

PLATAFORMA DE TESTES PARA ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

FLAVIO LORI GRANDO*, GUSTAVO WEBER DENARDIN*, MIGUEL MORETO†

* *Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)*
Pato Branco, PR, Brasil

† *Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)*
Florianópolis, SC, Brasil

Emails: flavio.grando.eng@gmail.com, gustavo.denardin@gmail.com, miguel.moreto@ufsc.br

Abstract— This paper presents the development of a platform for automatically testing of Phasor Measurement Units (PMU). The objective is to build a multitasking platform for testing in accordance with the Synchrophasors Measurement Standard IEEE C37.118.1-2011. The platform is managed by a personal computer with visual interface that allows the user to configure signal parameters and application of automated testing and may, or not may, follow the IEEE standard. First, the application of pattern tests, aim the development of algorithms and architectures for PMUs. In the future, the goal is to device certification. Until this stage of development, it was implemented only in the steady-state tests. A PMU was subjected to tests for results exemplification.

Keywords— test platform, synchrophasors measurement, PMU.

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma para aplicação de testes em Unidades de Medição Fasorial Sincronizada (PMU) de forma automática. O objetivo é a construção de uma plataforma multi tarefas para realização de testes em acordo com a norma de medição de sincrofases IEEE C37.118.1-2011. A plataforma é gerenciada por um computador pessoal com interface visual que permite ao usuário a configuração dos parâmetros do sinal e aplicação de testes automáticos, podendo ou não, seguir o padrão normatizado. Primeiramente, a aplicação de testes padronizados visa o desenvolvimento de algoritmos e arquiteturas para PMUs. Futuramente, objetiva-se a certificação dos dispositivos. Até esta fase do desenvolvimento, foram implementados apenas os testes de estado estacionário. Uma PMU foi submetida aos testes para exemplificação de resultados.

Palavras-chave— plataforma de teste, medição de sincrofases, PMU.

1 Introdução

A tecnologia de medição fasorial sincronizada tem permitido um novo paradigma na observabilidade do sistema elétrico de potência (SEP), possibilitando conhecer o sistema do ponto de vista dinâmico. Essa tecnologia fornece medidas fasoriais com alta precisão e resolução de forma sincronizada. O sincronismo das medidas permite conhecer a diferença de fase das tensões complexas entre os terminais do sistema, mesmo distantes geograficamente. O sincronização é obtido através de um pulso por segundo (PPS), emitido a partir dos satélites do Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Assim, Unidades de Medição Fasorial (PMUs) extraem medidas de magnitude, ângulo e frequência dos sinais senoidais em diferentes pontos do sistema de forma sincronizada. As informações são formatadas junto com etiquetas de tempo, relativas ao instante em que as medidas foram obtidas. Por fim, são enviadas à um Concentrador de Dados (PDC), compondo assim, um Sistema de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS). Portanto, a PMU é o elemento chave neste sistema, sendo responsável pela coleta de informações sobre a rede.

A estrutura genérica de uma PMU é mostrada na Figura 1. Este dispositivo é composto por fil-

tros *anti aliasing*, conversor analógico-digital, receptor GPS, oscilador, microprocessador e transceptor de comunicação para transmissão dos dados.

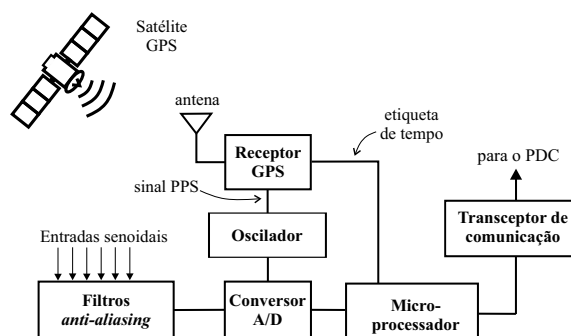


Figura 1: Estrutura genérica de uma PMU.

O receptor GPS tem papel fundamental nesse dispositivo, sendo responsável pelo sincronismo das medidas que por meio do sinal PPS aciona o conversor A/D e também proporcionando a etiqueta tempo de acordo com o Tempo Universal Coordenado (UTC). O oscilador assume papel secundário, fornecendo o pulso em caso de ausência de satélites visíveis por parte do receptor.

