



Sistema de referência para medição sincrofasorial

M B Martins¹, L A A Souza¹, R R Zampilis¹ e M V Viegas¹

¹ Divisão de Metrologia Elétrica (Diele), Inmetro, Duque de Caxias, 25520-020, Brasil
mbmartins@inmetro.gov.br

Resumo. Nos últimos anos foi desenvolvido um sistema de referência para medição sincrofasorial no Inmetro. O sistema é capaz de realizar todos os ensaios prescritos nas normas internacionais vigentes para certificação de unidades de medição fasorial (*phasor measurement units* – PMUs). O artigo apresenta a arquitetura do sistema, descrevendo suas principais características do ponto de vista metrológico, que contempla a preocupação com o devido sincronismo dos sinais de tensão e corrente a uma base de tempo comum, os diversos algoritmos utilizados para estimação de sincrofasores, bem como a caracterização de transdutores de tensão e corrente.

1. Introdução

No Brasil, a infraestrutura laboratorial para avaliação de Unidades de Medição Fasorial (Phasor Measurement Units – PMUs) vem se desenvolvendo nos últimos anos. Com vistas a proporcionar a execução de ensaios segundo a normativa IEEE/IEC 60255-118-1-2018 [1], de forma eficiente e confiável, o Laboratório de Metrologia em Energia Elétrica (Lamel) do Inmetro inaugurou o fornecimento do serviço de ensaios de PMUs em 2022. Este trabalho descreve o processo de desenvolvimento da medição sincrofasorial nos laboratórios do Inmetro, fruto de parcerias com os institutos NIST, dos EUA, e PTB, da Alemanha, bem como as perspectivas de fornecimento de novos serviços metrológicos ao setor elétrico brasileiro provenientes desse desenvolvimento.

O sistema atualmente em uso para realização dos ensaios é um calibrador comercial, capaz de reproduzir, de forma totalmente automatizada, formas de onda de tensão (ou corrente) cuja fase inicial é sincronizada ao segundo do UTC (*Universal Time Code*, fornecido via GPS). As formas de onda são correspondentes a todas as prescrições da norma IEEE/IEC 60255-118-1-2018 para aprovação de modelos de PMUs. Os dados de medição da PMU sob teste são então comparados aos valores de referência fornecidos pelo calibrador.

A garantia da qualidade na realização de tais ensaios demanda que o calibrador comercial seja periodicamente calibrado, procedimento atualmente disponível somente nos EUA e Reino Unido. A realização de tal serviço fora do Brasil acarreta, porém, um alto custo financeiro para o Inmetro e para qualquer outro laboratório brasileiro que preste esse serviço ao setor. Além do custo da calibração em si, há aqueles relacionados ao transporte seguro do equipamento, a indisponibilidade e o tempo despendido na empreitada. Para o atendimento dessa demanda, redução dos custos e domínio da tecnologia no Brasil, o Inmetro tem investido também no desenvolvimento e manutenção de uma referência nacional para medição de sincrofasores.

Para calibração do calibrador, é necessário realizar a amostragem dos sinais por ele gerados para cada ensaio em particular, e calcular os sincrofasores correspondentes, de forma automatizada. Grande parte do esforço de desenvolvimento está na programação da automação dos testes com amostragem

dos sinais em sincronismo com a geração proveniente do calibrador comercial, bem como na implementação e avaliação de algoritmos especializados na estimação de sincrofasores em níveis de incerteza apropriados à tarefa (via de regra, 10 vezes menores que a especificação da norma para PMUs) [2,3].

O acondicionamento dos sinais de tensão e corrente a níveis compatíveis com amostradores é realizado por transdutores de tensão (divisores resistivos de tensão) e corrente (resistores shunt). Outro desafio importante reside na confecção e caracterização dos transdutores de tensão e corrente, cujos erros e incertezas devem ser bem conhecidos nas condições às quais serão submetidos durante seu uso no sistema de referência. Alguns protótipos já foram construídos e encontram-se em fase de testes, que por sua vez demandam o desenvolvimento de metodologias para caracterização do comportamento de transdutores em ampla faixa de frequências [4-8].

