algoritmo.

Passo 8: Solução do Estimador de Estados Linear: vetor dos fasores da tensão das barras (*V*) conforme equação 44;

Passo 9: Cálculo dos fluxos de potência, Injeções, correntes nos ramos a partir do vetor de variáveis de estados estimados;

Passo 10: Comparação de resultados com os valores obtidos na etapa de geração de medidas.



4 SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a execução do programa proposto na seção anterior, foram empregados um sistema de teste da região do litoral do estado do Paraná, que foi disponibilizado pela Copel, e um sistema de teste padrão do IEEE de 30 barras. Em ambos os casos foram contempladas as seguintes simulações:

Caso 1: Unidades de Medição Fasorial em todas as barras em que não foram adicionados erros aleatórios às medidas buscando a validação do modelo da Estimação de Estados Linear;

Caso 2: não foram inseridas Unidades de Medição Fasorial em todas as barras comprovando a observabilidade do sistema;

Caso 3: inserção de ruídos aleatórios normais às medidas verificando o comportamento do EEL;

Caso 4: inserção de erros grosseiros às medidas;

Caso 5: cálculo de outras grandezas do sistema a partir das variáveis de estado estimadas.

4.1 SISTEMA DA REGIÃO DO LITORAL DO PARANÁ - 10 BARRAS

O primeiro passo do algoritmo para encontrar a solução do EEL é a entrada de dados de topologia da rede no Matpower, porém os dados fornecidos pela Copel estão disponíveis no formato do ANAREDE (Análise de Redes Elétricas). A licença do programa é fornecida pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), porém o software é de uso comercial, tendo sua versão acadêmica com restrições no número de barras que podem ser inseridas no programa. Dessa forma, foi realizada uma conversão e adaptação dos dados fornecidos conforme apresentado em (FREITAS, 2013) já que nem todos os recursos presentes no ANAREDE estão disponíveis no Matpower.



Figura 9- Sistema de teste da região do litoral do Paraná - 10 barras

A entrada de dados do programa computacional para a análise de todos os casos se resume em:

• Dados de linha do sistema da região do Paraná - Tabela 2;

 Vetor com os fasores da tensão nas barras do sistema gerado pelo fluxo de potência no MatPower - Equação 45.

Com essas informações é possível calcular o vetor de medidas (z_{med}) e dar continuidade ao processo da Estimação de Estados Linear para cada cenário.

		Resistência	Reatância	Susceptância	Índice
De	Para	(pu)	(pu)	total da linha	lc
				(pu)	
1	2	0	0,0607	0	1
1	2	0	0,0591	0	1
1	10	0,0123	0,0616	0,1124	2
2	3	0,0515	0,1497	0,0407	1
2	9	0,0222	0,0679	0,0167	1
3	4	0,0028	0,0085	0,0026	1
3	8	0,0039	0,0113	0,0031	1
4	8	0,0049	0,0193	0,0069	2
5	8	0,0211	0,0616	0,0166	1
5	8	0,0208	0,0606	0,0166	1
6	7	0,0067	0,0234	0,0074	1
6	8	0,0312	0,0918	0,0252	1
7	8	0,0370	0,1107	0,0308	1
8	9	0,0257	0,0757	0,0201	2
8	10	0,0011	0,0640	0	1
8	10	0,0014	0,0654	0	2

Tabela 2- Dados de linha do sistema da região do litoral do Paraná

O índice Ic é a quantidade de medições de corrente da linha correspondente. Essa indicação é utilizada para demonstrar computacionalmente as possíveis variações de alocação de Unidades de Medições Fasoriais nas barras. Quando:

Ic=0 não há medidas de corrente na linha;

Ic=1 medidas de corrente no extremo de; Ic=2 medidas de corrente no extremo para; Ic=3 medidas em ambos extremos.

$$v = \begin{bmatrix} 1 \mid 0 \circ \\ 1,005 \mid -1,032 \circ \\ 1,015 \mid -2,871 \circ \\ 1,016 \mid -2,899 \circ \\ 1,016 \mid -2,935 \circ \\ 1,011 \mid -3,228 \circ \\ 1,011 \mid -3,241 \circ \\ 1,019 \mid -2,788 \circ \\ 1,010 \mid -2,025 \circ \\ 1,043 \mid -1,566 \circ \end{bmatrix}$$
(45)

Dessa forma, os resultados encontrados nas simulações para a Estimação de Estados Linear em cada caso correspondem a:

litoral do Falalia								
	Valores de	e tensão						
	VERDAD	EIROS	CA	SO 1	CAS	SO 2		
Barras	V(pu)	θ (°)	V(pu)	θ (°)	V(pu)	θ (°)		
1	1,000	0	1,00000	0,00000	1,00000	0,00000		
2	1,005	-1,0320	1,00500	-1,03199	1,00500	-0,03199		
3	1,015	-2,8710	1,01500	-2,87099	1,01500	-2,87099		
4	1,016	-2,8990	1,01600	-2,89899	1,01600	-2,89899		
5	1,016	-2,9350	1,01600	-2,93499	1,01600	-2,93499		
6	1,011	-3,2280	1,01100	-3,22799	1,01100	-3,22799		
7	1,011	-3,2410	1,01099	-3,24099	1,01100	-3,24099		
8	1,019	-2,7880	1,01900	-2,78799	1,01900	-2,78799		
9	1,010	-2,0250	1,01000	-2,02499	1,01000	-2,02499		
10	1,043	-1,5660	1,04300	-1,56599	1,04300	-1,56599		

Tabela 3– Variáveis de estados para o Caso 1 e Caso 2 – Sistema de teste litoral do Paraná

Os valores de tensão verdadeiros correspondem aos fasores da tensão obtido pelo fluxo de potência gerado no MatPower.

