

## Um Esquema para Monitoramento em Tempo Real da Margem de Estabilidade de Tensão baseado em Variáveis Estimadas<sup>★</sup>

Maiara C. Oliveira<sup>\*</sup> Murilo E. C. Bento<sup>\*\*</sup> Joao B. A. London Jr<sup>\*</sup>  
Rodrigo A. Ramos<sup>\*</sup> Ahda P. Grilo-Pavani<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, SP (e-mail: maiaracoliveira@usp.br, jbalj@sc.usp.br, rodrigo.ramos@ieee.org)

<sup>\*\*</sup> Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail: murilobento@poli.ufrj.br).

<sup>\*\*\*</sup> Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC, SP (e-mail: ahda.pavani@ufabc.edu.br)

---

**Abstract:** State estimators (SEs) are among the most important tools for power system real-time modeling. With the advent of Wide-Area Measurement Systems (WAMSs), combinations of measurements from Phasor Measurement Units (PMUs) and Remote Terminal Units enabled the development of highly accurate SEs. However, although the PMUs provide much more information about the system state, typical issues faced by real-time state estimation applications still remain, such as the ones related to observability of the measurement sets. Within this context, this paper proposes (as its main contribution) a modified state estimation process to monitor the voltage stability margin of buses that are not directly monitored by meters. To achieve this goal, a well-known method based on the  $H_{\Delta}$  matrix was extended to perform redundancy and observability analysis of metering systems containing only PMU measurements, using rectangular coordinates for the phasor measurements and state variables. A linear Weighted Least Squares SE is implemented to estimate the complex voltage of observable buses, regardless of the presence of PMUs in them. Based on all estimated state variables, the voltage stability margin of the whole system is also estimated. Simulation results carried out in the IEEE test systems of 14, and 118 buses validate the effectiveness of the proposed scheme.

**Resumo:** Estimadores de estado (EEs) estão entre as mais importantes ferramentas para modelagem em tempo real de sistemas de potência. Com o advento dos Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS), combinações de medidas de Unidades de Medição Fasorial (UMFs) Sincronizada e Unidades de Terminal Remoto permitiram o desenvolvimento de EEs com maior precisão. No entanto, apesar das vantagens da utilização de UMFs no processo de estimação de estado, em função de permitirem o monitoramento direto e de forma síncrona das variáveis de estado do sistema (as tensões complexas nodais), típicos problemas de estimação de estado em tempo real ainda permanecem, tais como os relacionados à observabilidade de conjunto de medidas. Dentro deste contexto, este artigo propõe um processo de estimação de estado para monitorar a margem de estabilidade de tensão de barras que não são diretamente monitoradas por medidores. Um método bem conhecido baseado na matriz  $H_{\Delta}$  foi estendido para possibilitar análise de redundância e de observabilidade de sistemas de medição contendo somente medidas de UMFs, usando coordenadas retangulares para as medidas fasoriais e as variáveis de estado. Um EE linear, baseado em Mínimos Quadrados Ponderados, é implementado para estimar as tensões complexas de barras observáveis, possibilitando, dessa forma, a estimação da margem de estabilidade de tensão de todo o sistema. Resultados de simulações executadas nos sistemas testes do IEEE de 14 e 118 barras validam a eficácia do esquema proposto.

*Keywords:* Observability; Critical Measurement; PMU; WAMS; State Estimation; Voltage Stability

*Palavras-chaves:* Observabilidade; Medidas Críticas; PMU; SMFS; Estimação de Estados; Estabilidade de Tensão.

## 1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) são uma importante e crítica infraestrutura que já está sendo implantada na maioria dos sistemas de grande porte no mundo, tal como o Sistema Inteligado Nacional Brasileiro (Decker et al. (2011)). Particularmente, em aplicações que envolvem operações em tempo real, os SMFS possuem papel crucial, visto que fornecem medidas fasoriais sincronizadas de várias partes e equipamentos do sistema, usando Unidades de Medição Fasorial (UMF) Sincronizada (do inglês, Phasor Measurement Units (PMUs)), com altas taxas de amostragem e precisão devido ao uso de fontes efetivas de sincronização no tempo fornecidas pelo Sistema de Posicionamento Global ou Global Positioning System (GPS), no inglês (Li et al., 2010).

No entanto, é importante destacar que os desafios da implementação em larga escala de PMUs são numerosos. Os custos de aquisição e instalação de PMUs e de suas respectivas estruturas de comunicação remota é um exemplo destes desafios, que limitam o número de medidas que podem ser fornecidas por SMFS. Em países como o Brasil, que apresenta um sistema de potência de dimensões continentais, isso implica no fato de que não é razoável supor que o número de PMUs instaladas em qualquer SMFS possa fornecer um nível de redundância que tornará sua observabilidade uma questão irrelevante, dentro dos seus conjuntos de medições. Outro desafio relacionado à implantação do SMFS é a seleção das informações relevantes dentre o grande volume de dados fornecidos pelas PMUs. Nesse contexto, a análise de redundância se torna uma questão de grande relevância e que deve ser investigada com mais afinco (Zhao et al., 2019).