Para padronizar o funcionamento dos dispositivos e estabelecer critérios qualitativos relativo as informações geradas pela PMU, a IEEE lançou

uma norma técnica para medição de sincrofasores (fasores sincronizados), intitulada IEEE Std C37.118.1-2011 - *Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems* (IEEE, 2011).

A norma IEEE C37.118.1-2011 define medições de sincrofasores, frequência e taxa de variação de frequência para todas as condições de operação. Ela especifica testes para avaliar as medidas e requisitos de erro para cumprimento em condições de estado estacionário e dinâmico (IEEE, 2011).

Devido ao processo trabalhoso e complexidade dos testes, tem havido esforços por partes de  g ncias nacionais, empresas privadas e pesquisadores em desenvolver métodos e plataformas para teste e calibração de PMUs (Moraes et al., 2012; h. Tang et al., 2013; Poglian  et al., 2013; Gurusinghe et al., 2014). De acordo com Biswas et al. (2015), métodos atuais de teste em PMUs envolvem pelo menos uma das seguintes desvantagens:

- envolve complexos equipamentos de teste;
- requer pessoal especializado e treinado para conduzir e supervisionar os testes;
- a metodologia é trabalhosa e demanda tempo devido os testes serem executados manualmente;
- possui custos elevados;

Por estes motivos, encontra-se em desenvolvimento uma plataforma multi tarefas para realização de testes automáticos em acordo com a norma IEEE C37.118.1-2011. Primeiramente, a aplicação de testes padronizados visa o desenvolvimento de algoritmos e arquiteturas para PMUs. Futuramente, objetiva-se a certificação dos dispositivos.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta os requisitos fundamentais do sistema de teste. A seção 3, apresenta a estrutura do sistema proposto, compreendendo em *hardware* e *software*. A seção 4 apresenta exemplos de testes e a seção 5, traz as conclusões.

2 Requisitos do Sistema de Teste

A norma IEEE C37.118.1-2011 sugere que um sinal seja sintetizado para fins de teste e calibração (IEEE, 2011). A sintetização de um sinal permite reproduzir todas as condições exigidas pela norma e também conhecer as medidas de referência para comparação com as medidas estimadas pela PMU.

No entanto, alguns pré requisitos de um sistema de teste devem ser observados para avaliação de PMUs. Os principais requisitos são descritos a seguir e divididos em três partes: sincronismo, exatidão e processamento digital de sinais em tempo real.

2.1 Sincronismo

Como a PMU mede sinais do sistema trifásico em corrente alternada, é necessário um dispositivo para geração de sinais senoidais com pelo menos 3 canais analógicos, simulando o sistema trifásico. É necessário gerar, além de sinais senoidais, um pulso que simula o sinal PPS de forma sincronizada com os sinal senoidal, permitindo conhecer o exato instante de ocorrência do pulso em relação a senoide, como ilustra a Figura 2. Isso é necessário para obter o ângulo de referência que será comparado com o ângulo estimado pela PMU.

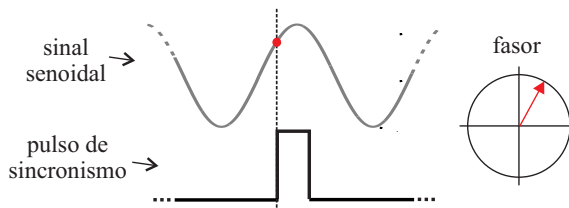


Figura 2: Ilustração dos sinais PPS e senoidal.

O pulso pode ser gerado através de um canal analógico ou digital, desde que obedeça ao critério de sincronismo em relação as senoides trifásicas.

2.2 Precisão

O principal critério estabelecido pela norma é o Erro Total Vetorial (TVE), que é o método utilizado para avaliar a precisão das informações geradas pela PMU. O TVE combina em uma única medida os erros de magnitude e fase do fasor estimado como demonstrado no círculo unitário da Figura 3.

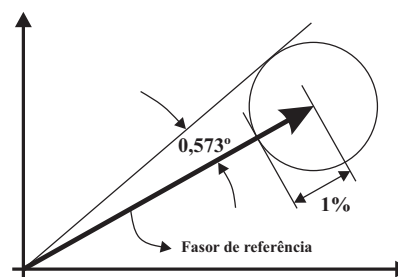


Figura 3: O critério TVE.