No caso 1 não foi adicionado erros aleatórios às medidas e é possível confirmar a modelagem do EEL já que o resultado do vetor de estados estimado é praticamente o mesmo do vetor de tensão de valores verdadeiros (Tabela 1). Pode-se notar essa exatidão no processo da estimação de estados pelos valores dos resíduos do módulo e ângulo das medições estarem na ordem de 10^{-12} e 10^{-9} respectivamente (Tabela 6). A diferença provavelmente se deve à quantidade de casas decimais utilizadas e pelas aproximações efetuadas pelo programa.

No caso 2, o critério adotado para a alocação das Unidades de Medição Fasorial foi a partir das medidas que garantiam a observabilidade da rede, porém não foram realizados estudos mais detalhados relacionados à alocação ótima dessas UMF. Assim, não foram inseridas UMF em todas as barras do sistema somente nas 1, 3, 5, 6, 8, 9 e 10. Pela tabela 1, pode-se reparar que resultado foi fiel ao caso 1, apontando que o conjunto de medidas escolhido foi suficiente para definir os estados do sistema pelo estimador de estados.

	Valores de	e tensão					
	VERDAD	EIROS	CASO 3		CAS	SO 4	
Barras	V (pu)	θ (°)	V (pu)	θ (°)	V (pu)	θ (°)	
1	1,000	0	0,99999	0,00255	0,94076	0,53163	
2	1,005	-1,0320	1,00400	-1,03378	0,94594	-0,91455	
3	1,015	-2,8710	1,01399	-2,87499	0,95502	-3,02481	
4	1,016	-2,8990	1,01499	-2,90255	0,9560	-3,05670	
5	1,016	-2,9350	1,015	-2,93787	0,95616	-3,15718	
6	1,011	-3,2280	1,00997	-3,23243	0,95086	-3,54962	
7	1,011	-3,2410	1,00997	-3,2453	0,9508	-3,56247	
8	1,019	-2,7880	1,01799	-2,79132	0,95886	-2,97666	
9	1,010	-2,0250	1,00898	-2,02835	0,94995	-2,16374	
10	1,043	-1,5660	1,0420	-1,56719	0,98251	-1,77138	

Tabela 4 – Variáveis de estados para o Caso 3 e Caso 4 – Sistema de teste litoral do Paraná

No caso 3, foram adicionados ruídos aleatórios considerados normais conforme definição do item 2.3.1.2, em que o | valor da medição – valor verdadeiro da medida | < 3σ. Os valores estimados não foram tão precisos iguais aos da simulação do caso 1, entretanto é possível observar que os valores não estão tão distantes dos verdadeiros (Tabela 4). Ocorreu uma leve alteração dos valores a partir da segunda ou terceira casa decimal.

No caso 4, foram inseridos erros grosseiros às medidas e foi verificado na tabela 4 que o processo de estimação de estados não proporcionou um comportamento tão satisfatório como no caso anterior.

Pelas tabelas 4,5,6 e pelos gráficos das figuras 10 e 11, foi realizada a comparação do desempenho entre o caso 3 e caso 4. É possível notar que os resíduos das medidas tanto do módulo quanto do ângulo para o caso 3 ficaram próximos de zero indicando um desempenho satisfatório. Para o caso 4, o resíduo do módulo das medidas apresentou valores mais altos. Já para o resíduo do ângulo do conjunto de medições se constatou que os desvios foram mais acentuados, principalmente nas medidas $i_{10,1}, i_{3,8}, i_{8,4}$ e $i_{6,7}$.

	Z		z ^{est}		z ^{est}	
	Medidas v	rerdadeiras	CAS	SO 3	CAS	SO 4
Medida	Módulo	Ângulo		Ângulo		Ângulo
	(pu)	(°)	Módulo (pu)	(°)	Módulo (pu)	(°)
ν,	1,00000	0,00000	0,99999	0,00255	0,94076	0,53163
	1,00500	-1,03200	1,00400	-1,03378	0,94594	-0,91455
\dot{V}_3	1,01500	-2,87100	1,01399	-2,87499	0,95502	-3,02481
\dot{V}_4	1,01600	-2,89900	1,01499	-2,90255	0,9560	-3,05670
\dot{V}_5	1,01600	-2,93500	1,015	-2,93787	0,95616	-3,15718
	1,01100	-3,22800	1,00997	-3,23243	0,95086	-3,54962
Ė√7	1,01100	-3,24100	1,00997	-3,2453	0,9508	-3,56247
V ₈	1,01900	-2,78800	1,01799	-2,79132	0,95886	-2,97666
	1,01000	-2,02500	1,00898	-2,02835	0,94995	-2,16374
<i>V</i> ₁₀	1,04300	-1,56600	1,0420	-1,56719	0,98251	-1,77138
İ _{1,2}	0,30867	14,96120	0,3096	14,92490	0,40144	12,0846
İ _{1,2}	0,31702	14,96120	0,31798	14,92490	0,41231	12,0846
İ _{10,1}	0,76165	65,93733	0,76205	65,90078	0,8585	56,0159
İ _{2,3}	0,22669	38,40252	0,22669	38,37328	0,23931	35,4435
İ _{2,9}	0,25898	34,10222	0,25902	34,02122	0,29857	28,8953
İ _{4,3}	0,12344	78,86692	0,12325	79,29621	0,1236	76,6658
İ _{3,8}	0,35781	-53,72846	0,35829	-53,61254	0,33013	-62,2881
İ _{8,4}	0,17792	-44,45536	0,17799	-44,43221	0,15626	-52,9861
İ _{5,8}	0,0657	-39,30742	0,06551	-39,36484	0,06577	-32,4631
İ _{5,8}	0,06668	-39,17914	0,06649	-39.23644	0,06677	-32,3325
İ _{6,7}	0,01105	31,72793	0,01095	31,90235	0,00976	16,9376
İ _{6,8}	0,12147	-35,35485	0,12168	-35,36327	0,13326	-29,2829
İ _{7,8}	0,10489	-37,09716	0,10505	-37,10993	0,11453	-31,2248
İ _{9,8}	0,21115	51,71036	0,21109	51,76823	0,21034	51,1401
İ _{8,10}	0,5085	-48,69495	0,50875	-48,68269	0,48809	-50,5783
İ _{10,8}	0,49758	-48,45330	0,49782	-48,44104	0,47761	-50,3367