2. Arquitetura do sistema

O sistema de referência para medição sincrofasorial é mostrado de forma esquemática no diagrama de blocos da Figura 1, e uma fotografia da montagem é mostrada na Figura 2. Na Figura 1, podemos analisar primeiramente dois blocos principais: o calibrador comercial, e o sistema PXI. O primeiro é capaz de fornecer sinais de tensão e corrente nos níveis de especificação das PMUs, em todos os casos de ensaios prescritos em [1]. Os sinais são gerados no calibrador a uma taxa de amostragem da ordem de 10^5 Hz, i.e., significativamente superior à taxa típica de uma PMU, que é da ordem de 10^3 Hz. Para garantir a rastreabilidade do calibrador comercial, utilizamos um sistema PXI de forma paralela ao calibrador comercial, submetido aos mesmos sinais de GPS e acionado via um sinal de trigger. Para amostragem dos sinais de tensão na faixa de 1 V ou 10 V, são utilizados divisores resistivos de tensão (DRT) para cada fase, no circuito de tensão, e shunts para o circuito de corrente, totalizando 6 canais no módulo de amostragem do sistema PXI. Para garantir a coerência da fase absoluta, toda a amostragem é sincronizada via um circuito de clock que recebe o sinal do GPS. A CPU da PXI recebe então os sinais amostrados, calcula os valores de referência para cada quadro e compara com o sincrofasor fornecido pela PMU.

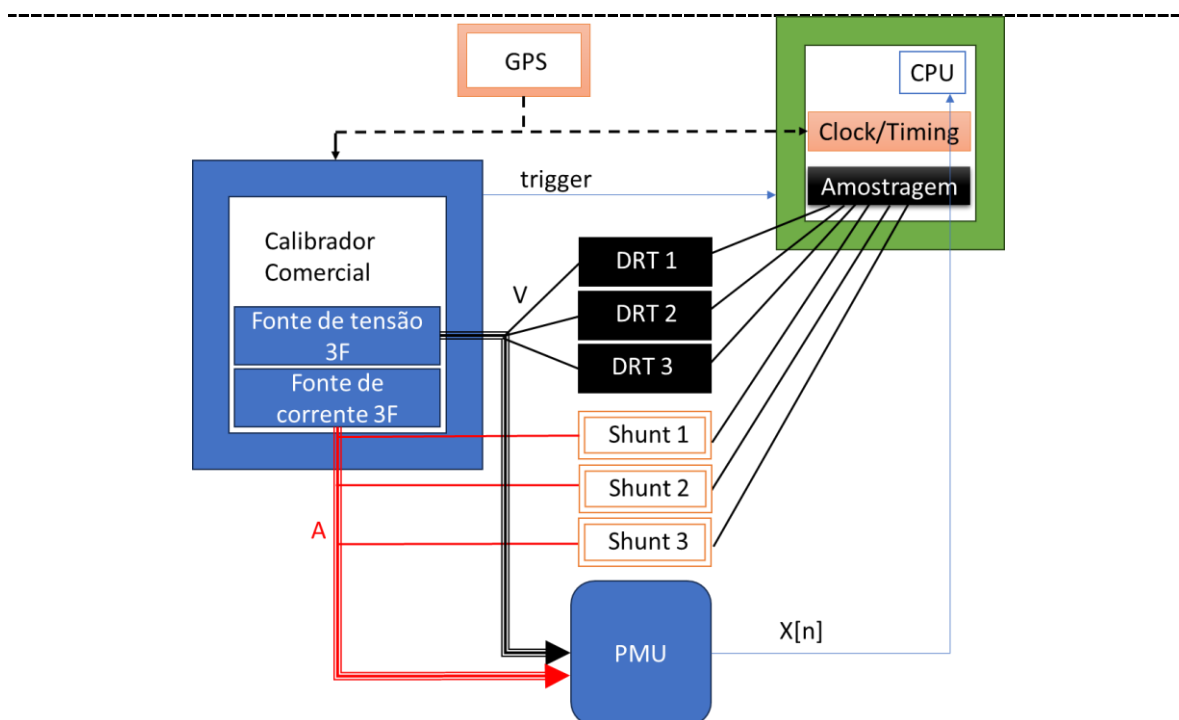


Figura 1. Diagrama de blocos do sistema de referência para medição de sincrofasores.