O uso dos dados das PMUs tem grande potencial para aplicações em diferentes áreas dos sistemas elétricos. Uma dessas aplicações é o uso de dados de PMU para estimar ou monitorar a Margem de Estabilidade de Tensão (MET) nos Sistema Elétricos de Potência (SEP). Esta margem consiste na diferença do nível de carga de um ponto de operação, atual, e o nível de carga máximo permitido para o sistema, sem que este esteja submetido a condições operativas inseguras. Acerca disso, diferentes métodos foram propostos nos últimos anos, e poucos métodos consideram dados de PMUs alocados em barramentos do sistema (Bento and Ramos (2021); Su and Liu (2016); Mandoulidis and Vournas (2020); Bento (2022); Guddanti et al. (2020)). Os autores Bento and Ramos (2021) propõem um método de monitoramento e atualização da margem de carga dos SEPs através da seleção de determinadas barras

do sistema, com auxílio de um banco de dados histórico de medições da operação de um sistema elétrico.

Assim, este trabalho propõe a combinação de SMFS e um método de estimação de estado modificado para monitorar a MET de algumas barras selecionadas no sistema e, a partir desse esquema de monitoramento, determinar a MET de todo o sistema. Uma das vantagens desta proposta é a utilização da estimação de variáveis elétricas e não de medidas, tendo em vista um aumento na precisão da estimativa da MET de forma sistêmica.

A principal contribuição deste artigo é o desenvolvimento de um estimador de estado de mínimos quadrados ponderado modificado, que permite processar apenas medidas de PMUs. Além disso, adota a representação em coordenadas retangulares das medidas. Considerando que na maioria dos sistemas elétricos atuais ainda não é possível garantir a observabilidade considerando apenas as medições de PMUs, a principal vantagem do método proposto é sua capacidade de determinar barras observáveis utilizando informações de SMFS. É importante destacar que o conjunto de barras observáveis contém barramentos que não possuem PMUs instaladas e, neste caso, informações mais confiáveis são agregadas ao monitoramento da MET em tempo real.

O esquema proposto é composto pelas seguintes etapas: (1) análise de observabilidade a partir das medidas sincrofatorias disponíveis, utilizando o método modificado desenvolvido neste artigo; (2) estimação de estado considerando as medidas fasoriais sincronizadas disponíveis; e (3) estimação da MET sistêmica a partir das variáveis de estado estimadas. Os resultados e as análises provenientes da aplicação do esquema proposto aos sistemas de teste IEEE de 14 e 118 barras estão apresentados ao longo deste trabalho e validam as conclusões mencionadas.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta uma breve revisão da fundamentação teórica; A Seção 3 descreve a abordagem sistemática empregada para analisar a observabilidade e a redundância em sistemas de medição; A Seção 4 aborda os conceitos do sistema de monitoramento da MET e como a análise de medidas críticas pode ser incorporada para auxiliar o operador do sistema elétrico; A Seção 5 apresenta os resultados das simulações e discussões; e, por fim, a Seção 6 descreve as conclusões obtidas neste trabalho, bem como as próximas etapas de desenvolvimento.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Considere o modelo do estimador de estados dado por Abur and Gomez-Exposito (2004):

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e} \quad (1)$$

onde,  $\mathbf{z}$  é o vetor de medidas ( $m \times 1$ ),  $\mathbf{x}$  é o vetor de estados ( $n \times 1$ ),  $\mathbf{h}(\mathbf{x})$  é a função de estimação de

\* Este trabalho teve o suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processos #2015/24245-8 e #2018/20104-9) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (Processos #88887.509657/2020-00 e #88887.510888/2020-00).

estado não-linear ( $m \times 1$ ) que relaciona as medições aos estados do sistema, e  $\mathbf{e}$  é o vetor de erro da medição ( $m \times 1$ ), geralmente considerada como variável aleatória de uma distribuição Gaussiana com média zero e matriz de covariância  $\mathbf{W}$ . Para obter o vetor de estados  $\mathbf{x}$  estimado iterativamente, resolve-se as equações normais (Abur and Gomez-Exposito (2004)):

$$[\mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \mathbf{W}^{-1} \mathbf{H}(\mathbf{x}^k)] \Delta \mathbf{x}^k = \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^k) \mathbf{W}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^k)] \quad (2)$$

onde a matriz  $\mathbf{H}(\mathbf{x}^k)$  é a matriz Jacobiana avaliada em  $\mathbf{x}$  na iteração  $k$ .

O modelo de estimação de estados (1) se torna linear quando são utilizadas coordenadas retangulares para medições de fase e variáveis de estado, desde que o sistema de medição contenha apenas medições de PMU, portanto:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}_{PMU}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}_{PMU} \quad (3)$$

onde,  $\mathbf{h}_{PMU}$  é um vetor ( $m_{PMU} \times 1$ ) que relaciona as  $m_{PMU}$  medidas de PMU com as variáveis de estado;  $\mathbf{e}_{PMU}$  é o vetor de ruído ( $m_{PMU} \times 1$ ), também assumido como de variáveis aleatórias independentes normalmente distribuídas, com média zero e matriz de covariância conhecida  $\mathbf{R}_{PMU}$ . Assim, uma estimação de estados semelhante, partindo do estimador de Mínimos Quadrados Ponderados (MQP), pode ser empregada para encontrar os valores ótimos para as variáveis de estado. Mas, neste caso resolvendo um único sistema linear.