Tabela 5– Valores das medidas estimadas para o caso 3 e caso 4

	Resíduos							
	CAS	SO 1	CAS	SO 3	CAS	SO 4		
Medida	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo	Módulo	Ângulo		
	$(x10^{-12})$	$(x10^{-9})$						
V ₁	-0,14722	-0,02539	0,001	-0,0025	0,05924	-0,53163		
V ₂	-0,14011	-0,02545	0,001	0,00178	0,05906	-0,11745		
Ϋ́ ₃	-0,12212	-0,0252	0,00101	0,00399	0,05998	0,153811		
	-0,12057	-0,02524	0,00101	0,00355	0,06	0,157696		
	-0,12301	-0,02526	0,001	0,00287	0,05984	0,222177		
Ϋ́ ₆	-0,12546	-0,02551	0,00103	0,00443	0,06014	0,321616		
Ϋ́ ₇	-0,12456	-0,02553	0,00103	0,0043	0,0602	0,321469		
	-0,12434	-0,02511	0,00101	0,00332	0,06014	0,188665		
	-0,13278	-0,02548	0,00102	0,00335	0,06005	0,138744		
<i>V</i> ₁₀	-0,13256	-0,02455	0,001	0,00119	0,06049	0,205385		
İ _{1,2}	0,006273	-0,00287	-0,00093	0,03631	-0,0928	2,87664		
İ _{1,2}	0,005995	-0,00314	-0,00096	0,03631	-0,0953	2,87664		
İ _{10,1}	0,028755	0,00375	-0,0004	0,03656	-0,0969	9,92139		
İ _{2,3}	-0,01077	0,0059	2,7E-06	0,02924	-0,0126	2,95905		
İ _{2,9}	0,005274	-0,00241	-0,000035	0,08099	-0,0396	5,20693		
İ _{4,3}	0,173167	-0,0238	0,00018	-0,4293	-0,0002	2,20116		
İ _{3,8}	-0,13123	0,00315	-0,00048	-0,1159	0,02768	8,55962		
İ _{8,4}	-0,08427	0,03358	-0,000069	-0,0232	0,02165	8,53076		
İ _{5,8}	0,001166	0,01266	0,00019	0,05742	-0,00007	-6,84434		
İ _{5,8}	0,001596	0,01192	0,00019	0,05731	-0,00009	-6,84664		
İ _{6,7}	0,022494	0,10169	0,0001	-0,1744	0,00129	14,79038		
İ _{6,8}	0,047559	-0,00516	-0,00021	0,00842	-0,0118	-6,07199		
İ _{7,8}	0,034389	-0,00157	-0,00016	0,01277	-0,0096	-5,87235		
İ _{9,8}	-0,02365	0,014	0,000006	-0,0579	0,00081	0,57022		
İ _{8,10}	-0,01643	-0,0056	-0,00025	-0,0123	0,02041	1,88336		
İ _{10,8}	-0,01665	-0,00556	-0,00024	-0,0123	0,01997	1,88336		

Tabela 6- Resíduos das medidas para o caso 1, caso 3 e caso 4



Figura 10- Gráfico dos resíduos das medidas do sistema de teste litoral do Paraná - Módulo

Figura 11– Gráfico dos resíduos das medidas do sistema de teste litoral do Paraná – Ângulo



A tabela 5 contém os valores dos fasores da tensão e das correntes nas linhas que foram estimados pelo EEL. A partir desse vetor z^{est} se consegue calcular outras grandezas do sistema e assim realizar a análise do caso 5. As tabelas 7 e 8 mostram os resultados do fluxo de potência e perdas ativa e reativa nas linhas, sendo denominados como "real" os valores obtidos a partir do fluxo de potência gerado pelo MatPower e "est." os valores encontrados a partir do vetor z^{est} do caso em que foram inseridos ruídos aleatórios normais às medidas.

Na figura 12, pode-se observar os resíduos do fluxo de potência ativa e reativa nas linhas. As medidas de fluxo da linha 3-4 foram as que demonstraram maiores desvios nos resíduos, chegando a 3,00 MW para a potência ativa e 8,61MVar para a potência reativa. A linha 3-8 também demonstrou resíduos mais altos, indicando 1,73 MW para a potência ativa e 4,64 MVar para a potência reativa de desvio. No geral, os valores de potências e perdas ativas e reativas estimados através do vetor z^{est} apresentaram uma boa estimativa em seu valor estimado.

