



V Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica  
V EnICT  
ISSN: 2526-6772  
IFSP – Câmpus Araraquara  
22 e 23 de outubro de 2020



## SISTEMAS DE MEDIÇÃO SINCRONIZADA DE FASORES: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA

JHONATAN HENRIQUE IGNACIO<sup>1</sup>, PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara – UNIARA, henriqueji@outlook.com.

<sup>2</sup> Orientador/Docente do curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Araraquara – UNIARA, Doutorando em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – EESC/USP, phabarra@uniara.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Engenharia Elétrica – 3.04.00.00-7

**RESUMO:** Os sistemas de medição fasorial sincronizada vêm sendo amplamente estudados, discutidos e aplicados em campo por diversas empresas do setor elétrico. Essa tecnologia permite a medição sincronizada de magnitudes e ângulos de corrente e tensão em pontos geograficamente distantes do sistema elétrico. Tem-se como principal componente a Unidade de Medição Fasorial, amplamente conhecida por PMU (do inglês, *Phasor Measurement Unit*). As PMUs são responsáveis pela medição dos dados do sistema, processamento e formatação dessas informações, bem como pelo envio dessas informações para um concentrador de dados. Dessa maneira, torna-se possível analisar eventos, monitorar parâmetros elétricos, utilizar essas informações para controle, bem como para a proteção do sistema elétrico. Devido à sincronização precisa das medidas, o centro de controle pode obter informações de alta confiabilidade e resolução, fornecendo suporte para operações em tempo real, com uma visualização ampla e de maior sensibilidade. Diante da importância desta temática, o presente trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre as PMUs, apresentando o seu funcionamento, suas potencialidades, tipos, bem como suas possíveis aplicações no contexto atual dos sistemas elétricos, onde a rede elétrica passa por um processo de modernização e o conceito de redes elétricas inteligentes é emergente.

**PALAVRAS-CHAVE:** distribuição de energia elétrica; medição sincronizada; PMUs; sistemas elétricos.

### INTRODUÇÃO

Nota-se nos sistemas elétricos de potência uma busca contínua em elevar os níveis de confiabilidade, resiliência, qualidade da energia e outros indicadores. Observa-se ainda uma preocupação crescente com a mitigação de mudanças climáticas, por meio da redução na emissão de gases poluentes (CHEN et al., 2020). Neste cenário, tem-se uma crescente integração de fontes renováveis de energia no sistema elétrico em seus diferentes níveis, isto é, na transmissão e na distribuição da energia. Esta integração de fontes renováveis de energia, bem como outros aspectos, requer uma modernização dos sistemas elétricos (HOJABRI et al., 2020). Em fato, parte desta modernização advém do monitoramento e do supervisionamento, utilizando equipamentos como SCADA (*supervisory control and data acquisition*) e PMUs (*phasor measurement units*) (NAZARI-HERIS; MOHAMMADI-IVATLOO, 2015).

Em nível de distribuição, diversas distribuidoras de energia elétrica utilizam o SCADA para monitorar a operação de seus sistemas. A alocação desses equipamentos ao longo dos alimentadores e subestações permite a aquisição de medidas das magnitudes de corrente, tensão, bem como, monitorar o fluxo de potência ativa e reativa. Todavia, o SCADA opera com uma baixa resolução (na escala de segundos) e não permite o monitoramento sincronizado dos fasores, o que limita sua aplicação em algoritmos de proteção e controle que requerem uma resolução mais elevada.

Alternativamente aos sistemas SCADA, tem-se as PMUs, cujo desenvolvimento deu-se a partir dos anos 70, sendo que sua larga comercialização se iniciou nos anos 90. Vale ressaltar que em um primeiro momento, as PMUs eram, e ainda são, mais utilizadas em sistemas de transmissão devido ao seu alto custo,

sobremaneira no início de seu desenvolvimento. Não obstante, com o constante desenvolvimento da tecnologia, diversas variações com um menor custo têm emergido, como os  $\mu$ -PMUs e os D-PMUs, permitindo a sua aplicação também em sistemas de distribuição, foco deste artigo.

