



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

CB/GPC/29

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO V

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

**PMUS COMO ELEMENTOS DE MEDIÇÃO PARA O SETOR ELÉTRICO: DESEMPENHO EM TESTES DE
REFERÊNCIA E SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL**

José Eduardo da R. Alves Jr. (*) Cepel	Cesar J. Bandim Cepel	Celia R. S. H Lourenço Cepel	Tiago F. Moraes Cepel	Julio Cesar R. dos Santos Cepel
Oscar A. S. Rueda Cepel	Leonardo P. Almeida Cepel	Leonardo N. Vilela PUC-Rio	Alex J. C. Mello Cepel	Igor F. Visconti Cepel

RESUMO

Sistemas de Medição Fasorial correlacionam no tempo informações de fase e magnitude de tensões e correntes medidas em diferentes pontos geográficos de um sistema elétrico de potência. Os seus principais componentes são as unidades de medição fasorial ("phasor measurement unit" - PMU), que devem ter seu desempenho avaliado antes de sua instalação em campo. Este artigo apresenta alguns resultados dos testes de referência realizados no LabPMU do Cepel com unidades PMUs de diferentes fabricantes, enfatizando a necessidade de verificação da configuração correta, importante para a adequação dos equipamentos à norma IEEE C37.118-1:2011 (1). Apresentam-se ainda simulações envolvendo situações de transitórios com o objetivo de analisar o comportamento das PMUs para diferentes configurações. Através de dois exemplos, demonstra-se que é possível prever o comportamento de PMUs em um sistema elétrico a partir dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Medição Sincrofasorial, Simulação em Tempo Real, Unidades de Medição Fasorial

1.0 - INTRODUÇÃO

O monitoramento do Sistema Elétrico Integrado Nacional (SIN) é essencial para o seu funcionamento. Utilizando sistemas do tipo SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), os operadores podem não só monitorar como também tomar ações corretivas no sentido de manter a integridade e confiabilidade do seu funcionamento. No sistema elétrico brasileiro, o Operador Nacional do Sistema (ONS) usa o sistema SAGE (2) como o seu núcleo de tempo real. Este sistema, além de possuir características de interoperabilidade, flexibilidade e redundância, apresenta funções EMS (energy management systems), destinadas a análise da segurança de operação do sistema, podendo sugerir inclusive medidas de prevenção e de correção de possíveis distúrbios.

Nos últimos anos, está em fase de amadurecimento uma nova tecnologia de medição, denominada medição sincrofasorial. Esta tecnologia está baseada em unidades de medição fasorial, que medem as grandezas essenciais, corrente e tensão, sincronizadas por um sistema de referência temporal único, como, por exemplo, o sistema GPS.

Uma comparação inicial entre os sistemas SCADA e os Sistemas de Medição Sincrofasorial apresenta-se a seguir. No sistema SCADA, o ponto de operação do sistema é obtido do através das informações recebidas de diversas remotas e IEDs ("intelligent electronic devices") com informações topológicas e quantitativas, não sincronizadas entre si. Em seguida, processa-se o algoritmo de estimação de estados para se obter a área de observabilidade do sistema.

(*) 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

Atualmente, a obtenção de um novo ponto de operação se dá a cada dois segundos. O sistema de medição sincrofasorial possui uma amostragem mais rápida. Para o sistema proposto pelo ONS, prevê-se amostragem de um fasor por ciclo, ou 60 amostragens por segundo, sincronizadas por relógios GPS. Este sistema pode complementar o sistema tradicional com funções de análise para grandes áreas ou WAMSs (wide area monitoring systems), como verificação de corredores elétricos carregados, análise de sincronismo entre áreas, análise de distúrbios voltada para grandes áreas e outras.