			Injeção da barra "de"			Inj	eção da l	barra "pa	ra"	
			P (N	1VV)	Q (N	IVar)	P (MW) Q (MVar)		IVar)	
Medida	De	Para	Real	Est.	Real	Est.	Real	Est.	Real	Est.
1	1	2	29,83	29,74	-7,82	-7,97	-29,83	-29,74	8,4	8,54
2	1	2	30,64	30,54	-8,03	-8,18	-30,64	-30,54	8,62	8,77
3	1	10	31,34	31,10	-80,24	-80,90	-30,53	-30,28	72,55	73,3
4	2	3	17,49	17,59	-14,78	-14,40	-17,25	-17,35	11,32	11
5	2	9	21,28	21,29	-14,93	-14,90	-21,13	-21,14	13,68	13,7
6	3	4	4,71	1,702	-4,17	-12,60	-4,71	-1,698	3,91	12,4
7	3	8	-21,26	-23,00	-23,65	-28,10	21,3	23,042	23,44	28
8	4	8	-13,79	-13,50	-13,81	-12,70	13,81	13,541	13,16	12
9	5	8	-5,4	-5,35	-4,13	-3,95	5,41	5,3576	2,43	2,26
10	5	8	-5,5	-5,44	-4,17	-4,00	5,5	5,4468	2,48	2,3
11	6	7	0,89	0,905	-0,78	-0,64	-0,89	-0,905	0,02	-0,12
12	6	8	-10,29	-10,40	-6,22	-6,54	10,33	10,449	3,74	4,07
13	7	8	-8,71	-8,81	-5,62	-5,91	8,74	8,845	2,55	2,85
14	8	9	-12,53	-12,50	15,42	15,43	12,63	12,58	-17,18	-17,2
15	8	10	-36,05	-36,00	-36,63	-37,20	36,07	36,076	38,26	38,8
16	8	10	-35,42	-35,40	-35,7	-36,20	35,46	35,461	37,29	37,9

Tabela 7– Resultados do fluxo de potência real e estimado – Sistema de teste litoral do Paraná

			Perdas					
			P	(MW)	Q (MVar)		
Medida	De	Para	Real	Est.	Real	Est.		
1	1	2	0	0	0,58	0,577		
2	1	2	0	0	0,59	0,592		
3	1	10	0,806	0,8183	4,03	4		
4	2	3	0,239	0,2365	0,69	0,769		
5	2	9	0,143	0,1436	0,44	0,456		
6	3	4	0,001	0,0043	0	0,013		
7	3	8	0,038	0,0497	0,11	0,145		
8	4	8	0,018	0,0159	0,07	0,061		
9	5	8	0,008	0,0078	0,02	0,026		
10	5	8	0,008	0,008	0,02	0,027		
11	6	7	0	5,82E-05	0	2,81E-04		
12	6	8	0,04	0,0416	0,12	0,136		
13	7	8	0,033	0,035	0,1	0,122		
14	8	9	0,106	0,1059	0,31	0,337		
15	8	10	0,028	0,0285	1,63	1,657		
16	8	10	0,034	0,0347	1,59	1,621		

Tabela 8 – Resultados das perdas reais e estimadas – Sistema de teste litoral do Paraná



Figura 12- Resíduos do fluxo de potência ativa e reativas nas linhas

4.2 SISTEMA DE TESTE IEEE 30 BARRAS

Os mesmos cinco casos de análise que foram realizados para o sistema da seção anterior foram realizados para o sistema de teste IEE 30 barras.



Figura 13– Diagrama unifilar IEE 30 barras

A entrada de dados para o programa computacional do sistema com 30 barras é apresentada pela Tabela 9 e pelo vetor da equação 46.

		Resistência	esistência Reatância Susceptância		Índice
De	Para	(pu)	(pu)	total da linha	lc
				(pu)	
1	2	0,0192	0,0575	0,0528	1
1	3	0,0452	0,1652	0,0408	2
2	4	0,057	0,1737	0,0368	1
3	4	0,0132	0,0379	0,0084	1
2	5	0,0472	0,1983	0,0418	2
2	6	0,0581	0,1763	0,0374	2
4	6	0,0119	0,0414	0,009	1
5	7	0,046	0,116	0,0204	2
6	7	0,0267	0,082	0,017	1
6	8	0,012	0,042	0,009	2
6	9	0	0,208	0	2
6	10	0	0,556	0	2
9	11	0	0,208	0	2
9	10	0	0,11	0	2
4	12	0	0,256	0	1
12	13	0	0,14	0	2
12	14	0,1231	0,2559	0	2
12	15	0,0662	0,1304	0	1
12	16	0,0945	0,1987	0	1
14	15	0,221	0,1997	0	2
16	17	0,0524	0,1923	0	1
15	18	0,1073	0,2185	0	1
18	19	0,0639	0,1292	0	1
19	20	0,034	0,068	0	1
10	20	0,0936	0,209	0	2
10	17	0,0324	0,0845	0	2

Tabela 9 – Dados de linha do sistema de teste IEE 30 barras

10	21	0,0348	0,0749	0	2
10	22	0,0727	0,1499	0	1
15	22	0,0116	0,0236	0	2
21	23	0,1	0,202	0	1
22	24	0,115	0,179	0	2
23	24	0,132	0,27	0	1
24	25	0,1885	0,3292	0	2
25	26	0,2544	0,38	0	2
25	27	0,1093	0,2087	0	2
28	27	0	0,396	0	1
27	29	0,2198	0,4153	0	2
27	30	0,3202	0,6027	0	1
29	30	0,2399	0,4533	0	2
8	28	0,0636	0,2	0,0428	1
6	28	0,0169	0,0599	0,013	1