De acordo com o padrão, o TVE máximo permitido   de 1%, o que significa que quando o erro de fase é nulo, o erro máximo de magnitude admitido é 1 %. Por outro lado, quando o erro de magnitude é nulo, o erro de fase máximo deve ser abaixo de 0,573  (IEEE, 2011).

Um  ngulo de 0,573  representa uma defasagem de 26,5 às no sinal senoidal para o sistema 60 Hz, e 31,8 às para o sistema 50 Hz. Isso significa, que a precisão temporal dos canais analógicos para geração do sinal deve ter precisão na ordem

microsegundos enquanto que a precisão de amplitude deve ser, obrigatoriamente, menor que 1 %.

2.3 Processamento em Tempo Real

Geradores de função convencionais são capazes de gerar sinais senoidais simples e em condição estacionária. No entanto a norma prevê testes de condição dinâmica, os quais correspondem em situações de rampa, degrau e modulação. Até mesmo alguns testes de estado estacionário exigem a combinação de múltiplas senoides, como é o caso do teste de distorção harmônica. Dessa forma, é necessário um sistema de processamento de sinais em tempo real para gerar sinais com as variações previstas pela norma e dentro de um intervalo de tempo determinístico.

Mesmo nos testes mais comuns de condição estacionária, é necessária a verificação dentro de uma faixa de operação. Isso implica que o sinal deve ser sucessivamente reconfigurado para obter as medidas dentro da faixa de operação pretendida. Portanto, faz-se necessário um sistema de gerenciamento para automatização do processo.

Os testes implementados até esta fase do desenvolvimento, correspondem aos testes de estado estacionário descritos na Tabela 1. A norma classifica os testes em dois tipos: classe P em alusão a proteção e classe M em alusão ao monitoramento. Porém, isso não significa que uma ou outra é mais adequada para aplicação pretendida.

Tabela 1: Testes de estado estacionário de acordo com a IEEE Std C37.118.1-2011.

Teste	Faixa de variação a partir da nominal	
	Classe P	Classe M
Magnitude	80 a 120%	10 a 120%
Ângulo	$\pm 180^\circ$	
Frequência	± 2 Hz	± 5 Hz
Distorção harmônica	2 ^a a 50 ^a com 1% de amplitude	2 ^a a 50 ^a com 10% de amplitude
Interferência fora de banda (senoidal)	não se aplica	até a 2 ^a harmônica com 10% de amplitude

3 Estrutura do Sistema Proposto

A plataforma é composta por um dispositivo de aquisição de dados (DAQ) para geração dos sinais e um computador pessoal com *software* LabVIEW responsável pelo gerenciamento do sistema. O esquema de ligação para os testes pode ser visualizado na Figura 4. O dispositivo DAQ é responsável por gerar senoides defasadas em 120° (simulando um sistema trifásico) e mais o pulso que simula o sinal PPS do receptor GPS.

No computador, desenvolveu-se um aplicativo em ambiente LabVIEW para processamento dos dados e controle do DAQ. Atualmente o aplicativo

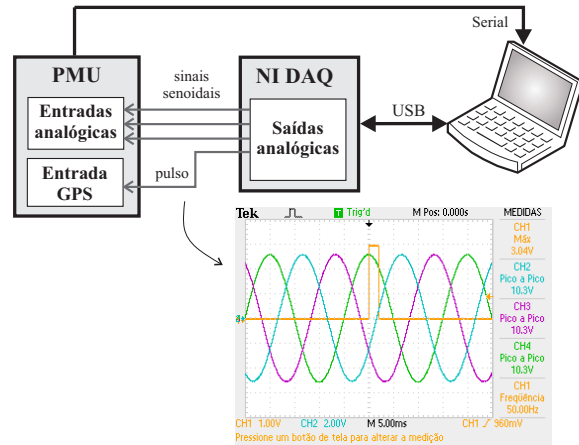


Figura 4: Estrutura do sistema de teste.

não possui suporte ao protocolo de comunicação IEEE C37.118.2, que é o protocolo padrão para comunicação entre dispositivos de medição fasorial sincronizada. Portanto, para receber os dados da PMU no computador, utiliza-se o *software* livre openPDC (Golshani et al., 2012).