### 3. ANÁLISE SISTEMÁTICA

#### 3.1 Análise de Observabilidade

Se um sistema é completamente observável considerando apenas medidas de PMU, a matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  correspondente tem posto completo (Benedito et al. (2009)), ou seja, posto igual ao número de variáveis de estado a serem estimadas (previamente definido como  $n$  neste artigo). Portanto, a análise de observabilidade pode ser realizada por meio da fatoração triangular da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$ , e deve ser feita utilizando a combinação das colunas de  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$ , conforme apresentado pelos autores London et al. (2007) e London and et al. (2009). Como as colunas de  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  correspondem aos estados do sistema, então, as colunas da matriz fatorada correspondem aos estados equivalentes, que são combinações lineares dos estados do sistema.

Durante o processo de fatoração, se o sistema for PMU observável, não há nenhum pivô nulo. Nesse contexto, a operação de fatoração pode levar a permutações das linhas para evitar a ocorrência de um pivô nulo. Contudo, nos casos em que o sistema não é PMU observável como um todo, a fatoração da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  mostrará um pivô zero na diagonal ( $i, i$ ), e não haverá linhas, nesta matriz, com elemento diferente de zero, correspondente a coluna do pivô zero. Portanto, não há medição de PMU que forneça informações da condição equivalente para essa coluna. Deste modo, se o sistema não for PMU observável como um todo, o processo apresentado em Benedito et al. (2009) pode ser usado para restaurar a observabilidade através de pseudo-medidas ou para identificação de ilhas observáveis.

#### 3.2 Análise de Redundância

O uso da chamada matriz  $\mathbf{H}_{\Delta}$  para identificar medidas críticas (MCs) e conjuntos críticos (CCs) em Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) foi explorado pelos autores London et al. (2007) e London and et al. (2009). No entanto, neste artigo é proposta uma abordagem diferente. Para obter o  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  de um sistema observável com PMUs, é necessário realizar a fatoração triangular completa da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$ . Além disso, para que o sistema seja totalmente PMU observável, a matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  consonante deve ter um posto igual a  $n$ , a qual pode ser descrita conforme a seguinte estrutura:

$$\mathbf{H}_{\Delta PMU} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (4)$$

onde  $\mathbf{I}$  é uma matriz identidade ( $n \times n$ ) e  $\mathbf{R}$  é uma submatriz ( $m_{PMU} \times n$ ).

As medidas de PMU correspondentes às linhas da submatriz  $\mathbf{I}$  são denominadas Medidas Básicas<sup>1</sup>, naturalmente obtidas durante o processo de fatoração. Enquanto que, as medidas de PMU associadas às linhas da submatriz  $\mathbf{R}$  são chamadas de Medidas Suplementares<sup>2</sup>.

É sabido que em um sistema de medição composto exclusivamente por PMUs a referência GPS é adotada. Assim, diferentemente da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  obtida em sistemas de medição SCADA, a última coluna da matriz não é composta por elementos diferentes de zero. Cabe mencionar que, as demais definições apresentadas são válidas para os sistemas que contêm medidas sincrofasoriais, como  $[rank(\mathbf{H}_{\Delta PMU}) = n]$  a condição para observabilidade algébrica, dado um sistema de  $n$  barras.

Para análise de observabilidade, apenas a eliminação dos elementos do triângulo superior da matriz Jacobiana é necessária. Entretanto, ao aplicar o procedimento de eliminação de Gauss, obtém-se a matriz  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$ , a partir da qual é possível identificar o nível de redundância local das medições. Com base nisso, as MCs correspondem às linhas linearmente independentes de  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$  e, conseqüentemente, as relações de redundância local das medições podem ser identificadas por meio da análise das relações de dependência linear das linhas desta matriz (Bretas and et al. (2005)).

Por intermédio da análise estrutural de  $\mathbf{H}_{\Delta PMU}$ , também podem ser identificados conjuntos de  $p$  medidas ( $p \geq 1$ ) que, quando removidos, tornam o sistema não observável. No entanto, remover qualquer outro conjunto de medidas  $k < p$ , que não pertencem ao conjunto  $p$ -crítico, não torna o sistema inobservável.

Além das medidas consideradas críticas para garantia de observabilidade do SEP, a identificação das PMUs críticas é preponderante para um plano de medição confiável. De acordo com a definição de um conjunto de medidas  $p$ -críticas, pode-se dizer que uma PMU é crítica se o agregado de medidas fornecidas por ela constituir pelo menos um conjunto de medidas  $p$ -críticas. Assim, para identificar

<sup>1</sup> No sentido em que são suficientes para garantir a observabilidade do sistema.

<sup>2</sup> Medidas não básicas.

PMUs críticas através da estrutura  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$ , adota-se a seguinte metodologia baseada em duas etapas:

**Passo 1:** Identifique inicialmente os conjuntos  $p$ -críticos de medidas, formados por apenas uma medida básica, e classifique como crítica a PMU que fornece pelo menos um desses conjuntos.