$$v = \begin{bmatrix} 1,060 | 0 \circ \\ 1,045 | - 5,367 \circ \\ 1,027 | - 7,603 \circ \\ 1,020 | - 9,365 \circ \\ 1,010 | - 14,117^{\circ} \\ 1,014 | - 11,090^{\circ} \\ 1,005 | - 12,858 \circ \\ 1,010 | - 11,770 \circ \\ 1,037 | - 14,350 \circ \\ 1,026 | - 16,054 \circ \\ 1,082 | - 14,350 \circ \\ 1,082 | - 14,350 \circ \\ 1,034 | - 15,351 \circ \\ 1,071 | - 15,351 \circ \\ 1,019 | - 16,267 \circ \\ 1,015 | - 16,353^{\circ} \\ 1,023 | - 15,930 \circ \\ 1,020 | - 16,972 \circ \\ 1,006 | - 16,972 \circ \\ 1,006 | - 16,972 \circ \\ 1,005 | - 17,140 \circ \\ 1,009 | - 16,288 \circ \\ 1,013 | - 16,513 \circ \\ 1,013 | - 16,513 \circ \\ 1,013 | - 16,725 \circ \\ 0,999 | - 16,860 \circ \\ 0,992 | - 16,344 \circ \\ 0,974 | - 16,786 \circ \\ 0,996 | - 15,754 \circ \\ 1,010 | - 11,699 \circ \\ 0,975 | - 17,054 \circ \\ 0,964 | - 17,989 \circ \end{bmatrix}$$
(46)

Os resultados do EEL para cada caso do sistema de teste 30 barras do IEEE são:

Tabela 10 - Variáveis de estados estimados para o caso 1 e caso 2

	Valores de	e tensão				
	VERDAD	EIROS	CA	SO 1	CASO 2	
Barras	V (pu) θ (°)		V (pu)	θ (°)	V (pu)	θ (°)
1	1,06000	0,00000	1,05999	0,00000	1,0600	-0,00000
2	1,04500	-5,36700	1,04499	-5,36700	1,04500	-5,36700

3	1,02700	-7,60300	1,02699	-7,60300	1,02700	-7,60300
4	1,02000	-9,36500	1,01999	-9,36500	1,02000	-9,36500
5	1,01000	-14,1170	1,00999	-14,1170	1,01000	-14,11700
6	1,01400	-11,0900	1,01399	-11,0900	1,01400	-11,09000
7	1,00500	-12,8580	1,00499	-12,8580	1,00500	-12,85800
8	1,01000	-11,770	1,00999	-11,7700	1,01000	-11,77000
9	1,03700	-14,350	1,03699	-14,3500	1,03700	-14,35000
10	1,02600	-16,0540	1,02599	-16,0540	1,02600	-16,05400
11	1,08200	-14,350	1,08199	-14,3500	1,08200	-14,3500
12	1,03400	-15,351	1,03399	-15,3510	1,03400	-15,35100
13	1,07100	-15,351	1,07099	-15,3510	1,07100	-15,35100
14	1,01900	-16,267	1,01899	-16,2670	1,01900	-16,26700
15	1,01500	-16,353	1,01499	-16,3530	1,01500	-16,35300
16	1,02300	-15,930	1,02299	-15,9300	1,02300	-15,93000
17	1,0200	-16,237	1,01999	-16,23700	1,02000	-16,23700
18	1,00600	-16,972	1,00599	-16,97200	1,00600	-16,97200
19	1,00500	-17,14	1,00499	-17,14000	1,00500	-17,14000
20	1,00900	-16,928	1,00899	-16,92800	1,00900	-16,92800
21	1,01300	-16,513	1,01299	-16,51300	1,01300	-16,51300
22	1,01300	-16,498	1,01299	-16,49800	1,01300	-16,49800
23	1,00400	-16,725	1,00399	-16,72500	1,00400	-16,72500
24	0,99900	-16,860	0,99899	-16,86000	0,99900	-16,8600
25	0,99200	-16,344	0,99199	-16,34400	0,99200	-16,34400
26	0,97400	-16,786	0,97399	-16,78600	0,97400	-16,78600
27	0,99600	-15,754	0,99599	-15,75400	0,99600	-15,75400
28	1,0100	-11,699	1,00999	-11,69900	1,01000	-11,69900
29	0,97500	-17,054	0,97499	-17,05399	0,97500	-17,05400
30	0,96400	-17,989	0,96399	-17,98899	0,96400	-17,98900

Para o caso 1, os resíduos do módulo e do ângulo das medidas foram na ordem de 10^{-13} e 10^{-10} respectivamente, garantindo mais uma vez a validação da modelo da estimação de estados.

Para o caso 2, não foram alocadas UMF nas barras 2, 3, 7, 9, 14, 16, 18, 20, 22, 23, 25, 28 e foi feita uma comparação dos resíduos dos módulos e ângulos das variáveis de estado com os do caso 1. Pelas figuras 14 e 15 e tabela 10, pode-se perceber que, mesmo não possuindo UMFs em todas as barras, os resíduos apresentados no caso 2 foram levemente menores do que os do caso 1.



Figura 14 - Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 1 e caso 2 – Módulo



Figura 15- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 1 e caso 2 -Ângulo

Novamente foram inseridos às medidas erros aleatórios considerados normais para a análise do caso 3 e o desempenho do EEL foi satisfatório (Tabela 11). Os resíduos dos módulos das medidas ficaram na ordem de 10^{-5} . Já para os resíduos dos ângulos, cerca de 15% das medições apresentaram um desvio maior do que a ordem de 10^{-2} , sendo o maior desvio encontrado de 5,746261 °. Conforme figuras 16 e 17 e tabela 11.

No caso 4, ao se adicionar erros grosseiros às medidas o estimador não promove uma boa estimação de estados em geral. Pela tabela 11 e figuras 16 e 17, nota-se desvios nos valores dos resíduos mais agudos, principalmente para os resíduos dos ângulos, que apresentam uma sensibilidade maior aos erros aleatórios.