Os algoritmos mais comuns dentro das unidades de medição fasorial podem ser descritos pela figura 1. Os sinais de tensão e de corrente são submetidos à filtragem analógica e convertidos para digitais, onde a base de tempo é dada pelo relógio GPS. Em seguida realiza-se uma filtragem digital, cujo tipo determina a classe à qual a PMU pertence: filtros mais lentos são associados à classe M (voltada para medição) e filtros mais rápidos são associados à classe P (voltada para proteção). Os sinais filtrados são então submetidos a um processamento digital, normalmente baseado em janela de Fourier. É importante destacar que em algumas PMUs a largura da janela pode ser variável, em função da frequência medida. Além disso, para alguns modelos de PMUs, a atualização da largura da janela pode não ser realizada instantaneamente, sendo realizada de tempos em tempos.

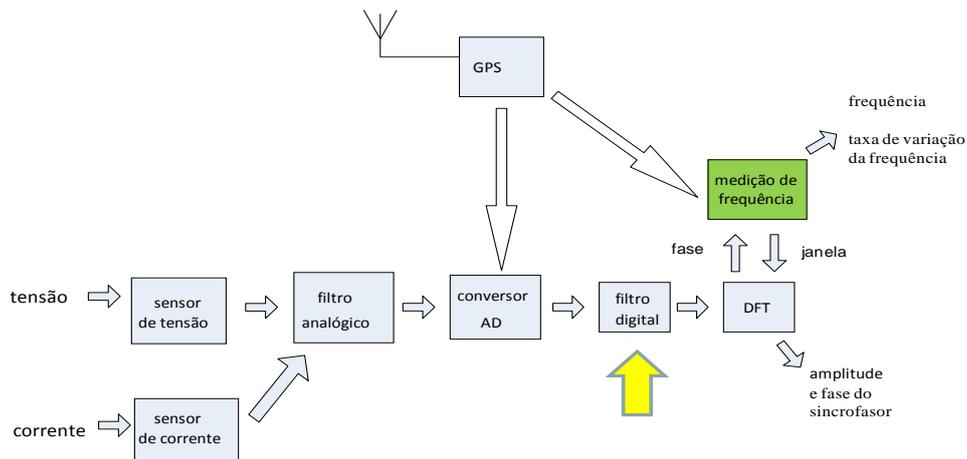


FIGURA 1 – Diagrama de blocos genérico de PMUs

1.1 Infraestrutura laboratorial do Cepel

Os principais equipamentos do LabPMU do Cepel, apresentados na figura a seguir, são: um calibrador de PMUs (3), um sistema de simulação em tempo real em malha aberta, baseado no programa de simulação de oscilações eletromecânicas do Cepel ANATEM (4) e finalmente um sistema de simulação em tempo real em malha fechada (5).

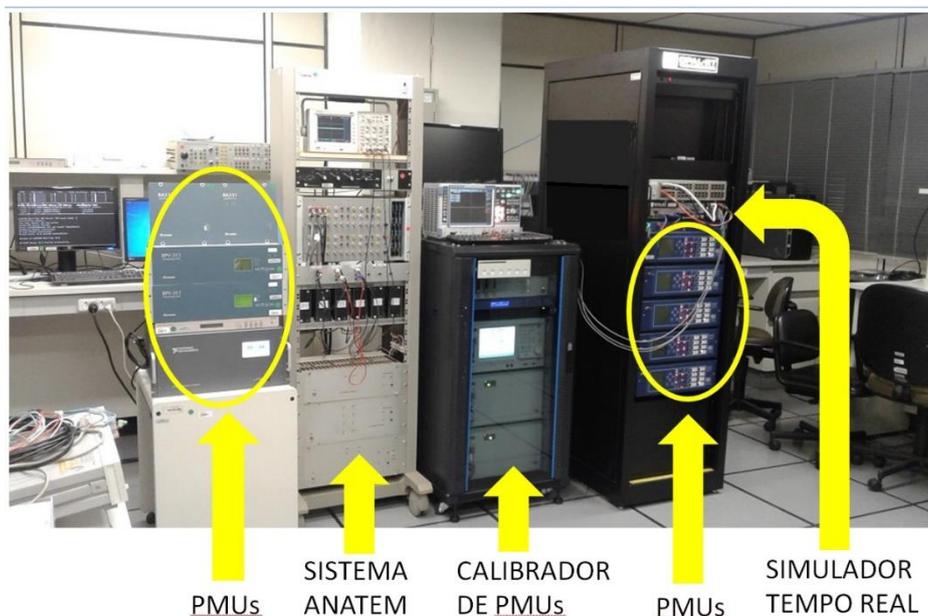


FIGURA 2 – Laboratório de PMUs (LabPMU)