Nesta etapa, são identificadas as PMUs críticas, ou seja, ela é responsável por pelo menos um conjunto  $p$ -crítico de medidas, formado apenas por uma medida Básica. Entretanto, podem existir conjuntos  $p$ -críticos, formados por mais de uma medida Básica, cuja identificação não é direta. Portanto, pode haver PMUs que são críticas para formação de pelo menos um desses conjuntos  $p$ -críticos.

**Passo 2:** Se houver uma PMU que ainda não tenha sido identificada como crítica e que forneça ao menos uma medida básica, as colunas correspondentes a todas as medidas disponibilizadas por ela são removidas da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}^T$ . Na sequência, verifica-se a possibilidade de obter uma nova matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}^T$ , alterando as posições de algumas das suas colunas. Caso isso não seja possível, a PMU eliminada é classificada como crítica.

Esta etapa só é concluída quando todas as PMUs que fornecem informações sobre pelo menos uma medida básica, que não foi classificada como crítica na primeira etapa, forem avaliadas.

#### 4. SISTEMA DE MONITORAMENTO DA MARGEM DE ESTABILIDADE DE TENSÃO

Os sistemas de potência podem ser descritos por equações diferenciais algébricas da seguinte forma:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{d}, \mu) \quad (5)$$

$$\mathbf{0} = g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{d}, \mu) \quad (6)$$

em que,  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{d}$  são vetores que descrevem variáveis de estado dinâmicas, variáveis algébricas e variáveis para formulação do crescimento de carga, respectivamente, já o  $\mu$  é um parâmetro que descreve o nível de carga do sistema atual. O vetor  $\mathbf{d}$  é composto por fatores de participação das áreas como  $\mathbf{d} = [F_{A_1} \cdots F_{A_{NA}}]$ , sendo o subscrito  $NA$ , o número de áreas. A partir de um ponto de operação e uma direção de crescimento de carga, é possível determinar o nível máximo de carregamento que garante ao sistema elétrico um ponto de equilíbrio estável. A MET pode ser definida como a diferença entre o ponto de operação inicial e o nível máximo de carregamento que o SEP pode operar em segurança.

Ao considerar diversas direções de crescimento da carga ( $\mathbf{d}$ ) e condições de operação do SEP, pode-se determinar diferentes níveis de carregamento máximo para o mesmo, o qual consiste no limite de transferência de potência elétrica. Com base nisso, os autores Bento and Ramos (2021) formularam uma metodologia que possibilita a seleção de barramentos onde as medições de tensão fornecidas pelos PMUs são agrupados e associados a uma determinada faixa de MET. Deste modo, tem-se um conjunto de barramentos que são essenciais para o monitoramento da margem. Por outro lado, a pesquisa desenvolvida e aqui descrita consiste em avaliar se o conjunto de barras

críticas, definidas durante a análise de observabilidade e redundância, é capaz de possibilitar o monitoramento das faixas da MET, assim como foi descrito na abordagem proposta pelos autores Bento and Ramos (2021), de modo mais seguro e robusto.

#### 5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Para validar a metodologia proposta, foram utilizados os sistemas IEEE 14 e 118 barras. A localização e os tipos de medições feitas estão ilustrados na Fig. 1, para o sistema de 14 barras. Todas as simulações foram realizadas utilizando o ambiente de programação do aplicativo Matlab®. Os dados dos cenários elétricos, usados no cálculo do fluxo de potência, foram mantidos conforme os casos de referência. Para emular uma condição de operação semelhante as que os operadores encontram, na qual não se conhece o valor de referência e tão pouco o valor do desvio padrão das medidas, os valores de medição são obtidos inserindo um sinal de ruído nas grandezas elétricas calculadas nos casos de referência (Castillo and et al. (2011)), com isso, tem-se:

$$z_i = z_i^{ref} + u_i \cdot \sigma_i^{ref} \quad (7)$$

em que,  $z_i$  é o valor da medida  $i$  com a inserção do ruído, que será utilizado como dado de entrada no estimador de estados;  $z_i^{ref}$  é o respectivo valor da grandeza elétrica obtida numericamente do caso de referência;  $u_i$  é uma variável aleatória com distribuição normal padronizada, ou seja,  $u_i \sim N(0, 1)$ ; e  $\sigma_i^{ref}$  é o desvio padrão. O desvio padrão busca descrever minimamente a incerteza relativa de cada medida, como segue:

$$\sigma = \frac{|z_i| \cdot pr_i}{3} \quad (8)$$

onde  $pr_i$  é a respectiva precisão do medidor (0,1% para dados de PMUs).

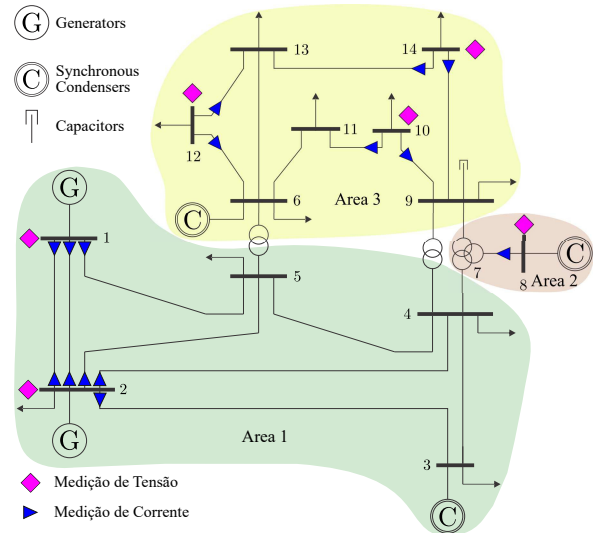


Figura 1. Sistema IEEE 14 barras dividido em 3 áreas.