	Valores de tensão					
	VERDAD	EIROS	CAS	SO 3	CAS	SO 4
Barras	V (pu)	θ (°)	V (pu)	θ (°)	V (pu)	θ (°)
1	1,06000	0,00000	1,06027	0,026377	1,047429	0,245265
2	1,04500	-5,36700	1,045275	-5,32915	1,031475	-5,35628
3	1,02700	-7,60300	1,027226	-7,59097	1,014049	-7,53515
4	1,02000	-9,36500	1,020221	-9,35246	1,007077	-9,33779
5	1,01000	-14,1170	1,010223	-14,0978	0,996682	-14,3261
6	1,01400	-11,0900	1,014209	-11,0836	1,000938	-11,1503
7	1,00500	-12,8580	1,005233	-12,8477	0,992011	-13,0506
8	1,01000	-11,770	1,010209	-11,7637	0,996744	-11,8816
9	1,03700	-14,350	1,037049	-14,3269	1,029476	-14,578
10	1,02600	-16,0540	1,025983	-16,041	1,021427	-16,4106
11	1,08200	-14,350	1,082326	-14,3192	1,072262	-14,6699
12	1,03400	-15,351	1,034284	-15,3483	1,026896	-15,7691
13	1,07100	-15,351	1,07139	-15,3565	1,062465	-15,7174
14	1,01900	-16,267	1,019247	-16,264	1,014962	-16,8398
15	1,01500	-16,353	1,015263	-16,3481	1,009511	-16,7962
16	1,02300	-15,930	1,023098	-15,9216	1,017542	-16,3593
17	1,0200	-16,237	1,01995	-16,226	1,015485	-16,5959
18	1,00600	-16,972	1,005874	-16,9525	1,003154	-17,4865
19	1,00500	-17,14	1,004822	-17,1193	1,002359	-17,6478
20	1,00900	-16,928	1,008814	-16,9089	1,006271	-17,4154
21	1,01300	-16,513	1,013008	-16,5039	1,008522	-16,9354
22	1,01300	-16,498	1,013008	-16,4888	1,008542	-16,9183
23	1,00400	-16,725	1,004193	-16,7209	0,998819	-17,0817
24	0,99900	-16,860	0,998995	-16,8526	0,993835	-17,1547
25	0,99200	-16,344	0,992597	-16,362	0,976546	-15,9901
26	0,97400	-16,786	0,973558	-16,7026	0,957204	-15,7945
27	0,99600	-15,754	0,997093	-15,7928	0,977508	-15,3117
28	1,0100	-11,699	1,01022	-11,6983	0,996835	-11,7506
29	0,97500	-17,054	0,9764	-17,1513	0,957912	-16,2655
30	0,96400	-17,989	0,965855	-18,1216	0,951911	-17,4902

Tabela 11- Variáveis de estados estimados para o caso 3 e caso 4



Figura 16- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 3 e caso 4 – Módulo

Figura 17- Gráfico resíduo das variáveis de estado para caso 3 e caso 4 – Ângulo



Para o caso 5, tem-se as tabelas 12 e 13 que exibem os resultados do fluxo de potência e perdas ativa e reativa para o sistema de teste do IEEE 30 barras. Pela figura 18, nota-se o bom desempenho das medidas de fluxo de potência nas linhas encontradas a partir das variáveis de estado estimadas. Para a potência ativa, 19% das medidas ultrapassaram 0,25 MW de resíduo, tendo o seu maior desvio na linha 10-22 correspondente a 0,65 MW. Já para a potência reativa, os desvios encontrados foram maiores, em que o seu maior valor ocorreu na linha 1-2 com 3 MVar de desvio.

			Ir	njeção da	barra "de	,	Injeção da barra "para"			
			P (N	1VV)	Q (N	IVar)	P (N	ЛW)	Q (MVar)	
Medida	De	Para	Real	Est.	Real	Est.	Real	Est.	Real	Est.
1	1	2	172,97	172,69	-24,62	-27,53	-167,78	-167,51	34,33	31,32
2	1	3	87,95	88,185	0,37	-1,689	-84,84	-85,055	6,57	4,238
3	2	4	43,52	43,802	0,26	-1,805	-42,53	-42,799	-1,16	-2,99
4	3	4	82,44	82,107	-7,77	-9,188	-81,58	-81,255	9,34	9,874
5	2	5	82,17	82,39	2,80	0,5226	-79,24	-79,446	5,10	3,011
6	2	6	60,39	60,761	-0,70	-2,662	-58,44	-58,797	2,63	0,689
7	4	6	73,54	73,978	-6,33	-6,247	-72,91	-73,349	7,56	6,572
8	5	7	-14,96	-14,94	9,68	8,3987	15,11	15,094	-11,36	-12,2
9	6	7	38,29	38,047	-1,03	-2,445	-37,91	-37,671	0,46	0,133
10	6	8	29,49	29,366	1,48	0,5151	-29,39	-29,265	-2,05	-2,01
11	6	9	28,75	28,608	-10,13	-10,33	-28,75	-28,608	12,01	12,2
12	6	10	16,19	16,173	-1,43	-1,448	-16,19	-16,173	2,85	2,873
13	9	11	0,00	-0,072	-22,59	-22,57	-0,00	0,0724	23,58	23,56
14	9	10	28,75	28,933	10,59	10,866	-28,75	-28,933	-9,63	-9,89
15	4	12	42,98	43,055	-3,45	-3,35	-42,98	-43,055	8,03	7,937
16	12	13	0,00	0,1135	-27,14	-27,41	-0,00	-0,1135	28,10	28,4
17	12	14	7,72	7,7408	2,36	2,4063	-7,64	-7,6652	-2,20	-2,25
18	12	15	17,39	17,311	6,53	6,4209	-17,17	-17,1	-6,11	-6,01
19	12	16	6,67	6,6144	2,72	2,7034	-6,63	-6,5693	-2,62	-2,61