As PMUs possuem como principal finalidade o monitoramento do sistema em tempo real, fornecendo informações precisas e sincronizadas dos parâmetros elétricos da rede, tais como tensão e corrente. Estes se caracterizam por fornecerem medidas de alta confiabilidade e precisão sobre o estado do sistema, permitindo uma visualização dinâmica do mesmo, e ainda uma vasta gama de aplicações em proteção e controle (PHADKE; BI, 2018) (APPASANI; MOHANTA, 2018).

Diante do exposto, este artigo tem por objetivo apresentar informações associadas à utilização das PMUs e suas variações nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Para tanto, apresenta-se uma fundamentação teórica relacionada ao funcionamento das PMUs e sua estrutura. Posteriormente, apresentam-se possibilidades de aplicações em sistemas de distribuição com a utilização das PMUs. Por fim, tem-se uma discussão sobre a crescente utilização desses elementos de monitoramento.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As PMUs são componentes eletrônicas desenvolvidas para proporcionar uma melhor análise dos sistemas elétricos de potência, possibilitando medições de ângulos de fase e amplitudes, ou seja, fasores de tensões e correntes senoidais. Uma de suas vantagens em relação aos sistemas convencionais de medição é a sua sincronização do tempo.

O fornecimento dos fasores provenientes das medições se dá a partir da comparação dos mesmos em locais distintos. Todavia, para que possam ser utilizados, faz-se necessário obter a sincronização através do Sistema de Posicionamento Global (GPS) para que seja possível observar os sincrofasores e obter medições precisas e com alta resolução, bem como garantir uma melhor tomada de decisão relacionada ao controle e proteção do sistema elétrico em tempo real (SCHWITZER, 2020). Na sequência, apresentam-se informações relacionadas à representação e obtenção dos fasores e à estrutura (*hardware*) das PMUs.

### Representação de um fasor

A representação de uma forma de onda senoidal pode ser feita a partir de um número complexo denominado fasor (HARIDAS, 2015). Esses fasores, quer sejam de corrente ou de tensão, são comumente utilizados como ferramenta matemática para a análise de circuitos elétricos em CA. Assim, uma forma de onda senoidal pode ser equacionada da seguinte forma:

$$x(t) = x_p \times \cos(\omega t + \psi) \quad (1)$$

Em que:

$x_p$  – é o valor de pico do sinal;

$\omega$  – é a frequência angular do sinal em radianos por segundo;

$\psi$  – é o ângulo de fase em radianos.

A partir da Equação (1), pode-se obter a seguinte representação fasorial:

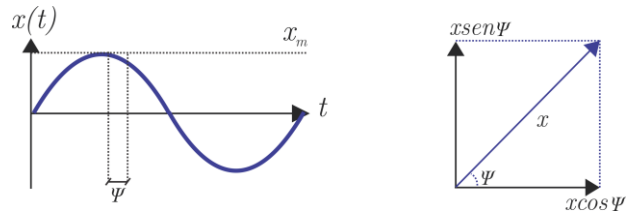
$$x = \left(\frac{x_p}{\sqrt{2}}\right) e^{j\psi} = \left(\frac{x_p}{\sqrt{2}}\right) (\cos\psi + j\sin\psi) = x_r + jx_i \quad (2)$$

Em que:

$x_p/\sqrt{2}$  – é o valor de pico do sinal;

$r$  e  $i$  – são as componentes reais e imaginárias do valor complexo em componentes retangulares.

O sinal senoidal e sua representação fasorial provenientes das Equações (1) e (2) são ilustradas de maneira simplificada na Figura 1.