##### 5.1 Análise de Observabilidade e Redundância

O sistema de medição representado na Fig. 1 é composto por três áreas observáveis, conforme destacado. Os barramentos que possuem PMUs instaladas são  $\{1; 2\}$ ,  $\{8\}$  e  $\{10; 12; 14\}$  nas Áreas 1 a 3, respectivamente.

Para a distribuição de PMUs adotada no sistema de 14 barras, a matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  é obtida e mostrada na Fig. 2. Esta figura destaca os elementos não nulos da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$ , com as colunas representando as medidas disponíveis e as linhas representando os estados estimados. Como a estimação de estados é feita adotando coordenadas retangulares, as primeiras  $n$  linhas representam a parte real, e as  $n + 1$  até  $2 \times n$  a parte imaginária dos estados estimados.

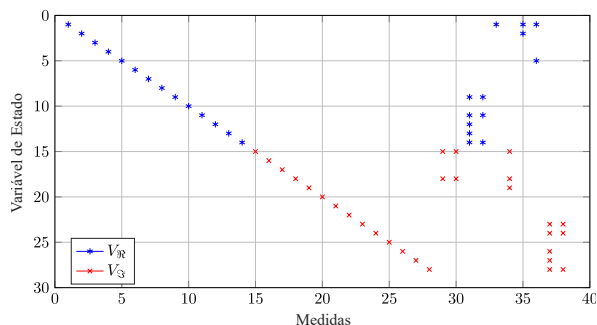


Figura 2. Esboço da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  para o sistema de 14 barras totalmente observável.

Note que, para a configuração adotada na Fig. 1, o sistema é observável como um todo (há pelo menos uma medida diferente de zero para cada estado). Embora as áreas não possuam medições físicas entre si, é possível observar o sistema como um todo, visto que existe um sinal GPS comum a todas as PMUs e, conseqüentemente, a todas as áreas.

Outro ponto a ser destacado é que as PMUs não são utilizadas em todas as barras de uma mesma área. Mesmo assim, também é possível, através do estimador MQP, determinar os estados de todas as barras. Para ilustrá-los, os estados estimados deste sistema são mostrados na Tabela 1. Nesta tabela estão descritas as tensões do barramento e a diferença percentual entre os valores estimados e os obtidos no fluxo de potência, que podem ser desprezados.

Tabela 1. Estimador de estados do sistema IEEE 14 barras

Barra	Estimação de Estados de Tensão		Erro de Tensão	
	Módulo (pu)	Ângulo (rad)	Módulo (%)	Ângulo (%)
1	1,0600	0,0000	-6,1E-06	-2,2E-06
2	1,0450	-0,0870	-6,1E-06	-3,6E-06
3	1,0100	-0,2221	-5,9E-06	-6,2E-06
4	1,0177	-0,1800	-5,9E-06	-5,6E-06
5	1,0195	-0,1531	-5,9E-06	-5,0E-06
6	1,0700	-0,2482	-1,8E-05	-6,3E-06
7	1,0615	-0,2332	-5,5E-06	-6,2E-06
8	1,0900	-0,2332	-1,2E-05	-1,2E-06
9	1,0559	-0,2607	-5,5E-06	-6,3E-06
10	1,0510	-0,2635	-1,8E-05	-6,6E-06
11	1,0569	-0,2581	-1,8E-05	-6,5E-06
12	1,0552	-0,2631	-1,8E-05	-6,4E-06
13	1,0504	-0,2645	-1,8E-05	-6,3E-06
14	1,0355	-0,2798	-1,8E-05	-6,7E-06

Assim, as PMUs possibilitaram estimar todos os estados do sistema de potência por meio de medições feitas em áreas que não possuem informações de medição comuns. No entanto, apesar da confiabilidade e robustez oferecidas

pelos PMUs, o sistema de medição ainda pode ser vulnerável a MCs e CCs. Por esta razão, é importante avaliar como o estimador de estado interpreta a perda de uma PMU crítica ou que pertence a conjuntos críticos de medidas. A Fig. 3 ilustra a disposição dos elementos  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  diferentes de zero quando as PMUs dos barramentos 2 e 8 são perdidas. Nesta situação, as informações das barras 3, 4, 7 e 8 também são perdidas.

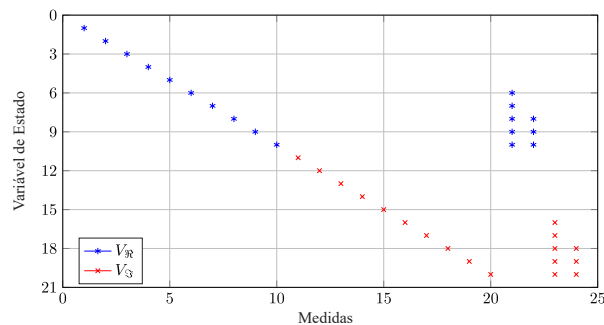


Figura 3. Esboço da matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  para o sistema IEEE 14 barras não observável por completo.