Figure 2. Fotografia do Sistema de referência para medição de sincrofasores no Lamel.

2.1. Cálculo de sincrofasores

Para calibração do calibrador, é necessário realizar a amostragem dos sinais por ele gerados para cada ensaio em particular, e calcular os sincrofasores correspondentes, de forma automatizada. Grande parte do esforço de desenvolvimento está na programação da automação dos testes com amostragem dos sinais em sincronismo com a geração proveniente do calibrador comercial, bem como na implementação e avaliação de algoritmos especializados na estimação de sincrofasores, frequência e ROCOF em níveis de incerteza apropriados à tarefa (via de regra, erros máximos 10 vezes menores que a especificação da norma para ensaios em PMUs [1]). Tais valores calculados serão então utilizados como valores de referência para determinação dos índices de desempenho erro vetorial total,

$$TVE[n] = \sqrt{\frac{(\hat{X}_r[n] - X_r[n])^2 + (\hat{X}_i[n] - X_i[n])^2}{X_r[n]^2 + X_i[n]^2}}, \quad (1)$$

em que os subscritos r e i se referem à parte real e imaginária, respectivamente, do sincrofasor referência $X[n]$, e do sincrofasor medido $\hat{X}[n]$, no instante n ;

erro de frequência

$$FE[n] = f_{medido}[n] - f_{ref}[n], \quad (2)$$

e erro de taxa de variação de frequência

$$RFE = \frac{df}{dt}_{medido}[n] - \frac{df}{dt}_{ref}[n]. \quad (3)$$

Os algoritmos de estimação de sincrofasores são específicos para cada tipo de ensaio, conforme descrito nas subseções a seguir.

2.1.1. Ensaios estáticos

A norma [1] estabelece, primeiramente, um conjunto de ensaios nos quais um conjunto de testes específicos são realizados aplicando-se sinais de tensão e corrente em regime permanente. A cada novo

teste, um parâmetro do sinal é modificado, de forma a abranger as faixas de utilização especificadas para cada grandeza de influência:

- magnitude da tensão elétrica (10% a 120%) e corrente elétrica (10% a 200%);
- frequência fundamental ($f_0 \pm 5,0$ Hz);
- distorção harmônica (aplica-se somente uma componente harmônica até a de ordem 50, com 1% para PMU tipo P e 10% para PMU tipo M);
- interferência fora de banda (interarmônicos na faixa de 10 Hz até o segundo harmônico).

Em cada ensaio, são monitorados os níveis de TVE, FE e RFE, que devem atender aos critérios $TVE < 1\%$, $|FE| < 25$ mHz e $|RFE| < 0,4$ Hz/s (somente para tipo P).

Os algoritmos para estimação de sincrofasores e frequência são baseados em modelos paramétricos, conforme descritos em [3], cujos parâmetros são ajustados iterativamente de forma a melhor se ajustar aos dados amostrados. Com isso, pode-se identificar inclusive eventuais componentes harmônicas ou interarmônicas e então calcular o sincrofasor (relativo à frequência fundamental, por definição), bem como a frequência fundamental do sinal.

