



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPC/12
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO EM SISTEMAS DE POTÊNCIA
- GPC**

LABORATÓRIO DE MEDIÇÃO FASORIAL SÍNCRONA – FOCO E PRINCIPAIS LINHAS DE ATUAÇÃO

José Eduardo R. Alves Jr (*)
CEPEL

Cesar J. Bandim
CEPEL

Ricardo P. D. Ross
CEPEL

Julio C. R. dos Santos
CEPEL

Marco A. M. Rodrigues
CEPEL

RESUMO

Este artigo apresenta os conceitos básicos de medição sincrofásorial não destacando os tipos de laboratórios relacionados com o tema. Os principais laboratórios de medição fasorial sincronizada atuais são relacionados. Uma visão geral do Laboratório de Medição Fasorial (LabPMU), em implantação no CEPEL, é detalhada situando-o também segundo a classificação apresentada e comparando-o com os principais laboratórios mencionados. O artigo apresenta uma prova de conceito de uma das facilidades em desenvolvimento no laboratório relativa ao interfaceamento dos resultados das simulações digitais realizadas pelo programa ANATEM com os concentradores de dados visando o teste de aplicativos desenvolvidos pelo usuário do laboratório. Para tanto é utilizado um estudo de caso envolvendo o Sistema Interligado Nacional.

PALAVRAS-CHAVE

Laboratório de Medição Fasorial, Unidade de Medição Fasorial, Concentrador de Dados de PMUs, Sistema Elétrico de Potência.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional pode ser considerado uma grande máquina, operada de forma a permitir o fornecimento de energia com qualidade para os consumidores. Ele compreende uma extensa rede elétrica, geograficamente espalhada pelo país, consistindo de geração, transmissão, distribuição e consumidores com diferentes características. Sua crescente complexidade demanda o aprimoramento das técnicas de monitoração, controle e proteção através de novas tecnologias. O sistema de medição sincrofásorial, composto por unidades de medição fasorial (PMU – Phasor Measurement Unit), concentradores de dados, redes de comunicação para fluir os dados e aplicativos que executam o tratamento destes dados se constituem em uma destas ferramentas tecnológicas à disposição dos operadores do sistema elétrico.

1.1 Conceituação

A medição sincrofásorial consiste no cálculo de valores obtidos das grandezas elétricas básicas (tensão e corrente) e cujo principal diferencial está na referência única de tempo, dada pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS), o que permite correlacionar com precisão valores de módulo e ângulo em sistemas de potência de grande porte. O equipamento fundamental nesse tipo de medição é a Unidade de Medição Fasorial (Phasor Measurement Unit - PMU) que consiste em um equipamento capaz de medir essas grandezas elétricas básicas, fornecendo como resultado valores de magnitude, ângulo, frequência e variação da frequência, formatadas em um fluxo de dados definido pela norma IEEE C77.118 (1). Esses dados por sua vez podem ser disponibilizados para aplicativos

(*) CEPEL – Av. Horacio Macedo, n° 354 – CEP 21.941-911 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6012 – Fax: (+55 21) 2598-6330 – Email: alves@cepel.br

computacionais cujo objetivo é permitir uma melhor visibilidade dos fenômenos presentes no sistema elétrico de potência e, conseqüentemente, decisões operativas com maior segurança e flexibilidade. Este sistema, robusto e confiável de medição de grandes áreas (WAMS – Wide-Area Measurement System) é capaz de fornecer ao operador uma visão global da rede elétrica.

A figura 1 apresenta a arquitetura simplificada de um sistema de medição sincrofasorial associado a uma rede elétrica. Tal sistema compreende vários PMUs (unidades de medição fasorial), um PDC (concentrador de dados), a estrutura de telecomunicações e os aplicativos que usam os dados obtidos, disponibilizando resultados em centros de controle. Os fasores podem ser relacionados entre si, uma vez que estão sincronizados.