**FIGURA 1. Forma de onda senoidal e sua representação fasorial.**  
**Fonte: Adaptada de DUSABIMANA; YOON, 2020.**

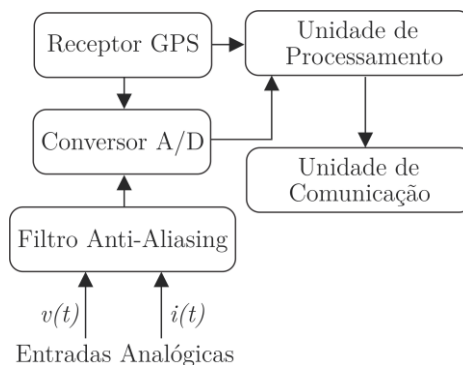
Vale ressaltar que o ângulo de fase em radianos depende da escala de tempo imposto pelo GPS, que por sua vez, permite uma sincronização dos fasores estimados pelos PMUs em diversos pontos do sistema de distribuição (IEEE, 2005).

Sabe-se ainda que nos sistemas elétricos de potência, os sinais de corrente e tensão não são puramente senoidais em regime permanente e frente aos eventos transitórios. Dessa forma, utilizam-se algoritmos para a extração dos fasores fundamentais (em 60 Hz). Na literatura técnica, podem-se encontrar vários algoritmos hábeis para a estimação dos fasores em frequência fundamental, com respectivas vantagens e desvantagens. Contudo, verifica-se que os algoritmos baseados na transformada de Fourier são os mais utilizados nas pesquisas e nos equipamentos comerciais.

### Representação em blocos das PMUs

De modo geral, as PMUs e suas variações (como  $\mu$ PMUs e D-PMUs), caracterizam-se por uma alta velocidade de processamento, avaliação e estampa de tempo com alta precisão dos sinais de entrada. Semelhantemente a outros dispositivos de monitoramento e proteção, as medidas de corrente e tensão são adquiridas por meio de transformadores de potencial (TPs) e transformadores de corrente (TCs). Essas entradas analógicas passam por um processo de filtragem, visando evitar o efeito *aliasing*, isto é, uma falsa frequência criada durante o processo de amostragem proveniente a uma baixa taxa (APPASANI; MOHANTA, 2018). Em consonância com o teorema de Nyquist, o sinal amostrado deve ser maior que o dobro da frequência contida no sinal amostrado, evitando o efeito *aliasing* e possíveis distorções dos sinais.

Em sequência, os sinais de corrente e tensão obtidos na entrada são digitalizados por um conversor A/D. O oscilador com bloqueio de fase faz a conversão do sinal proveniente do sistema de posicionamento global (GPS) de um pulso por segundo em vários pulsos sequenciais com uma taxa de velocidade alta utilizados na amostragem da forma de onda. Os dados digitalizados são enviados ao microprocessador, responsável pela execução dos cálculos fasoriais, executando algoritmos de estimação de fasores, como a transformada discreta de Fourier. Em seguida, os valores obtidos são enviados por meio de uma unidade de comunicação para concentradores de dados (PDCs), responsáveis pelo recebimento dos sincrofasores coletados e enviados pelas PMUs. Portanto, os PDCs possuem as funções de organizar os dados de forma assíncrona e relacionar os mesmos no tempo a partir das estampas de tempo, bem como armazenar os dados recebidos em uma base de dados e disponibilizá-los para as aplicações cabíveis. A estrutura em *hardware* apresentada acima é típica das PMUs e suas variações, representada por um diagrama de blocos na Figura 2. Algumas características podem ser diferentes, como a quantidade de bits do conversor A/D, a taxa de amostragem dos sinais, a taxa de reportagem dos dados aos PDCs e outras características.