2.1.2. Ensaio dinâmico

No segundo conjunto de testes, as PMUs são submetidas a sinais dinâmicos, i.e., nos quais um ou mais parâmetros dos sinais são variáveis durante a realização de um teste. São eles:

- Largura de banda (modulação AM ou PM, com índices de modulação 0,1 e frequências de modulação na faixa de 0,1 Hz a 2 Hz);
- Rampa de frequência linear ($ROCOF = \pm 2,0$ Hz);
- Tempo de resposta a degraus de fase ($\pm 10^\circ$) e magnitude ($\pm 0,1 X_m$);

Para o caso de ensaios de largura de banda, o algoritmo utilizado para estimação de sincrofasores e frequência é escolhido em função do índice de modulação, conforme descrito em [4]. Nos testes de rampa de frequência, um algoritmo baseado em modelo paramétrico com aproximações sucessivas é aplicado, para estimar a taxa de variação real e os demais parâmetros do sinal, para então calcular os sincrofasores com base nestes parâmetros. De maneira similar, nos ensaios de tipo degrau, foram desenvolvidos recentemente diversos algoritmos para estimação da localização do degrau [3], a partir dos quais se pode optar por estimar os sincrofasores antes e depois do degrau, como em [4], ou realizar a sua estimação direta, conforme descrito em [2].

2.1.3. Ensaio de latência

Adicionalmente, são realizadas medições para determinar o tempo de latência (ou atraso) da medição de um sincrofasor, cujos limites máximos permitidos são especificados na norma [1]. Esse tempo é o período necessário para que uma PMU faça o processamento digital dos sinais de entrada, sendo medido pela diferença entre o instante registrado na etiqueta de tempo da medição e o instante em que o primeiro bit é disponibilizado na interface de comunicação da PMU.

3. Rastreabilidade

Para proporcionar rastreabilidade ao SI, o sistema deve ser calibrado periodicamente em tensão elétrica (V) e corrente elétrica (A), nas condições previstas em cada ensaio. Para tal, é necessário realizar medições sincronizadas entre o calibrador Fluke e o sistema PXI, através de transdutores de tensão e corrente, conforme mostrado na figura 1. Por essa razão, uma frente importante do trabalho é a caracterização de tais transdutores em ampla faixa de frequência.

3.1. Medições sincronizadas

Conforme ilustrado na Figura 1, a referência temporal é provida via sinal de GPS para ambos os sistemas, que desta forma ficam coerentes ao segundo do UTC (Universal Time Code). As medições de sinais são realizadas pelo módulo digitalizador do PXI, em tensões de até 10 V, a depender do ensaio e

da relação dos transdutores. Assim, é necessário manter o digitalizador do PXI calibrado em tensão elétrica.

3.2. Caracterização de divisores resistivos de tensão

Os transdutores utilizados em conjunto com o sistema de medição sincrofasorial devem acondicionar os sinais de tensão e corrente em sinais adequados ao amostrador. Para isso, devem fornecer em suas saídas sinais de tensão da ordem de 1 V a 10 V, proporcionais aos sinais de entrada. No caso da medição das tensões elétricas, são utilizados divisores resistivos de tensão, por sua linearidade e comportamento na faixa de frequência dos sinais medidos. Na utilização desses transdutores, é importante caracterizá-los adequadamente, de forma a obter os parâmetros necessários para realizar a correção dos valores medidos e estimação adequada das incertezas de medição. A metodologia de caracterização, especialmente em relação ao comportamento dos divisores de tensão na faixa de frequência de utilização foi tema de vários artigos do grupo de trabalho [5-7].

Além dos parâmetros relacionados ao comportamento na frequência, outros parâmetros são importantes, tais como a variação da razão em relação à tensão aplicada, a variação da razão em relação à temperatura, a variação de fase em relação à carga conectada na saída, o tempo de estabilização, a estabilidade temporal da razão e a impedância de entrada e de saída. Os aspectos construtivos dos transdutores também devem ser avaliados, e seu design deve elaborado de maneira a minimizar efeitos indesejados, como fugas de corrente, e influências parasitas.

Atualmente, estão em fase de projeto, construção e testes alguns conjuntos de divisores de tensão resistivos com diferentes designs, na faixa de 10 V a 1000 V, a serem caracterizados para utilização no sistema de medição sincrofasorial.

3.3. Caracterização de shunts

Para utilização do *shunt* como transdutor de corrente, na rastreabilidade do sistema de medição de sincrofasores, é necessário que este tenha sua impedância caracterizada em termos de amplitude e fase.