3.1 Hardware de Geração de Sinais

O dispositivo DAQ corresponde a um modelo USB-6259 da National Instruments. Este modelo possui 48 portas digitais de entrada e saída (I/O), 2 contadores (*timers*), 16 entradas analógicas e 4 saídas analógicas. A máxima taxa de amostragem para geração de sinais é 2,86 MS/s com um canal e 1,25 MS/s em modo multicanais (Nat, 2014).



Figura 5: Dispositivo DAQ para geração dos sinais.

Nesta fase de desenvolvimento, são utilizadas apenas as 4 saídas analógicas, 3 delas para gerar as senoides e uma para gerar o pulso. As saídas analógicas possuem resolução de 16 bits e operam em uma faixa de tensão entre ± 10 V. A exatidão é de $\pm 2,08 \mu\text{V}$, o que representa uma incerteza de $2,08 \cdot 10^{-5}\%$. A precisão temporal é de 50 ns, o que representa uma incerteza de $0,0009^\circ$ no sistema 50 Hz ou $0,00108^\circ$ no sistema 60 Hz. Portanto, esses níveis de precisão tornam esse dispositivo adequado para testes de conformidade com a norma.

O fator negativo deste *hardware* é a limitação no nível de tensão (± 10 V). Porém, se houver a

necessidade de gerar sinais com amplitude maior, basta substituir o *hardware* por outro produto do mesmo fabricante, pois a programação através do *software* LabVIEW é a mesma. Basta respeitar a máxima taxa de amostragem de cada equipamento.

3.2 Software de Gerenciamento

No computador, foi desenvolvido um aplicativo em ambiente LabVIEW apresentado na Figura 6. Neste aplicativo são realizados todos os comandos respectivos a geração dos sinais. Os controles encontram-se do lado esquerdo, no centro da tela os indicadores da geração atual e ao lado direito, um gráfico apresenta o ciclo do sinal que esta sendo gerado e abaixo, um diagrama fasorial do fasor de referência e fasor estimado.

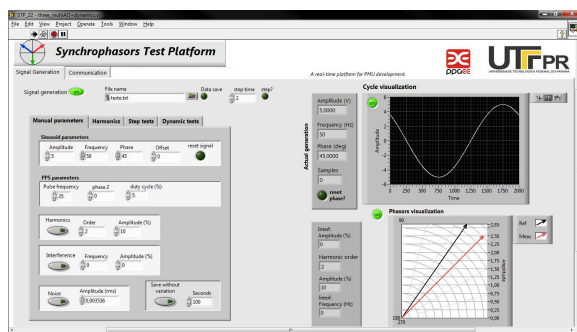


Figura 6: Aplicativo de teste desenvolvido em ambiente LabVIEW.

Os controles do lado esquerdo da tela, apresentados na aba *Manual parameters* permitem a configuração do sinal senoidal e o pulso que simula o sinal PPS. Além disso pode ser configurado interferências no sinal fundamental, como harmônicas, ruído ou sinal senoidal de qualquer frequência. A aba *Harmonics* e *Dynamic tests* são reservadas para desenvolvimentos futuros. Na sequência, pela aba *Step tests*, apresentada na Figura 7, é possível aplicar variações automáticas em todos os parâmetros do sinal fundamental e de interferências. Para isso, é estabelecido um parâmetro inicial, final, intervalo de variação e duração de cada intervalo. Assim, é possível fazer uma varredura entre os valores inicial e final. Configurando esses parâmetros para faixa de operação correspondente a da norma, é possível aplicar todos os testes de estado estacionário.

Naturalmente, tais variações correspondem a degraus, o que não é desejável nas condições de estado estacionário. Portanto, as medidas logo após o degrau devem ser desconsideradas na análise.