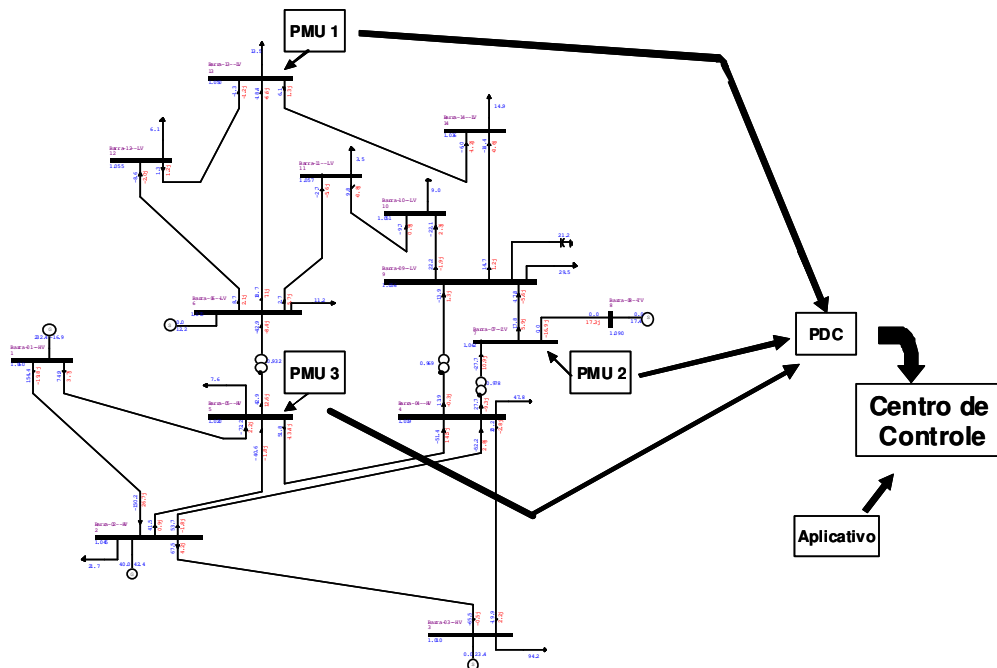


FIGURA 1 – Arquitetura simplificada de um sistema sincrofasorial.

O concentrador de dados fasoriais (PDC – Phasor Data Concentrator) coleta os dados de múltiplas PMUs ou de outros PDCs e desenvolve as seguintes funções principais: ordenamento cronológico dos dados, validação dos dados, recuperação de dados perdidos (quando necessário), compatibilização de taxas de amostragem (fasores por segundo) com eventual função de “down-sampling”, armazenamento histórico dos dados e exportação visando algum aplicativo desenvolvido usando-se dados sincrofasoriais. Há ainda de considerar a capacidade do PDC de compatibilizar diferentes possíveis protocolos de recebimento e exportação de dados fasoriais.

1.2 Histórico

O primeiro protótipo de PMU foi desenvolvido pela Universidade Virginia Tech, nos Estados Unidos, no final da década de 80, por Arun Phadke (2). Em seguida, Jay Murphy, aperfeiçoou o equipamento no início da década de 90, obtendo a primeira realização comercial. Contudo, somente a partir do blecaute de 14 de Agosto de 2003, atingindo a região leste dos Estados Unidos e se estendendo até o Canadá (nordeste e meio oeste dos EUA e Ontário no Canadá) surgiu maior demanda pelo desenvolvimento desta tecnologia. Acredita-se que se o sistema sincrofasorial estivesse funcionando no dia 14 de Agosto de 2003, o blecaute poderia ter sido evitado. Enquanto, nos Estados Unidos, estima-se que existam mais de duas centenas de equipamentos com função exclusiva de PMUs instalados, estima-se que exista uma quantidade muito maior de equipamentos do tipo IED (Intelligent Electronic Devices), tais como relés digitais com a função PMU disponível. Até o fim de 2013, o NIST (National Institute of Standards and Technology) estimava a presença de mais de 50 modelos diferentes de equipamentos com função PMU de mais de 20 diferentes fabricantes (3).

1.3 Aplicações

Kesunovic (3) classifica as aplicações de PMUs segundo cinco diferentes áreas: estimação e visualização de estados, monitoramento em tempo real de estabilidade do sistema elétrico, avaliação de estabilidade envolvendo o uso de inteligência artificial e dados de PMUs e finalmente aplicações de detecção de faltas. Podem ser relacionadas ainda aplicações de detecção de ilhamento, monitoramento de diferenças angulares, monitoramento do carregamento de linhas de transmissão, aplicações de controle e finalmente avaliação “post-mortem” (análise após o desligamento ou o “blackout” do sistema). O NASPI (North American Synchrophasor Initiative) possui cadastrado em seu sítio (4) várias aplicações de PMUs destacando-se ferramentas de monitoramento de sistemas

elétricos para grandes áreas (Wide Area Monitoring Systems ou WAMS) envolvendo avaliação de estabilidade e ferramentas de concentração de dados fasoriais (softwares com função de PDCs).