Tabela 12– Resultados do fluxo de potência real e estimado

20	14	15	1,44	1,354	0,60	0,5357	-1,44	-1,3495	-0,60	-0,53
21	16	17	3,13	3,1102	0,82	0,835	-3,12	-3,105	-0,80	-0,82
22	15	18	5,66	5,7089	1,24	1,5854	-5,63	-5,6724	-1,17	-1,51
23	18	19	2,43	2,1559	0,27	-0,244	-2,42	-2,1529	-0,26	0,25
24	19	20	-7,08	-6,735	-3,14	-2,522	7,10	6,7528	3,18	2,556
25	10	20	9,39	9,4131	4,09	4,2693	-9,30	-9,3181	-3,88	-4,06
26	10	17	5,90	5,9367	5,05	5,0553	-5,88	-5,918	-5,00	-5,01
27	10	21	16,05	16,03	10,63	10,371	-15,93	-15,909	-10,37	-10,1
28	10	22	7,80	7,8821	5,00	5,0788	-7,74	-7,8214	-4,88	-4,95
29	21	22	-1,57	-0,924	-0,83	0,4518	1,57	0,9243	0,83	-0,45
30	15	23	4,75	4,8539	2,97	3,1719	-4,72	-4,8213	-2,91	-3,11
31	22	24	6,17	6,1529	4,04	3,9892	-6,11	-6,0927	-3,95	-3,9
32	23	24	1,52	1,4527	1,31	1,2241	-1,51	-1,448	-1,30	-1,21
33	24	25	-1,08	-1,101	2,84	2,5828	1,10	1,1156	-2,81	-2,56
34	25	26	3,55	3,3451	2,37	2,7382	-3,50	-3,2968	-2,30	-2,67
35	25	27	-4,64	-4,566	0,44	0,2761	4,67	4,5891	-0,40	-0,23
36	28	27	17,97	18,162	4,29	3,998	-17,97	-18,162	-2,97	-2,66
37	27	29	6,20	6,4229	1,68	1,6347	-6,11	-6,3258	-1,51	-1,45
38	27	30	7,10	7,2594	1,68	1,4432	-6,93	-7,083	-1,36	-1,11
39	29	30	3,71	3,7034	0,61	0,3413	-3,67	-3,6686	-0,54	-0,28
40	8	28	-0,61	-0,53	-2,11	-4,204	0,61	0,5306	-2,25	-4,53
41	6	28	18,63	18,787	0,91	0,2149	-18,57	-18,729	-2,04	-2,67

Tabela 13 – Resultados das perdas reais e estimadas

			Perdas							
			Р((MW)	Q (MVar)				
Medida	De	Para	Real	Est.	Real	Est.				
1	1	2	5,193	5,173	15,55	15,56				
2	1	3	3,115	3,13	11,38	11,39				
3	2	4	0,991	1,004	3,02	3,05				
4	3	4	0,857	0,852	2,46	2,449				
5	2	5	2,929	2,944	12,31	12,32				

6	2	6	1,941	1,964	5,89	5,937
7	4	6	0,622	0,629	2,17	2,19
8	5	7	0,153	0,15	0,39	0,404
9	6	7	0,381	0,376	1,17	1,156
10	6	8	0,102	0,101	0,36	0,353
11	6	9	-0,000	0	1,88	1,871
12	6	10	0,000	0	1,43	1,425
13	9	11	0,000	0	0,99	0,986
14	9	10	-0,000	0	0,96	0,977
15	4	12	0,000	0	4,57	4,587
16	12	13	0,000	0	0,96	0,983
17	12	14	0,075	0,076	0,16	0,157
18	12	15	0,213	0,211	0,42	0,416
19	12	16	0,046	0,045	0,10	0,095
20	14	15	0,005	0,005	0,00	0,004
21	16	17	0,005	0,005	0,02	0,019
22	15	18	0,035	0,037	0,07	0,074
23	18	19	0,004	0,003	0,01	0,006
24	19	20	0,020	0,017	0,04	0,035
25	10	20	0,093	0,095	0,21	0,212
26	10	17	0,019	0,019	0,05	0,049
27	10	21	0,123	0,121	0,26	0,259
28	10	22	0,059	0,061	0,12	0,125
29	21	22	0,000	1E-04	0,00	2E-04
30	15	23	0,030	0,033	0,06	0,066
31	22	24	0,061	0,06	0,09	0,094
32	23	24	0,005	0,005	0,01	0,01
33	24	25	0,017	0,015	0,03	0,026
34	25	26	0,047	0,048	0,07	0,072
35	25	27	0,024	0,023	0,05	0,044
36	28	27	0,000	0	1,32	1,342
37	27	29	0,091	0,097	0,17	0,183
38	27	30	0,172	0,176	0,32	0,332

39	29	30	0,036	0,035	0,07	0,066
40	8	28	0,000	2E-04	0,00	0,009
41	6	28	0,057	0,058	0,20	0,206

Figura 18- Resíduos do fluxo de potência ativa e reativas nas linhas



4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nessa seção foram apresentados os resultados das simulações para os sistemas de teste da região do litoral do Paraná com 10 barras e do IEE 30 barras. No caso 1, para os dois sistemas foi validado o modelo de medição do Estimador de Estados Linear para comprovar o seu funcionamento e só assim executar o restante das simulações dos próximos casos. No caso 2, o intuito era demonstrar que, mesmo não possuindo Unidades de Medições Fasoriais em todas as barras dos sistemas, o EEL consegue promover uma boa estimativa para as variáveis de estado.