A  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  obtida para a nova distribuição de medidores no sistema (Fig. 3) caracteriza um novo sistema observável. Nele, os barramentos 3, 4, 7 e 8 formam uma área não observável pelo sistema de medição, por outro lado, os demais barramentos continuam compondo uma área observável. Este fato mostra que as PMUs instaladas nas barras 2 e 8 são críticas, visto que possuem medidas básicas e não conta com medidas complementares que permitam estimar os estados das barras 3, 4, 7 e 8. Esta vulnerabilidade do sistema de medição poderia ser suprida com a inserção de apenas uma PMU na barra 4, por exemplo.

Para avaliar a robustez da metodologia proposta em um sistema de porte maior, o sistema de 118 barras foi utilizado. A topologia das áreas do sistema está melhor detalhada em Sun et al. (2016). Na Tabela 2 são descritas as distribuições das PMUs nas 6 áreas do sistema de 118 barras.

Tabela 2. Barras com PMU no sistema IEEE 118 barras

Sistema	Área	Barras
118	1	1, 5, 10, 12
	2	13, 17, 20, 22, 25, 29, 114
	3	34, 37, 41, 70, 71
	4	44, 46, 68, 69, 76, 79, 96
	5	83, 86, 88, 91, 94, 100, 102, 105, 110
	6	52, 56, 57, 62, 63, 64

Da Fig. 4 fica evidente que mesmo para um sistema de maior porte a metodologia proposta permite construir a matriz  $\mathbf{H}_{\Delta_{PMU}}$  em coordenadas retangulares, usando exclusivamente o sistema de medição fasorial. Também é possível observar que alguns estados possuem apenas medidas básicas associadas, o que deixa o sistema de medição vulnerável em caso de perda de PMUs críticas. Esta análise se faz importante, visto que o SEP pode estar exposto a condições operacionais críticas, por falta de informações de campo adequadas e mesmo pela ausência dessas informações.

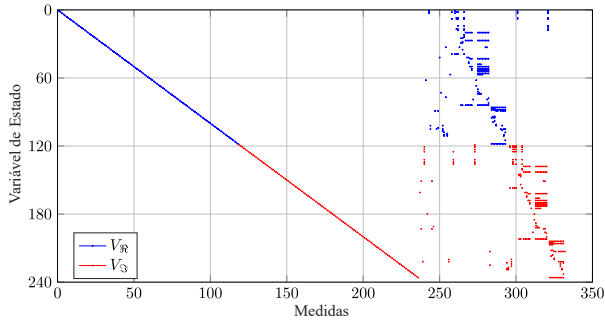


Figura 4.  $H_{\Delta PMU}$  layout de matriz para o sistema de 118 barras totalmente observável.

A confiabilidade e robustez dos sistemas de medição garantem informações preciosas para tomada de decisão das equipes de operadores nas salas de tempo real. Por conseguinte, uma vez consolidadas as informações, os operadores podem realizar análises e tirar conclusões sobre vários aspectos como, por exemplo, a monitorização do MET. Ademais, os engenheiros de planejamento da operação podem fazer uso dos dados históricos de medição para subsidiar suas análises prospectivas.

### 5.2 Avaliação do Sistema de Monitoramento da MET

O método descrito em Bento and Ramos (2021) para identificação de barramentos utilizados no monitoramento da MET foi realizado para os sistemas de potência sob estudo. As tabelas 3 e 4 fornecem quatro faixas de tensão dos barramentos selecionados dos sistemas IEEE 14 e 118 barras, respectivamente, para o monitoramento da MET, são elas:  $LM_1 : MET \in [0, 4)$ ,  $LM_2 : MET \in [4, 5)$ ,  $LM_3 : MET \in [5, 6)$  e  $LM_4 : MET \in [6, \infty)$ . Pode-se observar que, no conjunto de barras selecionadas pelo sistema de monitoramento da MET, também são consideradas barras críticas pelo método proposto. Resultados estes que corroboram com a abordagem aqui proposta.

Tabela 3. Barras selecionadas do sistema IEEE 14 barras para o monitoramento da MET.

Barra	$LM_1$ V [p.u.]	$LM_2$ V [p.u.]	$LM_3$ V [p.u.]	$LM_4$ V [p.u.]
2	[0, 96; 0, 98]	[0, 99; 1, 01]	[1, 02; 1, 04]	[1, 04; 1, 05]
4	[0, 95; 0, 97]	[0, 97; 0, 99]	[1, 00; 1, 02]	[1, 01; 1, 02]
5	[0, 95; 0, 96]	[0, 97; 0, 99]	[0, 99; 1, 01]	[1, 00; 1, 02]
6	[0, 96; 0, 98]	[0, 99; 1, 01]	[1, 02; 1, 04]	[1, 03; 1, 05]
9	[0, 95; 0, 97]	[0, 97; 0, 99]	[1, 00; 1, 03]	[1, 02; 1, 04]
13	[0, 94; 0, 96]	[0, 96; 0, 99]	[1, 00; 1, 02]	[1, 02; 1, 03]

Assim, se esses barramentos críticos forem perdidos, eles podem comprometer o sistema de monitoramento da MET e, conseqüentemente, o operador do SEP não terá informações suficientes para determinar o quão longe, em termos do nível de carregamento, o sistema de potência está de um colapso de tensão. Neste caso, o sistema proposto em Bento and Ramos (2021), para monitoramento por faixas de medição de tensão usando apenas algumas barras, pode ser empregado conjuntamente com o método de estimação de estado. E, assim, possibilitar a obtenção de informações mais fidedignas e adequadas acerca da MET real do SEP, com base no ponto de operação atual.