3.3 Integração Hardware-Software

Para obtenção dos dados experimentais apresentados nesse trabalho, o LabVIEW foi executado em

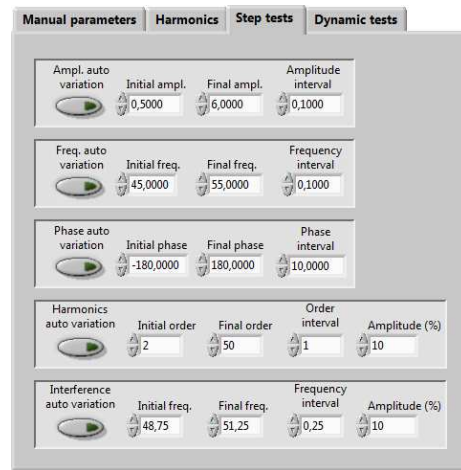


Figura 7: Aba para configuração dos testes automáticos.

um computador pessoal (PC) com processador Intel Pentium Dual Core T4300 de 2.1 GHz, memória RAM de 4 GB e sistema operacional Windows 7 de 64 bits.

As amostras geradas pelo conversor D/A do dispositivo DAQ são processadas no PC através do LabVIEW. O *software* calcula uma quantidade de amostras para geração do sinal e as envia ao DAQ através da conexão USB. O dispositivo DAQ possui um *buffer* de dados correspondente ao tamanho da janela configurada no *software*. Isso corresponde a um intervalo de geração de tempo finito. Quando configurado para geração contínua, o *buffer* é realimentado com as próprias amostras nele contido, a menos que novas amostras sejam enviadas pelo *software*.

Como é necessário aplicar sucessivas variações no sinal, durante a geração de um intervalo de amostras o *software* está calculando o conjunto de amostras para o próximo intervalo. Portanto, para operação correta dos testes é necessário processar as amostras antes que a leitura do *buffer* pelo conversor D/A, chegue ao fim. Para garantir o processamento e ao mesmo tempo atender os requisitos de amostragem (distribuição de amostras igualitária no período do pulso), são geradas 100 mil amostras a uma taxa de 100 kS/s, correspondendo a intervalos de 1 segundo.

Tradicionalmente, o cálculo das amostras é com a função seno dentro de um laço *for* e cada iteração calcula uma amostra com período pré determinado. Porém, o LabVIEW possui blocos específicos para geração de formas de onda (*sine waveform*), onde a principal vantagem é operação em modo regenerativo.

O modo regenerativo calcula automaticamente as amostras para uma janela configurada, independente da frequência do sinal. Assim, em frequências diferentes de valores inteiros (60,5 Hz por exemplo), o final da janela corresponde a um segmento de ciclo. Utilizando o método tradi-

cional, o processo é reiniciado com valores errados. Nos blocos de geração de forma de onda, as amostras corretas são automaticamente calculadas, como ilustra a Figuras 8.

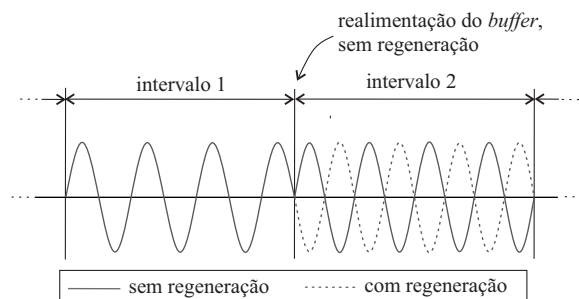


Figura 8: Geração de sinal com modo regenerativo.

Além disso, não   necessário obedecer o critério de distribuição igualitária de amostras por ciclo do sinal (valores inteiros). Isso permite a aplicação de teste de frequência com variações tão sensíveis quanto o usuário desejar.

4 Resultados

Para exemplificar os resultados permitidos pela plataforma, selecionou-se dois testes onde um deles cumpre com os requisitos da norma e o outro não.

O primeiro deles é o teste de ângulo, onde a faixa de operação deve ser -180°   $+180^\circ$, ou seja, todo ângulo possível. Portanto, o teste é realizado variando o ângulo do sinal com resolução de 5° e adquirindo 25 medidas, como apresenta a Figura 9. Com isso, são adquiridas 1825 medidas em um teste com duração de 2,5 minutos.