**FIGURA 2. Diagrama de blocos simplificado de um PMU.**  
**Fonte: Adaptada de DUSABIMANA; YOON, 2020.**

## METODOLOGIA

Nota-se neste artigo uma busca pela caracterização das PMUs, apresentando como resultados as possíveis aplicações desses equipamentos nos sistemas de distribuição. Além da seção de fundamentação teórica já apresentada, na seção de resultados e discussão, essas aplicações são apresentadas e discutidas. Para a elaboração e fundamentação deste artigo, diversos artigos foram utilizados. Para a obtenção desses documentos, a base de dados da Scopus (SCOPUS, 2019) foi utilizada. Uma ênfase na análise dos artigos foi dada aos artigos de revisão sobre o tema, bem como aos artigos mais citados.

## DISCUSSÃO

Nesta seção, apresentam-se as discussões deste artigo. Os resultados apresentados referem-se às análises realizadas, subdivididas nos seguintes tópicos maiores: i) Pesquisa e desenvolvimento utilizando as PMUs; e ii) Aplicações das PMUs nos sistemas de distribuição.

### Pesquisa e desenvolvimento utilizando as PMUs

Diante da possibilidade de aplicação das PMUs em novos contextos, como o de sistemas de distribuição, *smartgrids* e *microgrids*, verifica-se na literatura técnica que uma grande quantidade de pesquisadores tem utilizado algum tipo de infraestrutura de PMUs em suas pesquisas. A Figura 3 apresenta a quantidade de publicações relacionadas às PMUs considerando o intervalo entre o ano de 2000 e o ano de 2020. Verifica-se, portanto, que o tema é de extrema relevância e atualidade.

A Figura 4, por sua vez, apresenta o quantitativo de publicações por país de origem dos autores dos artigos. Nesta figura, apenas os 10 países mais bem classificados foram apresentados. Verifica-se uma proeminência de países como Estados Unidos, Índia e China nas publicações relacionadas às PMUs. Vale ressaltar que o Brasil não figura entre os 10 países com mais publicações nesta área, o que pode ser um ponto de melhoria. Por fim, destaca-se que as Figuras 3 e 4 foram obtidas por meio da base de dados da Scopus.

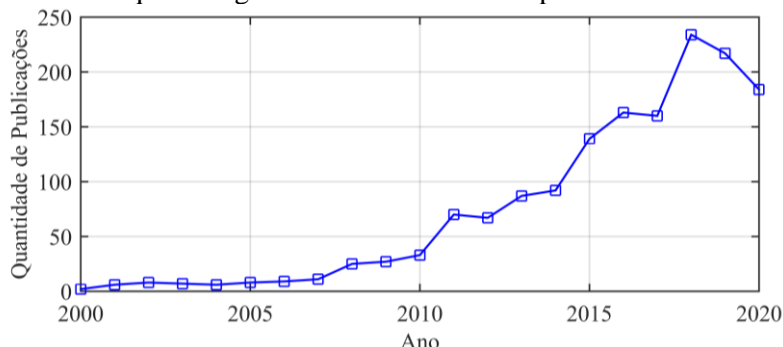


FIGURA 3. Publicações relacionadas às PMUs no intervalo do ano 2000 a 2020.

Fonte: Próprio Autor.

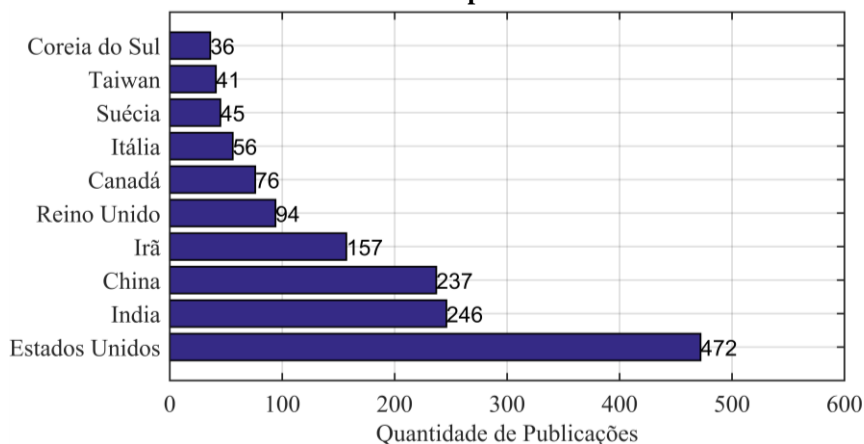


FIGURA 4. Publicações relacionadas às PMUs no intervalo do ano 2000 a 2020, considerando a extração por países de origem.