As PMUs possuem banda de frequência superior aos sistemas de monitoramento tipo SCADA comuns das redes elétricas. A figura 2 ilustra este efeito. De fato, uma PMU que trabalha a 60 fasores por segundo, teoricamente pode chegar a 30 Hz de banda, bem superior à banda de frequências de oscilações eletromecânicas inter-áreas (5). Desta forma, as PMUs permitem a avaliação de oscilações em tempo real.

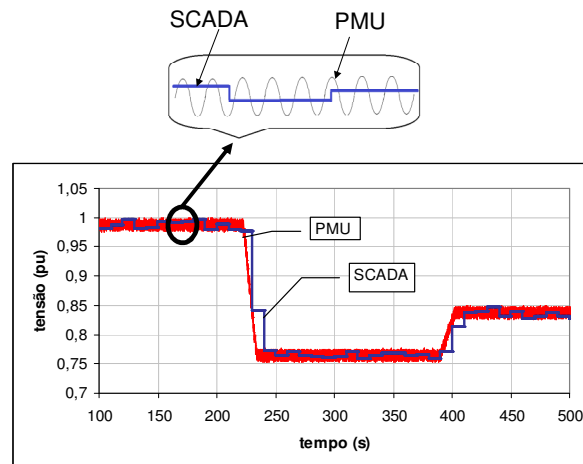


FIGURA 2 – Comparação entre PMUs e sistemas SCADA.

1.4 Normas

A primeira norma específica para medição fasorial síncrona foi a IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems de 1995 ou simplesmente IEEE 1344:1995. Esta norma introduziu algumas extensões na codificação de tempo do padrão IRIG-B para uso nos sincrofasores, entretanto, ela não definia um padrão para o cálculo dos sincrofasores, sendo portanto, pouco restritiva quanto ao desempenho das PMUs.

Em 2005, a IEEE 1344:1995 foi substituída pela IEEE C37.118:2005. Esta norma é muito mais detalhada que a anterior definindo padrões para medição, método de quantificação das medições, requisitos de teste e certificação para verificação da acurácia, e formato e protocolos de comunicação de dados em tempo real.

Em 2011 a IEEE C37.118:2005 foi revista e dividida em duas partes: IEEE C37.118-1:2011, referente à medição dos sincrofasores e IEEE C37.118-2:2011 referente à transmissão de dados. Esta revisão introduziu a classificação das PMUs em duas classes: M (medição) - voltada para medição em regime ("static tests") e P (proteção) - voltada para verificação do comportamento dinâmico ("dynamic tests"). Ela também especifica a frequência ou taxa de exteriorização dos valores fasoriais, sendo os intervalos correspondentes a 10, 12, 15, 20, 30 e 60 fasores por segundo para as redes elétricas com frequência de 60 Hz e 10, 25 e 50 fasores por segundo para as redes elétricas com frequência de 50 Hz. Em 2014, a norma IEEE C37.118-1:2011 teve alguns de seus requisitos alterados pelo documento normativo IEEE C37.118-1aTM:2014.

Dentre os ensaios especificados nestas normas podemos citar ensaios de exatidão das PMUs frente a degraus de ângulo, degraus de amplitude de tensão e de corrente, rampa em frequência, modulação em frequência e amplitude. Há ainda ensaios para verificar a exatidão das PMUs em presença de harmônicos.

2.0 - CLASSIFICAÇÃO DOS LABORATÓRIOS

Os laboratórios destinados a estudar os sistemas sincrofasoriais podem ser classificados em laboratórios de calibração ou avaliação de desempenho de equipamentos, voltados para PMUs, laboratórios para o estudo de PDCs e laboratórios para o estudo dos aplicativos.

2.1 Laboratórios para a verificação de desempenho de PMUs

Estes laboratórios utilizam-se de equipamento cujo esquema apresenta-se na figura 3a. Trata-se de um calibrador de PMUs capaz de realizar os ensaios previstos na norma IEEE (1). Este equipamento gera formas de onda de tensão e de corrente sincronizadas por GPS. Estes sinais são enviados para a PMU sob teste. Os fasores medidos são enviados de volta para o calibrador e comparados com uma PMU padrão, interna ao mesmo. O primeiro equipamento para a realização de calibração de PMUs (figura 3b) foi desenvolvido sob concessão do NIST

("National Institute of Standards and Technology" dos Estados Unidos) em conformidade com a norma IEEE C37.118-1-2011 e é rastreado por este instituto (6).