O Inmetro caracteriza *shunts* de corrente através de seu sistema de medição de transferência CA-CC, determinando a dependência da frequência da impedância dos *shunts* de corrente em amplitude. Porém, o método de resistência CC e diferença CA-CC não pode prover uma medição do ângulo de fase porque esta informação é perdida durante a conversão termoelétrica pelo conversor térmico. Sendo assim, para medições de fase em impedâncias acima de 10 Ω , o Laboratório de Metrologia em Padronização Elétrica (Lampe) provém rastreabilidade aos laboratórios do Inmetro através de uma ponte digital de impedância (Digbrid) [7].

Para caracterização em fase de shunts de corrente tipo “gaiola” com impedância abaixo de 10 Ω , em 2021, foi utilizado no Inmetro um método desenvolvido pelo RISE, Instituto Nacional de Metrologia da Suécia, que possibilitou a caracterização do ângulo de fase de *shunts* a partir de medidas de diferença de fase de três *shunts* geometricamente iguais utilizando uma ponte digital de razão de impedância e os resultados dos *shunts* calibrados para resistência em corrente contínua (CC) [8].

4. Conclusão

Nos últimos anos, como resultado dos esforços de pesquisadores de diversos laboratórios, foi possível desenvolver um sistema de referência nacional para medições de sincrofasores, em atendimento a uma importante demanda do setor elétrico brasileiro. O domínio da tecnologia de medições sincronizadas, em amplas faixas de frequência e em ambiente digital permite, além disso, o vislumbre de importantes perspectivas para novos desenvolvimentos, sobretudo aqueles relacionados a qualidade de energia, subestações digitais e redes elétricas inteligentes. Tal infraestrutura, além de proporcionar o fornecimento de serviços metrológicos de ensaios de tipo, auxiliam também a indústria e a academia no desenvolvimento de novos produtos relacionados a essa tecnologia.

Referências

- [1] IEEE/IEC International Standard - Measuring relays and protection equipment - Part 118-1: Synchrophasor for power systems – Measurements
- [2] MARTINS, MARCELO B.; DE BARROS E VASCONCELLOS, RENATA T. ; ESQUEF, PAULO A. A. . Models for Synchrophasor With Step Discontinuities in Magnitude and Phase: Estimation and Performance. *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, v. 68, p. 2007-2014, 2019.
- [3] MARTINS, MARCELO B.; DE BARROS E VASCONCELLOS, RENATA T. ; ESQUEF, PAULO A. A., “Step change detection based on analytic signal for PMU calibrators,” in 2019 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), 2019.
- [4] Y.-h. Tang, G. N. Stenbakken, and A. Goldstein, “Calibration of phasor measurement unit at NIST,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, no. 6, pp. 1417–1422, 2013.
- [5] L. A. A. de Souza, M. V. V. Pinto, M. B. Martins and A. C. S. Lima, "Modeling of a Resistive Voltage Divider by Rational Functions: Uncertainty Evaluation," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-8, 2021, Art no. 1011208, doi: 10.1109/TIM.2020.3047956.
- [6] L. A. A. Souza, R. T. de Barros e Vasconcellos, A. C. S. de Lima and M. B. Martins, "Metrological analysis of voltage transducers under multi-harmonic signals," *2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM)*, Denver, CO, USA, 2020, pp. 1-2, doi: 10.1109/CPEM49742.2020.9191867.
- [7] R. T. de Barros e Vasconcellos, V. R. de Lima, W. G. Kürten Ihlenfeld and F. d. Silveira, "Coaxial and Digital Impedance Bridges for Capacitance Measurements at the nF Range," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 66, no. 6, pp. 1553-1559, June 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2662498.
- [8] R. R. N. Zampilis, M. V. V. Pinto, L. A. A. de Souza, G. M. Geronymo and R. P. Landim, "Method for Validation of Absolute Phase Angle Characterization in Wideband Current Shunts," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-7, 2022, Art no. 1502107, doi: 10.1109/TIM.2022.3174269.