Tabela 4. Barras selecionadas do sistema IEEE 118 barras para o monitoramento da MET.

Barra	$LM_1$ V [p.u.]	$LM_2$ V [p.u.]	$LM_3$ V [p.u.]	$LM_4$ V [p.u.]
5	[0, 86; 0, 92]	[0, 93; 0, 98]	[0, 98; 1, 02]	[1, 01; 1, 04]
10	[0, 88; 0, 95]	[0, 96; 1, 01]	[1, 01; 1, 06]	[1, 05; 1, 07]
12	[0, 84; 0, 91]	[0, 89; 0, 92]	[0, 93; 0, 97]	[0, 97; 1, 02]
15	[0, 85; 0, 91]	[0, 89; 0, 94]	[0, 95; 0, 98]	[0, 98; 1, 01]
17	[0, 86; 0, 90]	[0, 91; 0, 95]	[0, 95; 0, 98]	[0, 99; 1, 02]
27	[0, 84; 0, 90]	[0, 91; 0, 94]	[0, 94; 0, 96]	[0, 97; 0, 99]
32	[0, 84; 0, 88]	[0, 89; 0, 93]	[0, 92; 0, 96]	[0, 96; 1, 00]
37	[0, 86; 0, 90]	[0, 91; 0, 95]	[0, 96; 0, 99]	[0, 99; 1, 02]
40	[0, 85; 0, 90]	[0, 91; 0, 94]	[0, 94; 0, 98]	[0, 97; 0, 99]
49	[0, 91; 0, 95]	[0, 96; 0, 98]	[0, 98; 1, 01]	[1, 00; 1, 15]
51	[0, 87; 0, 90]	[0, 91; 0, 93]	[0, 94; 0, 97]	[0, 97; 0, 99]
60	[0, 89; 0, 92]	[0, 93; 0, 96]	[0, 95; 0, 98]	[0, 99; 1, 01]
63	[0, 86; 0, 90]	[0, 90; 0, 94]	[0, 94; 0, 96]	[0, 97; 1, 00]
66	[0, 88; 0, 91]	[0, 92; 0, 96]	[0, 95; 0, 98]	[0, 98; 1, 10]
69	[0, 85; 0, 90]	[0, 91; 0, 94]	[0, 95; 0, 98]	[0, 99; 1, 13]
75	[0, 86; 0, 92]	[0, 93; 0, 95]	[0, 95; 0, 97]	[0, 95; 0, 99]
80	[0, 89; 0, 93]	[0, 94; 0, 97]	[0, 96; 0, 99]	[1, 00; 1, 14]
83	[0, 88; 0, 92]	[0, 93; 0, 96]	[0, 95; 0, 97]	[0, 98; 1, 00]
87	[0, 90; 0, 93]	[0, 94; 0, 98]	[0, 97; 1, 00]	[1, 01; 1, 11]
92	[0, 91; 0, 94]	[0, 94; 0, 97]	[0, 98; 1, 00]	[0, 99; 1, 03]
95	[0, 88; 0, 90]	[0, 91; 0, 94]	[0, 95; 0, 98]	[0, 97; 0, 99]
100	[0, 90; 0, 94]	[0, 94; 0, 97]	[0, 98; 1, 01]	[1, 02; 1, 10]
101	[0, 87; 0, 90]	[0, 91; 0, 94]	[0, 95; 0, 98]	[0, 98; 1, 00]
105	[0, 86; 0, 90]	[0, 91; 0, 96]	[0, 96; 0, 98]	[0, 97; 1, 00]
111	[0, 85; 0, 89]	[0, 90; 0, 92]	[0, 93; 0, 97]	[0, 96; 0, 99]
114	[0, 88; 0, 91]	[0, 91; 0, 94]	[0, 95; 0, 98]	[0, 97; 1, 00]

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho investigou o uso de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada combinado com um método de Estimação de Estados modificado para monitorar a Margem de Estabilidade de Tensão através das variáveis elétricas estimadas e não medidas. Para isso, foi implementado um estimador de estado linear por mínimos quadrados ponderado, que conta apenas com medidas de PMUs, representando essas medidas em coordenadas retangulares. Tendo em vista o custo agregado, ainda elevado, para garantir a observabilidade de um sistema de potência real considerando apenas medições de PMUs, também foi desenvolvido uma abordagem que permitir determinar quais os barramentos observáveis por meio das PMUs já instaladas. O método através do estimador implementado, possibilita a identificação dos barramentos que possuem e daqueles que não contam com PMUs. Com isso, sabe-se quais as barras cujas METs podem ser monitoradas por meio de variáveis de estado estimadas. O método para análise de observabilidade desenvolvido neste trabalho é uma importante contribuição em termos do estado da arte, uma vez que se baseia em uma metodologia já bem consolidada na literatura desenvolvido para sistemas SCADA.