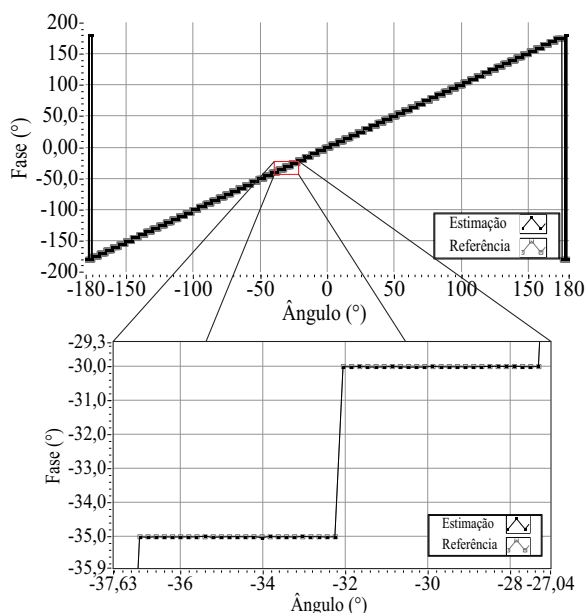


Figura 9: Teste de ângulo: valores estimados e valores de referência.

Extraindo o erro destas medidas, é obtido o gráfico da Figura 10. Neste caso, o erro máximo foi de $0,054^\circ$, cerca de 10 vezes abaixo do limite de $0,573^\circ$ da norma.

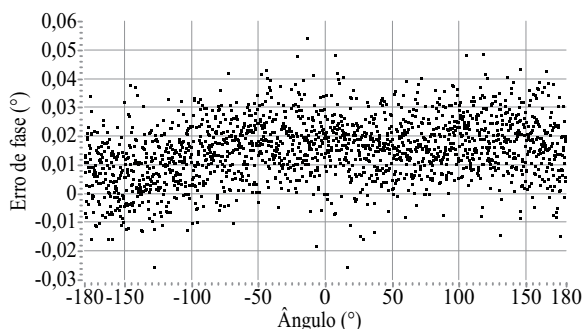


Figura 10: Erro de fase para o teste de  ngulo.

Com um erro de magnitude também reduzido (máximo 0,068 %) o TVE  , conseqüentemente, abaixo de 0,1% como apresenta a Figura 11.

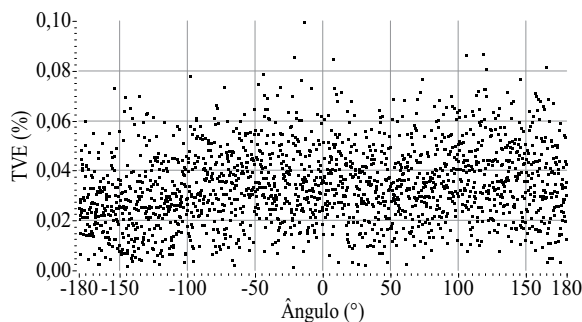


Figura 11: TVE para o teste de  ngulo.

Todos os testes de estado estacionário, exceto o de interferência fora de banda, apresentam comportamento semelhante com erros igualmente distribuídos por toda faixa de variação e uma dispersão que não ultrapassa 0,1 % de TVE. O teste de interferência fora de banda, corresponde a uma interferência senoidal com 10 % de amplitude em relação ao sinal fundamental e com frequência que varia de valores abaixo da nominal até a 2  harmônica. O TVE é apresentado na Figura 12. Neste caso, foram obtidas 5000 medidas fasoriais em um teste com duração de 3 minutos.

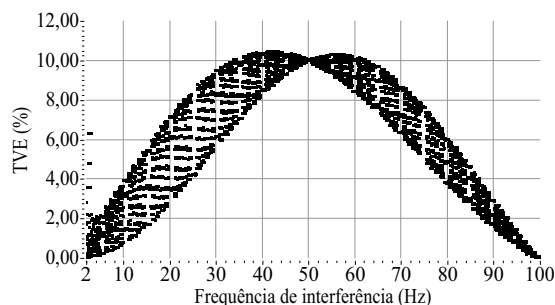


Figura 12: TVE para o teste de interferência fora de banda.

Neste caso, o teste foi realizado com frequência nominal de 50 Hz, portanto, a 2ª harmônica corresponde a 100 Hz. Observa-se que o TVE ultrapassou o critério de 1 % chegando a 10,49 %. Analisando os erros de magnitude e ângulo separadamente, apresentados nas Figuras 13 e 14, pode-se concluir que o elevado TVE é em decorrência apenas do erro de fase, chegando ao máximo de 6° enquanto que o erro máximo de magnitude é de apenas 0,1 %.