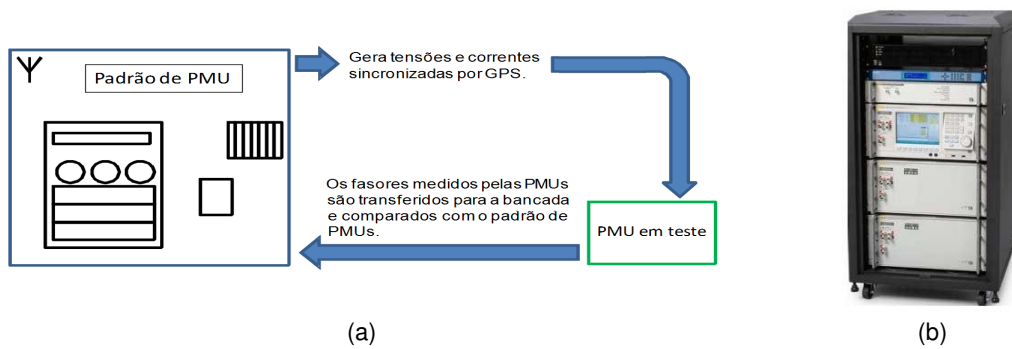


FIGURA 3 – Calibrador de PMUs: (a) Esquema - (b) PMU Cal System

2.2 Laboratórios para a verificação de desempenho de PDCs

Os laboratórios para a avaliação de PDCs devem realizar os seguintes testes (segundo o relatório PSERC (7) teste de ordenação cronológica dos dados, validação dos dados dos PDCs, perda de dados, latência máxima dos PDCs, verificação da conversão (down-sampling) da amostragem dos fasores, verificação dos protocolos utilizados pelos PDCs. Os testes devem ser realizados com e sem a emulação de latências de comunicação, para se tornar mais fidedignos. A figura 4 apresenta um esquema típico para realização dos testes. O laboratório deve ser capaz de gerar simulações de dados de redes elétricas. Estes dados devem ser então transformados em fasores, seja através de PMUs reais como de PMUs artificiais "fabricadas" por software (PMUs virtuais). Estes dados devem ser enviadas para o PDC através de protocolos padronizados. Devem ser simuladas latências que ocorrem na vida real. Uma referência para a avaliação de PDCs é a norma IEEE C37.244-2013 IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring, publicada em 05/10/2013 pelo IEEE (8).

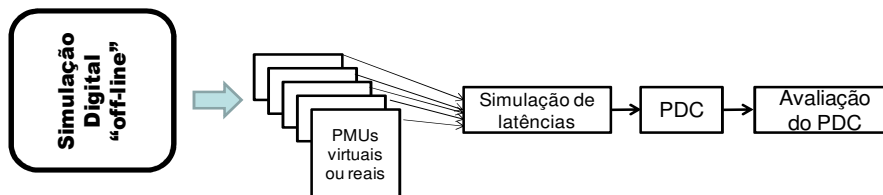


FIGURA 4 – Esquema para avaliação de PDCs.

Observa-se que se trata de laboratório essencialmente digital, com computadores de alto desempenho. Há a possibilidade de se usar simuladores digitais em tempo real também, para a geração dos sinais correspondentes à rede elétrica.

2.3 Laboratórios para a verificação de desempenho de aplicativos de PMUs

Os aplicativos para PMUs podem ser classificados em aplicativos de malha aberta e aplicativos de malha fechada. Estes últimos, mais avançados, envolvem o controle da rede por autômatos, sem a intervenção do operador. Os primeiros são já disponíveis comercialmente no mercado.

A figura 5 mostra um esquema típico de laboratório de testes de aplicativos em malha aberta. Neste caso, a geração de sinais utiliza um programa de simulação "off-line" (ATP, ANATEM, etc.) associado a um software de tratamento visando atender ao protocolo IEEE de comunicação (IEEE C37.118-2:2011). Desta forma tais programas funcionariam como PMUs virtuais, cujos sinais de saída são exportados para o PDC que os encaminha para a aplicação a ser avaliada. Os aplicativos desenvolvidos para análise dos dados de PMUs podem desta forma ser testados em ambiente computacional controlado.

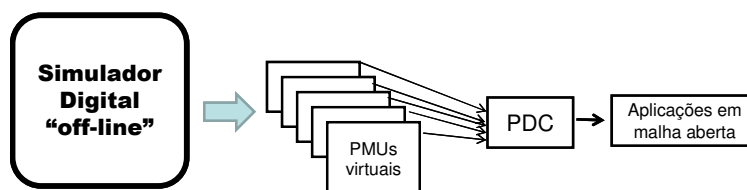


FIGURA 5 – Esquema para avaliação de aplicações em malha aberta.