Fonte: Próprio Autor.

## **Aplicações de PMUs em sistemas de distribuição**

Devido ao comprimento reduzido das linhas de distribuição, bem como à dinâmica do sistema, as PMUs precisam ter um desempenho superior quando comparado às convencionais encontradas em sistemas de transmissão, pois a introdução de recursos energéticos distribuídos no sistema o torna menos equilibrado, o que exige maior exatidão e precisão nas medidas (HOJABRI, et al.,2020). No entanto, com os recursos oferecidos e uma grande gama de aplicações, as PMUs podem ser de grande importância em trabalhos de monitoramento, controle e proteção dos sistemas de distribuição. Na literatura, diversas aplicações vêm sendo propostas. Nestas aplicações, as proposições, algoritmos e estratégias dependem fortemente da utilização das PMUs instaladas nos sistemas de distribuição. Essas aplicações são discutidas na sequência.

### **i) Detecção de ilhamento**

O ilhamento se dá quando eventualmente ocorrem desligamentos intencionais ou não de partes da rede de distribuição para manutenção, ou ainda por situações de falha. No entanto, há casos em que recursos energéticos distribuídos interligados ao sistema continuam alimentando um determinado ponto, dificultando ações de controle e correções do evento. Dessa forma, existem estratégias propostas na literatura utilizando uma infraestrutura de PMUs para que esses recursos sejam desconectados da rede em tempo hábil (USMAN; FARUQUE, 2018). Ressalta-se que esses são os casos onde não se deseja operar parte do sistema de maneira ilhada, como ocorre nas microrredes.

### **ii) Detecção e localização da falha**

Detectar e localizar falhas ocasionadas pode gerar maior velocidade quanto ao envio de profissionais ao local exato do evento, bem como diminuir o tempo de interrupção nas redes de distribuição e custos operacionais. Com o aumento dos recursos energéticos distribuídos, esta tarefa de detecção e localização das faltas podem ainda tornar-se mais desafiadoras. Os fasores de tensão e corrente fornecidos pelas PMUs podem contribuir com esses processos de localização por possuírem um alto desempenho quanto à medição sincronizada dos fasores e alta velocidade (USMAN; FARUQUE, 2018).

### **iii) Estimação de estado**

Diferente do sistema de transmissão que pode ser apontado como uma rede balanceada, a rede de distribuição é composta por muitos nós e variações significativas. A estimação de estado com a utilização de dados fornecidos pela PMU viabiliza o fornecimento de informações diretas para compreensão situacional do estado da rede aos operadores, bem como possíveis atuações automáticas com a detecção de eventos na rede baseando-se em dados como magnitudes de tensão/corrente e ângulo de fase em cada nó (SHAHSAVARI, et al., 2019).

### **iv) Proteção do sistema de distribuição**

Em um novo contexto de microrredes e de sistemas de distribuição com uma alta penetração de geradores distribuídos, contando ainda com a presença de sistemas de armazenamento de energia, a proteção convencional utilizando elementos de sobrecorrente com ajustes fixos pode não ser suficiente para a proteção confiável dos sistemas de distribuição (BARRA et al., 2020). Com vistas a esta problemática, diversas propostas têm sido feitas de esquemas adaptativos de proteção que utilizam algum tipo de infraestrutura de comunicação, ou ainda, utilizando PMUs alocadas ao longo do sistema de distribuição.