Mais especificamente, foi implementado e validado, em laboratório de pesquisa, um sistema de monitoramento da MET, que consiste em: (1) analisar a observabilidade do sistema, bem como a redundância de suas medições, com base na abordagem proposta neste trabalho; (2) estimar os estados de barras sem medição direta, considerando apenas as medidas sincrofatorias disponíveis; e (3) determinar faixas da margem de estabilidade de tensão do sistema através das variáveis de estado estimadas.



As análises e estudos de caso foram realizados usando os sistemas de teste IEEE 14 e 118 barrass. O sistema de 14 barras foi dividido em 3 áreas, dispondo de apenas 6 PMUs instaladas em seus barramentos. Já o sistema de 118 barras foi dividido em 6 áreas e incorporou 38 PMUs. Dentre as principais conclusões deste trabalho, destacam-se: (i) o método de análise da observabilidade não requer nenhum processo iterativo, sendo adequado para aplicações em tempo real; e (ii) o esquema proposto é capaz de identificar quais barras são críticas para determinação da MET sistêmica. Ademais, esses estudos mostraram que com PMUs instaladas em apenas algumas barras do sistema, é possível monitorar a MET do sistema por completo. Vale destacar também, que a análise de observabilidade e identificação de medidas críticas para o monitoramento do sistema, visam garantir maior robustez do sistema de medição e possibilitar maior confiabilidade à análise dos operadores do sistema. A título de exemplificação, os estudos de caso em um sistema de monitoramento da MET por meio de medições de tensão evidenciaram a presença de barras consideradas críticas e que poderiam comprometer o adequado monitoramento da MET, evidenciando a necessidade de políticas para a adequação do sistema de medição. Neste contexto, o uso da abordagem de estimação de estado se mostra fundamental para assegurar a confiabilidade e robustez das informações disponibilizadas aos operadores.

No âmbito das atividades futuras, destaca-se a extensão da metodologia no contexto de uma identificação mais robusta dos conjuntos de medidas existentes e das PMUs que são críticas. Com isto, pretende-se alcançar um maior detalhamento na exploração das relações de redundância e seus impactos. Por fim, a realização mais testes voltados para o desempenho do método em conjunto com a determinação da MET.

## REFERÊNCIAS

- Abur, A. and Gomez-Exposito, A. (2004). *Power System State Estimation*, volume 24 of *Power Engineering (Wileis)*. CRC Press.
- Benedito, R.A.S., London, J.B.A., and Bretas, N.G. (2009). A unified algorithm for observability and redundancy analysis. In *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 1–7. IEEE.
- Bento, M.E.C. (2022). Monitoring of the power system load margin based on a machine learning technique. *Electrical Engineering*, 104(1), 249–258.
- Bento, M.E.C. and Ramos, R.A. (2021). An approach for monitoring and updating the load margin of power systems in dynamic security assessment. *Electric Power Systems Research*, 198, 107365.
- Bretas, N.G. and et al. (2005). A topological approach to the identification of critical measurements in power-system state estimation. *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, 52(1), 139–147.
- Castillo, M.R.M. and et al. (2011). Offline Detection, Identification, and Correction of Branch Parameter Errors Based on Several Measurement Snapshots. *IEEE Trans. Power Syst.*, 26(2), 870–877.
- Decker, I.C., e Silva, A.S., Agostini, M.N., Prioste, F.B., Mayer, B.T., and Dotta, D. (2011). Experience and applications of phasor measurements to the Brazilian interconnected power system. *Eur. Trans. Electr. Power*, 21(4), 1557–1573.
- Guddanti, K.P., Matavalam, A.R.R., and Weng, Y. (2020). PMU-Based Distributed Non-Iterative Algorithm for Real-Time Voltage Stability Monitoring. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11(6), 5203–5215.
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z., and Zhang, P. (2010). Smart Transmission Grid: Vision and Framework. *IEEE Trans. Smart Grid*, 1(2), 168–177.
- London, J.B.A., Alberto, L.F.C., and Bretas, N.G. (2007). Analysis of measurement-set qualitative characteristics for state-estimation purposes. *IET Gener. Transm. Distrib.*, 1(1), 39.
- London, J.B.A. and et al. (2009). Redundancy and Observability Analysis of Conventional and PMU Measurements. *IEEE Trans. Power Syst.*, 24(3), 1629–1630.
- Mandoulidis, P. and Vournas, C. (2020). A PMU-based real-time estimation of voltage stability and margin. *Electric Power Systems Research*, 178, 106008.
- Su, H.Y. and Liu, C.W. (2016). Estimating the Voltage Stability Margin Using PMU Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3221–3229.
- Sun, Y., Fu, M., Wang, B., Zhang, H., and Marelli, D. (2016). Dynamic state estimation for power networks using distributed map technique. *Automatica*, 73, 27–37.
- Zhao, J., Qi, J., Huang, Z., Meliopoulos, A.P.S., Gomez-Exposito, A., Netto, M., Mili, L., Abur, A., Terzija, V., Kamwa, I., Pal, B., and Singh, A.K. (2019). Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies, and Future Work. *IEEE Trans. Power Syst.*, 34(4), 3188–3198.