A figura 6 mostra um esquema típico de laboratório de testes de aplicativos em malha fechada. O esquema é semelhante ao do caso anterior, exceto que a geração de sinais precisa ser feita por um simulador em tempo real, capaz de receber sinais de realimentação gerados pela aplicação em teste, particularmente, sinais de controle.

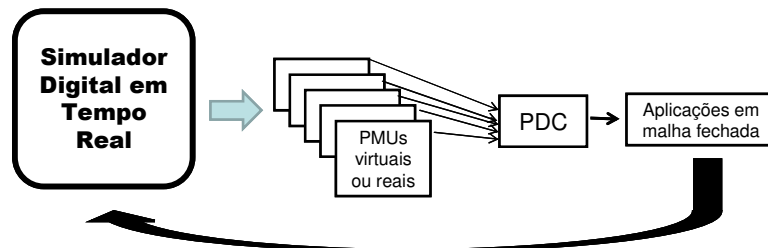


FIGURA 6 – Esquema para avaliação de aplicações em malha fechada.

2.4 Laboratórios no mundo para avaliação de sistemas sincrofasoriais

Realizou-se extensa pesquisa para verificar os laboratórios **para avaliação de sistemas sincrofasoriais** já existentes. Nos Estados Unidos destacam-se os laboratórios pioneiros do NIST (National Institute of Standards and Technology) (9), Bonneville Power Administration (10) e da Universidade Virginia Tech (11). O laboratório do NIST foi o pioneiro no que se refere à preocupação com rastreabilidade e cálculo de incertezas. O laboratório da Virginia Tech se destaca pelas pesquisas científicas desenvolvidas e o laboratório da BPA por ser o primeiro a reunir ensaios de laboratório e efeitos de campo. Mais recentemente (2013), o laboratório da Washington State University executou projeto com vários ensaios de PMUs, culminando em publicações bastante detalhadas (7,12). Na Europa destacam-se os laboratórios do KTH Royal Institute of Technology (13), Estocolmo, Suécia, na parte de pesquisa e desenvolvimento. Há ainda a iniciativa do Federal Institute of Metrology (Suíça) no sentido de construir uma bancada de calibração de PMUs (14).

3.0 - LABPMU

O Laboratório de Medição Fasorial Síncrona (LabPMU) do CEPEL, na Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, é uma infraestrutura laboratorial para apoio à realização de ensaios e pesquisa aplicada em PMUs. O projeto do laboratório está ocorrendo, com financiamento do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento – Bird (Banco Mundial), através do Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral (Projeto META) juntamente com o MME, que tem como objetivo contribuir para ampliar e consolidar os avanços dos setores de energia e mineração, apoiando a competitividade e o crescimento econômico sustentável do país. A figura 7 apresenta uma foto do LabPMU, quando da submissão deste artigo.



FIGURA 7 – Foto do LabPMU.

O objetivo principal do LabPMU é dotar o CEPEL de capacidade para atender às necessidades de realização de ensaios, estudos e pesquisa experimental envolvendo medição sincrofasorial. O LabPMU permitirá, também, apoio às atividades do Centro, no desenvolvimento e integração de novas metodologias e técnicas aos seus produtos que se encontram em uso no Sistema Interligado Nacional e em sistemas elétricos de potência em geral. No futuro, poderá realizar análises avançadas de modo a contribuir para a elaboração e aperfeiçoamento das especificações e normas técnicas nacionais e internacionais envolvidas, levando-se em conta as necessidades, características específicas e experiência adquirida no âmbito do sistema eletro-energético nacional.

O LabPMU oferecerá suporte tecnológico para aplicações de PMUs ao SIN, apoio ao ONS, às empresas transmissoras e aos fabricantes de equipamentos, no desenvolvimento do conceito de medição fasorial síncrona no Brasil, aplicável às suas condições; suporte à investigação de novas aplicações de medição fasorial; e apoio à

implementação de uma rede de PMUs no Brasil; ao desenvolvimento e integração de novas metodologias e técnicas aos produtos do CEPEL

O LabPMU será dotado de equipamentos para realizar a maioria das funções apresentadas para laboratórios de PMUs:

- Avaliação de equipamentos com função de PMU, buscando verificar sua adequação às normas pertinentes e eventuais problemas e ajustes necessários em hardware ou software antes da instalação em campo;
- Avaliação de softwares ou equipamentos de concentração de fasores mediante análise de seus resultados em ambiente controlado;
- Ensaios de novos aplicativos, antes de sua disponibilização para uso em campo. Os diversos modelos de PMUs poderão ser testados para estas aplicações previamente em situações típicas do Sistema Interligado Nacional, auxiliando no desenvolvimento de novas tecnologias e produtos.