As unidades de medição fasorial são equipamentos muito complexos e ainda em fase de maturação tecnológica, por isso é muito importante que tenham seu desempenho avaliado em laboratório antes de sua instalação em campo. A ferramenta mais indicada para este trabalho é o calibrador de PMUs, que é um equipamento de altíssimo desempenho, destinado aos ensaios de verificação de desempenho de PMUs de acordo com a Norma IEEE C37.118-1:2011. Ele é encontrado em menos de uma dezena de laboratórios em todo o mundo e no Brasil, até o momento da escrita deste artigo, apenas o Laboratório de PMUs do Cepel (LabPMU), dispõe deste calibrador de PMUs. Ele realiza todos os ensaios da norma de forma contínua, gastando cerca de 6 horas para essa execução. A figura a seguir apresenta um esquema genérico dos testes. O calibrador gera tensões e correntes sincronizadas com GPS para as PMUs. As PMUs retornam com os “frames” digitais segundo a norma citada. Os fasores provenientes das PMUs são comparados pelo calibrador com os fasores esperados e os erros são avaliados.



FIGURA 3 – Calibrador de PMUs

Está em fase final de desenvolvimento no Cepel um sistema para simulação em tempo real de malha aberta. A figura 4(a) ilustra o funcionamento deste sistema: uma determinada situação, que pode ser um caso real do SIN, é simulada no ANATEM. Os dados fasoriais, correspondentes à simulação do ANATEM, são convertidos para sinais analógicos (sinais no tempo) através de uma plataforma de alto desempenho. Por sua vez, estes sinais são amplificados e aplicados em PMUs. Os dados de saída das PMUs são encaminhados a um concentrador de dados fasoriais (PDC) e a aplicativos baseados em medições de PMUs.

O LabPMU possui também um simulador digital em tempo real (“real time simulator” - RTS) (5) capaz de fazer simulações em malha fechada (“hardware in the loop” - HIL). Uma rede elétrica pode ser simulada no RTS, enviando-se sinais para PMUs e também para relés. Por sua vez, estes podem enviar comandos digitais (no caso de relés) ou informações fasoriais (no caso de PMUs) de volta para o RTS, “fechando a malha”. Apresenta-se este sistema na figura 4(b).