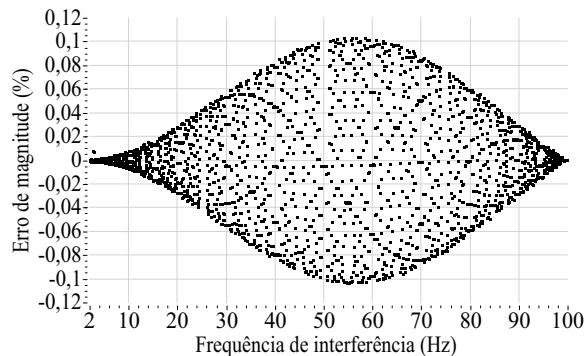


Figura 13: Erro de magnitude para o teste de interferência fora de banda.

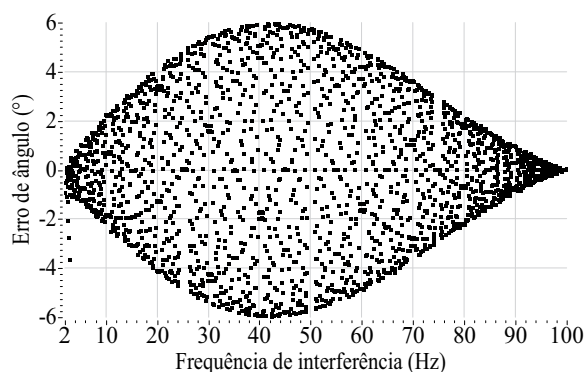


Figura 14: Erro de fase para o teste de interferência fora de banda.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou os desenvolvimentos de uma plataforma de teste automatizada para dispositivos de medição fasorial sincronizada. O processamento de sinais via *software*, permite criar sinais nas mais variadas formas, o que seria inviável através de geradores de função convencionais. Isso também viabilizou a implementação de todos os testes de estado estacionário previstos pela norma IEEE C37.118.1. A utilização do modo regenerativo permite utilizar uma taxa de amostragem fixa pra geração de sinais senoidais com valores de frequência diferentes de inteiros e sem a necessidade de processamento adicional.

Uma vez que os testes não são aplicados manualmente, qualquer usuário pode operar a plata-

forma, isto é, não há necessidade de operador especializado. Além disso, a automatização dos testes permite coletar milhares de medidas em poucos minutos, o que implica em economia de tempo e aumento da confiabilidade. Desenvolvimentos futuros pretendem a implementação dos testes de condição dinâmica previstos pela norma além de recursos para análise dos resultados dos testes e geração de curvas de calibração de forma automática.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq, FINEP e Fundação Araucária pelo suporte financeiro.

Referências

- Biswas, S., Srivastava, A., Park, J. and Castaneda, J. (2015). Tool for testing of phasor measurement units: Pmu performance analyzer, *Generation, Transmission Distribution, IET* **9**(2): 154–163.
- Golshani, M., Taylor, G., Pisica, I. and Ashton, P. (2012). Laboratory-based deployment and investigation of pmu and openpdc capabilities, *AC and DC Power Transmission (ACDC 2012), 10th IET International Conference on*, pp. 1–6.
- Gurusinghe, D., Rajapakse, A. and Narendra, K. (2014). Testing and enhancement of the dynamic performance of a phasor measurement unit, *Power Delivery, IEEE Transactions on* **29**(4): 1551–1560.
- h. Tang, Y., Stenbakken, G. N. and Goldstein, A. (2013). Calibration of phasor measurement unit at nist, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **62**(6): 1417–1422.
- IEEE, S. A. (2011). Ieee standard for synchrophasor measurements for power systems, *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)* pp. 1 –61.
- Moraes, R. M., Hu, Y., Stenbakken, G., Martin, K., Alves, J. E. R., Phadke, A. G., Volskis, H. A. R. and Centeno, V. (2012). Pmu interoperability, steady-state and dynamic performance tests, *IEEE Transactions on Smart Grid* **3**(4): 1660–1669.
- Nat (2014). *High-Speed M Series Multifunction DAQ for USB - 16-Bit, up to 1.25 MS/s, Integrated BNC Connectivity*.
- Pogliano, U., Braun, J., Voljc, B. and Lapuh, R. (2013). Software platform for pmu algorithm testing, *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* **62**(6): 1400–1406.