Pode-se dividir os ensaios de referência realizados pelo LabPMU em três categorias:

- Verificação de performance na medição (ou ensaios de calibração);
- Verificação da interoperabilidade para diferentes PMUs;
- Verificação de performance para os PDCs e aplicativos.

Para a primeira categoria de ensaios, o LabPMU conta com um calibrador PMU Cal System que é até o momento único na América Latina. Para a segunda e terceira categorias de ensaios, o LabPMU conta com uma infraestrutura de rede de dados de alta velocidade (com acesso à internet) além de diversos postos de trabalho onde estão instalados PMUs de diferentes fabricantes, diferentes PDCs (concentradores de dados de PMUs) tais como o Open PDC e PDCs comerciais, além de ferramentas de teste desenvolvidas em LabView. Com relação aos laboratórios existentes, o LabPMU se destaca por possuir equipamentos para as diferentes linhas de atuação com relação a ensaios de referência para toda a cadeia sincrofásorial.

3.1 Estudo de caso visando a avaliação de aplicativos de PMUs

Com relação ao desenvolvimento de aplicativos computacionais está sendo desenvolvido no laboratório uma ferramenta computacional que permite o interfaceamento automático dos resultados das simulações digitais realizadas pelo programa digital ANATEM do CEPEL (15), programa de transitórios eletromecânicos mais utilizado no Brasil, com concentradores de dados (PDCs) visando o teste de aplicativos desenvolvidos pelo usuário no laboratório. A figura 8 apresenta um desenho esquemático de uma prova de conceito envolvendo um estudo de caso do Sistema Interligado Nacional simulado no ANATEM, de forma a se obter no PDC os dados da simulação para diagnóstico e desenvolvimento ou ajuste de aplicativos específicos. O aplicativo escolhido para teste foi o SOM (16) desenvolvido pelo CEPEL.

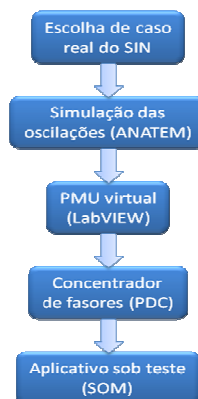


FIGURA 8 – Prova de conceito.

O aplicativo SOM (Monitoração de Oscilações do Sistema) tem como principal função monitorar o comportamento das oscilações de algumas grandezas elétricas nos pontos do sistema escolhidos pelo operador. Estas grandezas podem ser medições fasoriais brutas, filtradas ou calculadas. O algoritmo implementado pelo aplicativo (análise modal pelo método de Prony) extrai os parâmetros de amplitude, frequência característica e fator de amortecimento, que caracterizam as oscilações no sistema de potência, a partir de uma longa sequência de fasores. O SOM permite que o operador seja informado sobre condições de amortecimento críticas que podem levar o sistema de potência a um comportamento eletromecânico instável, resultando em desligamentos de LTs ou até mesmo eventos de maior gravidade.

Para demonstração da ferramenta ANATEM/PMU, utilizou-se como caso base o arquivo OUT2014.STB, referência de um caso de simulação com o ANATEM, obtido no portal do Operador Nacional do Sistema (17). Alterou-se o arquivo base para provocar um curto-circuito na barra de Angra 500kV, no instante 1,05 s com eliminação do mesmo através da abertura da linha entre Cachoeira Paulista e Angra 500kV em 1,2 s. Apresenta-se na figura 9 as

formas de onda da tensão e do ângulo na barra Angra 500 kV obtidas através do ANATEM. Cumpre destacar que o principal interesse para a análise de amortecimento está relacionado com o comportamento da rede interligada após a eliminação do curto-circuito de forma que os fasores obtidos pelo programa ANATEM, que só possuem componentes de seqüência positiva, são adequados para este tipo de verificação

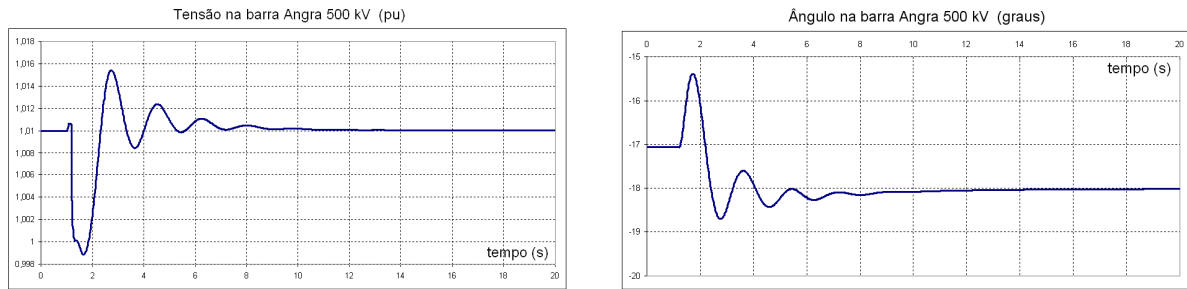


FIGURA 9 – Tensão e ângulo na barra de Angra para o caso estudado.