No caso 3 foram adicionados erros aleatórios às medidas considerados normais, e por mais que a precisão das variáveis de estados tenha diminuído comparado com os dois primeiros casos, o desempenho do processo de estimação de estados foi satisfatório. Já no caso 4, com a inserção de erros grosseiros às medidas o estimador não consegue fornecer valores tão confiáveis como nos casos anteriores, verifica-se também que os valores dos ângulos são mais sensíveis aos erros adicionados.

Por fim o caso 5, em que foram calculadas grandezas como fluxo de potência e perdas ativa e reativa das linhas, demonstrando que a partir das variáveis de estado estimadas é possível encontrar outras grandezas do sistema que não foram medidas diretamente pelo sistema de medição fasorial.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o estudo de conceitos relacionados à estimação de estados e ao Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, bem como o desenvolvimento e análise de um Estimador de Estados Linear para cinco situações diferentes. Após as devidas comparações, evidencia-se que o processo de estimação de estados possui uma grande influência de fatores como observabilidade da rede, visto que se é necessário garantir um conjunto de medidas de número suficiente para promover a estimação do estado do sistema. Outro fator que não pode ser negligenciado é relacionado às medidas que contém erros grosseiros. Neste trabalho não foi feito um processo para identificação desses erros nas medidas e, pelos resultados obtidos no caso 4, fica clara a necessidade dessa abordagem na estimação de estados.

A utilização de medições fasoriais no processo de estimação de estados o torna linear, podendo assim destacar a facilidade na modelagem do algoritmo sendo possível a aplicação de artifícios como matrizes de incidência e admitância, que acarretam em solucionar o problema de forma rápida e direta.

A inclusão de medições fasoriais é uma ferramenta poderosa no contexto de estimação de estado, entretanto esse sistema ainda está se inserindo no mercado, sendo fundamental o estudo dessa tecnologia.

Desta forma, para complementar o atual trabalho e permitir um estudo mais aprofundado do tema, sugere-se:

- Inserção de um subprograma para identificar erros grosseiros de medidas;

- Utilização de técnicas para alocação ótima de Unidades de Medição Fasorial;
- Método de análise de observabilidade considerando apenas PMUs;

- Estimador linear com coordenadas retangulares para os fasores;

- Simulações e testes com sistemas reais de grande porte.

6 REFERÊNCIAS

ABUR, A. ; EXPOSITO, A. G. **Power System State Estimation: Theory and Implementation**. Nova York: Marcel Dekker, 2004.

ALEXANDER C.K. ; SADIKU M.N.O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. 5^a edição. Minas Gerais: AMGH Editora Ltda, 2013.

ANDRADE, S.R.C. Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações para melhoria da operação de Sistemas Elétricos de Potência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

BOSE, A. ; SUN H. ; YANG T. Two-level PMU-based Linear State Estimator. **Proceedings of the IEEE PES Power Systems Conference and Exposition**, p. 1-6, 2009.

COELHO, E.P.R. Processamento Simultâneo de Erros na Estimação de Estados Generalizada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2012.

Equipe de engenharia da Schweitzer Engineering Laboratories (SEL). Exemplos de automação em sistemas de supervisão e controle de subestações e redes de distribuição. **O Setor Elétrico**, p.54-60, 2010. ED 56

FONSECA, B. L. Implementação e Comparação Entre Estimadores de Estado de Transição Multiestágios. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

GHOSH, D; KUMAR, C ; GHOSE, T; MOHANTA D.K. Performance Simulation of Phasor Measurement Unit for Wide Area Measurement System. International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication, p. 242-245, 2014.

HIGUTI, R.T. **Amostragem e Reconstrução de Sinais.** Disponível em: < https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/ele1095_3_ amostragem.pdf>. Acesso em: 01 ago. de 2019.

IEEE C37.118.1/2011, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems. December 2011.

KREFTA, G. F. Avaliação da Inclusão de Unidades de Medição
Sincrofasorial na Estimação de Estados de Sistemas Elétricos de
Potência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2008.

LEITES, R.A.C. Processamento de Medidas Fasoriais de Tensão e Corrente na Estimação de Estados em Sistemas de Potência. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

LIRA, R. Influência dos canais de Instrumentação na Exatidão da Medição Fasorial Sincronizada. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

MONTICELLI, A. State Estimation in Eletric Power Systems. A Generalized Approach. 1 ed. New York, Springer, 1999.

MONTICELLI, A.J. Fluxo de carga em redes de energia elétrica. Editora Edgard Blucher Ltda, 1983.

OLIVEIRA, S.C.G. Análise do Algoritmo Interno de Unidades de Medição Fasorial. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

PHADKE A.G.; THORP J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Appplications. New York: Springer, 2008.

FRAZÃO, R.J.A. Métodos Alternativos para Estimação de Estado em Sistemas de Energia Elétrica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Maranhão, 2012.

FREITAS, P.P.F.M. Ferramenta Computacional para Conversão de Arquivos de Entrada do ANAREDE para MATPOWER. Monografia de Graduação. Universidade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2013.

ALBERTINI, M. R. M. C. Metodologia para depuração off-line de parâmetros série e shunt de linhas de transmissão através de diversas amostras de medidas. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

FANTIN, C.D.A. Análise de observabilidade e de redundância de medidas
no contexto da estimação de estados trifásica. Dissertação de Mestrado.
Universidade Federal de São Paulo, 2012.