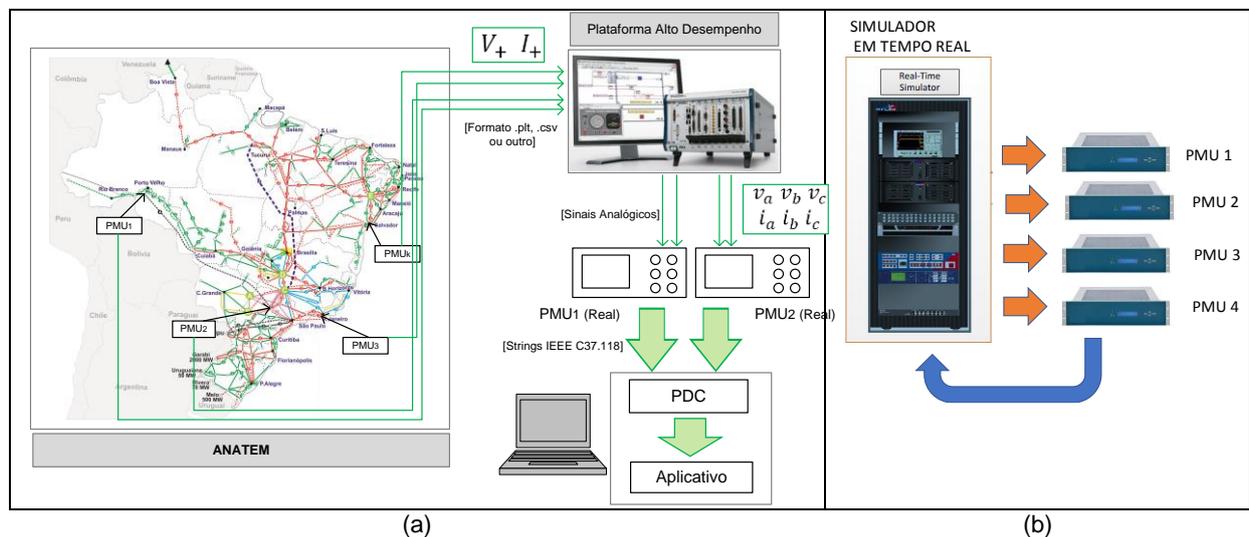


FIGURA 4 – (a) Simulador em malha aberta baseado no ANATEM e (b) Sistema de Simulação de Sistemas Elétricos em malha fechada

O LabPMU conta ainda com infraestrutura computacional (6), desenvolvida no Cepel, visando aquisição, concentração e distribuição de dados sincrofasoriais, incorporada ao SAGE. Além da aquisição, esta ferramenta permite o repasse dos dados através do protocolo IEEE C37.118, seu tratamento, bem como seu armazenamento em arquivos que poderão ser acessados de várias formas diferentes, localmente ou por meio de recursos desenvolvidos para este fim.

2.0 - RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

Os ensaios de PMUs podem ser agrupados em três categorias: ensaios de regime permanente, ensaios dinâmicos e ensaios de latência. Os ensaios estáticos permitem verificar se as medições de magnitude estão corretas e se a PMU rejeita ruídos (harmônicos, por exemplo) em suas medidas. Os ensaios dinâmicos avaliam a variação das grandezas e a necessidade de verificar se as PMUs conseguem acompanhar as mudanças nos sinais de entrada com a velocidade prevista na norma. Finalmente, os ensaios de latência permitem verificar se a latência interna digital da PMU atende aos requisitos da norma. A seguir serão apresentados alguns resultados de calibrações em PMUs que podem ter repercussão quando de sua operação em um sistema elétrico. Uma primeira preocupação é que as PMUs podem ter sido configuradas como tipo “M” e “P” dentro do mesmo sistema. Para avaliar o efeito deste tipo de arranjo foram analisados os resultados obtidos programando duas PMUs de um mesmo fabricante e mesmo modelo com duas configurações distintas (“M” e “P”). Outra linha de investigação decorre do fato de que algumas PMUs possuem configurações mais sofisticadas, como, por exemplo, a de ajuste da janela de medição com a variação da frequência, que pode acarretar respostas não previstas das PMUs quando as mesmas estiverem em operação no sistema elétrico.

2.1 Ensaio de degrau de fase e de magnitude em PMUs de classe M e classe P

Usando-se o calibrador foram realizados ensaios em PMUs para avaliar o tempo de resposta para degraus de amplitude e de fase na tensão e na corrente. A figura 5 ilustra este ensaio: o tempo de resposta corresponde ao tempo entre o instante em que a PMU começa a apresentar o erro total vetorial (“total vector error” - TVE) (1) maior que 1% até o momento em que o TVE volta a se tornar menor que 1% novamente.

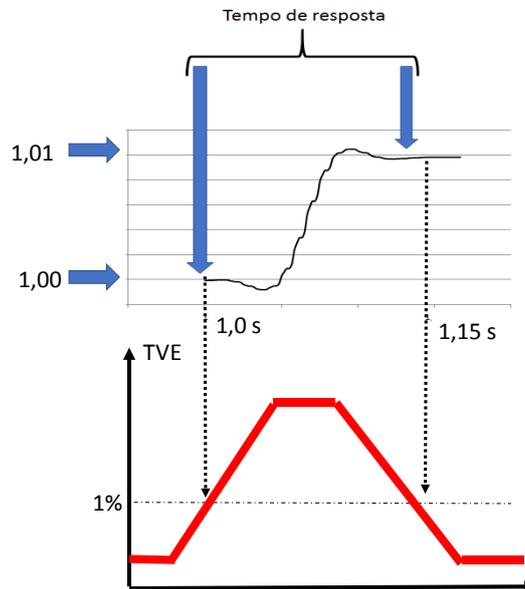


FIGURA 5 – Ensaio de degrau na magnitude de PMUs

Foram realizados ensaios de degrau em magnitude e em fase para uma PMU de um mesmo fabricante configurada como classe M e depois como classe P. Os resultados apresentam-se nas tabelas a seguir. A partir dos limites da norma e dos resultados apresentados pelas PMUs, conclui-se que a PMU configurada como classe P é mais rápida do que quando configurada como classe M.