Os sincrofasores que representam estes sinais, foram exportados para o concentrador de dados fasoriais (PDC) por uma PMU virtual implementada em LabVIEW. Para este caso o PDC usado foi o openPDC, software livre mantido pela Grid Protection Alliance (18).

O fluxo de dados de exportação do PDC foi utilizado pelo aplicativo sob teste (SOM) que realizou a detecção e caracterização das oscilações. Os resultados corretos obtidos pelo aplicativo (identificação do modo de oscilação principal e quantificação de sua amplitude, frequência e amortecimento) demonstram que a "prova de conceito" proposta foi bem sucedida, com o aplicativo se comportando como se estivesse operando em conjunto com uma PMU real conectada a uma barra do sistema elétrico.

Os resultados do programa SOM são apresentados na figura 10. A parte (a) refere-se a simulação feita para 30 fasores por segundo e a parte (b) para 60 fasores por segundo. Os resultados no tempo são diferentes evidenciando a importância de se realizar provas de conceito para todas as diferentes possibilidades em um sistema síncrofasorial.

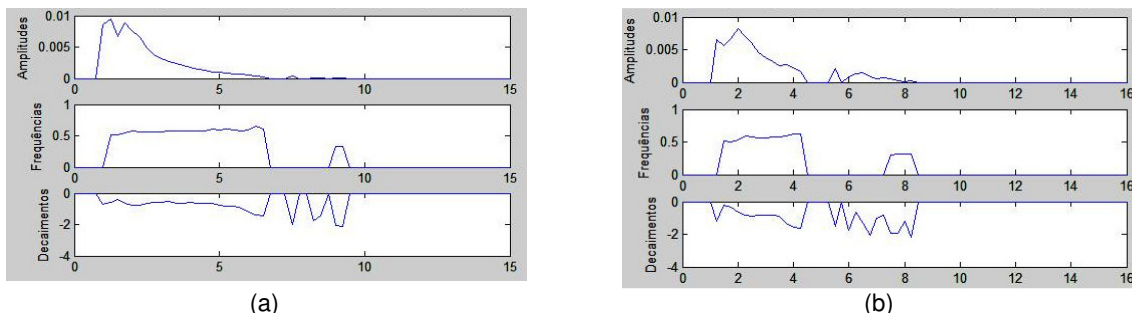


FIGURA 10 – Resultados do SOM para: (a) 30 fasores por segundo - (b) 60 fasores por segundo.

3.2 Linhas de pesquisa

Há várias linhas de pesquisa possíveis de serem conduzidas no laboratório. Dentre as linhas de pesquisa já existentes destacam-se: o estudo de toda a cadeia metrológica relacionada à medição fasorial (19) e o estudo de algoritmos internos de unidades de medição fasorial (20), ambas as linhas com publicações no CIGRÉ. Contudo, uma preocupação já existente e que o laboratório se propõe a estudar é a correlação entre erros e possíveis latências de comunicação e sua influência nos aplicativos que tratam os sinais oriundos de PMUs.

4.0 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente mais de 2000 PMUs já se encontram instaladas em diversos países do mundo. Esta quantidade segue crescendo rapidamente. Isto se deve ao fato de que os sistemas que se baseiam em dados de PMUs são uma excelente opção para melhorar o monitoramento dos sistemas elétricos de potência, em tempo real, e consequentemente sua proteção, bem como permitem um estudo mais detalhado de fenômenos ocorridos.

Face a popularização destes equipamentos, o CEPEL tem buscado se adequar técnica e laboratorialmente através da capacitação de seu corpo de pesquisadores e da criação de uma infraestrutura laboratorial (LabPMU) que visa dar suporte ao setor elétrico brasileiro de forma a responder pela demanda de ensaios e testes de aplicativos que deverão vir quando este tipo de tecnologia for sendo implantada no sistema elétrico brasileiro.