### **v) Outras aplicações:**

A aplicação da unidade de medição fasorial em nível de distribuição pode solucionar problemas que interferem diretamente na proteção e controle do sistema de diversas formas, por exemplo, o fluxo reverso de potência que por sua vez pode interferir na relação entre relés de proteção do sistema, fusíveis, entre outros componentes que são essenciais para uma melhor confiabilidade, mantendo o sistema seguro atendendo aos níveis de qualidade de energia exigidos. As PMUs podem exercer um papel muito importante por entregar uma alta resolução e tolerância a ruídos ocasionados por equipamentos chaveados, além disso, o crescimento de geração distribuída vem se ampliando rapidamente, e a necessidade de uma melhor visualização e

coordenação dos componentes de proteção e controle torna-se ainda mais desafiadora (CARVALHO, et al., 2020).

## CONCLUSÕES

Com uma integração cada vez maior de recursos energéticos distribuídos nos sistemas de distribuição de energia, as tarefas de controle, monitoramento e proteção, tornam-se cada vez mais desafiadoras. Avanços foram obtidos com a utilização de sistemas SCADA, mas atualmente, nota-se uma crescente evolução na utilização das PMUs e suas variações, em função, sobretudo, do decaimento nos custos desses equipamentos. As PMUs aplicadas em nível de distribuição podem desempenhar um importante papel, fornecendo medições sincronizadas no tempo e com alta precisão. Essas vantagens possibilitam o desenvolvimento de diversos algoritmos, estratégias e esquemas, como as apresentadas neste artigo. Destaca-se ainda que a utilização das PMUs em nível de distribuição pode consistir em mais um passo rumo à modernização dos sistemas elétricos, visando obter um completo conceito de redes elétricas inteligentes. A crescente quantidade de pesquisas relacionadas a esse tipo de aplicações indica que a comunidade científica tem entendido esta temática como uma possibilidade de avanço, e, portanto, esforços vêm sendo direcionados para a disseminação das PMUs também em nível de distribuição.

## REFERÊNCIAS

- APPASANI, B.; MOHANTA, D.K. **A review on synchrophasor communication system: communication technologies, standards and applications**. Protection and Control of Modern Power Systems, vol. 3, no. 37, 2018.
- BARRA, P. H. A. et al. **A survey on adaptive protection of microgrids and distribution systems with distributed generators**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 118, 2020.
- CARVALHO, G. **Algoritmo modular de estimação de sincrofasores de sequência positiva**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020.
- CHEN, S. et al. **Low carbon transition pathway of power sector with high penetration of renewable energy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 130, 2020.
- DUSABIMANA, E.; YOON, S. **A Survey on the Micro-Phasor Measurement Unit in Distribution Networks**, Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Seoul 06978, Korea, 2020.
- HARRIDAS, R. P. **GPS based phasor technology in electrical power system**. International Journal of Electronics and Electrical Engineering, vol. 3, no. 6, 2015.
- HOJABRI, M. et al. **A Comprehensive Survey on Phasor Measurement Unit Applications in Distribution Systems**. Energies, vol. 12, no. 23, 2019.
- IEEE. **IEEE Std. C37.118-2005: IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems**, 2005.
- NAZARI-HERIS, B.; MOHAMMADI-IVATLOO, B. **Application of heuristic algorithms to optimal PMU placement in electric power systems**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, 2015.
- PHADKE, A.; BI, T. **Phasor measurement units, WAMS, and their applications in protection and control of power systems**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 6, 2018.
- SCHWITZER. Synchrophasors. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/solutions/synchrophasors/>>. Acesso em: 28 de agosto de 2020.
- SCOPUS Database. Disponível em: <<https://www.scopus.com>> . Acesso em: 28 de agosto de 2020.
- SHAHSAVARI, A. et al. **Situational Awareness in Distribution Grid Using Micro-PMU Data: A Machine Learning Approach**. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, 2019.
- USMAN M. U.; FARUQUE, M. O. **Applications of synchrophasor technologies in power systems**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, vol. 7, no. 2, 2019.