Este trabalho apresentou uma visão geral do LabPMU e sua infraestrutura de hardware e software com destaque para o equipamento PMU Cal System que até a presente data é o único sistema comercial para calibração de PMUs e que está em conformidade com a norma IEEE C37.118-1:2011. Finalmente, um estudo de caso visando demonstrar as facilidades disponíveis no LabPMU foi descrito.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE Std C37.118.1™-2011, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
- (2) PHADKE, A.G., THORP, J.S., Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, , Springer, 2008.
- (3) KEZUNOVIC, M., MELIOPOULOS, S., VENKATASUBRAMANIAN V., VITTAL, V., Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks, Springer, 2013.
- (4) NASPI Phasor Tool Repository <http://www.naspi.org/resources/pstt/toolsrepository.stm> acessado em 16/3/2015.
- (5) PAL, B., CHAUDHURI, B., Robust Control in Power Systems, Springer, 2005.
- (6) Calibrating the Smart-Grid, disponível em <http://en-us.fluke.com/community/fluke-news-plus/electronic-news/calibrating-the-smart-grid.html>, acessado em 16/3/2015.
- (7) KEZUNOVIC, M., SPRINTSON, A., GUAN, Y., REN, J., YAN, M., CASEY, C.J., ABUR, A., ZHANG, L., Verifying Interoperability and Application Performance of PMUs and PMU-Enabled IEDs at the Device and System Level - Final Project Report, ,PSERC Publication 12-21, Agosto 2012.
- (8) IEEE Std 37.244-2013 IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring.
- (9) STENBAKKEN, G.N., TANG, Y.,GOLDSTEIN, A., Calibration of phasor measurement unit at NIST, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, VOL. 62, NO. 6, junho 2013
- (10) MARTIN K.E., HAUER, J.F., FARIS T.J., PMU Testing and Installation Considerations at the Bonneville Power Administration, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE.
- (11) FERNANDEZ, J.O., The Virginia Tech Calibration System, M. SC. Thesis disponível em scholar.lib.vt.edu/.../Fernandez_JO_T_2011_2.pdf., acessado em 16/3/2015.
- (12) SRIVASTAVA, A.,K., ISWAS, S.B, SAUGATA, A.P., MELIOPOULOS, S., POLYMENEAS, E., LEE, Y., Testing and Validation of Phasor Measurement Based Devices and Algorithms - Final Project Report, PSERC Publication 13-44, Setembro 2013.
- (13) SmartTSlab, disponível em <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:486165/FULLTEXT01.pdf>, acessado em 16/3/2015.
- (14) BRAUN, J., SIEGENTHALER, S., The Metrological Characterization of PMUs, PMU Workshop, Dezembro 2014, EPFL, Lausanne.
- (15) OLIVEIRA, S.E.M., RANGEL, R.D., THOMÉ, L.M.S., BAITELLI, R., GUIMARÃES, C.H.C., Programa ANATEM para Simulação do Desempenho Dinâmico dos Sistemas Elétricos de Potência, IV SEPOPE, 23 a 27/05/1994, Foz do Iguaçu-PR, Brasil.
- (16) RODRIGUES, M.A.M., LIMA, L.C., VOLSKIS, H.A.R., SOLLERO, R.B.; MANO, R., Análise de sincrofasores para detecção de oscilações em sistemas elétricos interligados, IX STPC, Belo Horizonte, Minas Gerais, Junho, 2008.
- (17) Base de dados do ONS http://www.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx, acessado em 16/3/2015.
- (18) Página <http://openpdc.codeplex.com/>, acessada em 16/3/2015.
- (19) BRITO, L.C.G., ALVES JR., J.E.R., TARANTO, G.N., Análise dos erros de transformadores de corrente na exatidão dos sistemas de medição sincronizada de fasores, , XXII SNPTEE, 2013.
- (20) ALVES JR., J.E.R.; OLIVEIRA, S.C.G.; WATANABE, E.H.. Análise de Algoritmos Internos de Unidades de Medição Fasorial. In: Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2012, Florianópolis. Anais do Seminário Técnico de Proteção e Controle, 2012. v. 1. p. 1-21.



José Eduardo da Rocha Alves Junior nasceu em Juiz de Fora, MG, Brasil, em 30 de novembro de 1963. Graduou-se em Eng. Elétrica pela UFRJ (1987), mestre em Eng. Elétrica pela COPPE-UFRJ (1991), doutor em Eng. Elétrica pela COPPE-UFRJ (1999). Professor na Universidade Federal Fluminense desde 1991. Pesquisador pelo CEPEL desde 1994. Áreas de atuação: Eletrônica de Potência, Medição de Energia e Medição Fasorial Sincronizada (PMU). Senior member do IEEE e membro da CIGRÉ.