Tabela 1 – Tempo de resposta para o Degrau de Amplitude.

	Limite (ms)	Medido (ms)	Resultado
Tipo M	116,7	60,0	passou
Tipo P	33,3	28,3	passou

Tabela 2 – Tempo de resposta para o Degrau de Fase.

	Limite (ms)	Medido (ms)	Resultado
Tipo M	116,7	66,7	passou
Tipo P	33,3	33,3	no limite da norma

2.2 Ensaio dinâmico de variação de frequência

Apresenta-se na figura 6(a) o ensaio dinâmico de variação de frequência. Ele consiste de uma rampa de 55Hz a 65 Hz em um tempo de 10 segundos, correspondente a uma variação de 1Hz/s. Ele foi concebido para verificar se a unidade de medição fasorial consegue realizar com sucesso dois processos: o de medição de frequência e o de atualização do algoritmo de cálculo de fase e módulo do sincrofasor, com base na medição de frequência. Apresenta-se na figura 6(b) o resultado do ensaio dinâmico para duas PMUs distintas. Pode-se observar que para uma das PMUs (PMU 4) o erro total vetorial (TVE) (1) é muito baixo. Contudo, para outra PMU (PMU 3), o erro pode chegar a cerca de 2,5%.

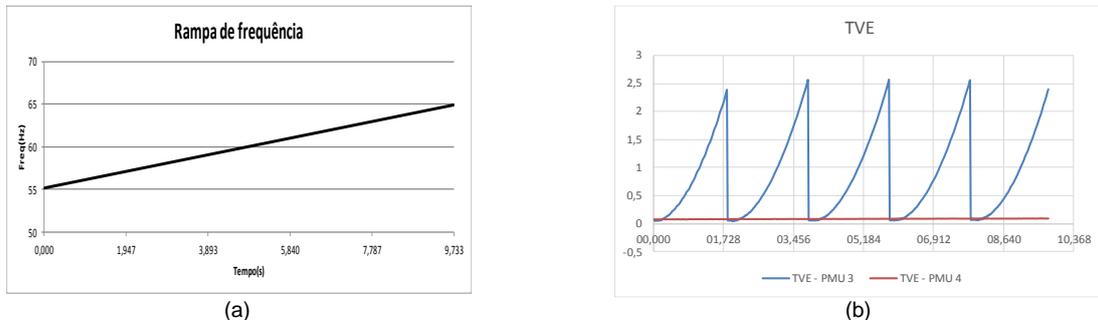


FIGURA 6 – (a) Ensaio de rampa de frequência e (b) erro total vetorial de duas PMUs

Investigando-se a origem deste erro, verificou-se que praticamente não havia erro de ângulo e também que a PMU mede a frequência corretamente. Avaliou-se o erro de magnitude da PMU e apresenta-se na figura 7(a) o resultado. É possível observar que a PMU mede a magnitude com erros de até 2,5% negativos. Isto indica que, apesar de medir a frequência corretamente, a PMU demora a atualizar a largura da janela usada para o cálculo do fasor. Esse modelo de PMU estava configurado com a opção de corrigir o tamanho da janela de DFT com a mudança de frequência de dois em dois segundos. Quando esta opção não está ativada, não há correção da janela e o TVE no ensaio de rampa de frequência sempre será diferente de zero quando a frequência é diferente de 60 Hz, como pode-se ver na figura 7(b). Caso esteja configurada para adaptação em frequência, a PMU possui TVE diferente de zero até o momento da adaptação. Contudo, se a frequência continuar variando, ela volta a errar, como apresentado na figura 7(b).

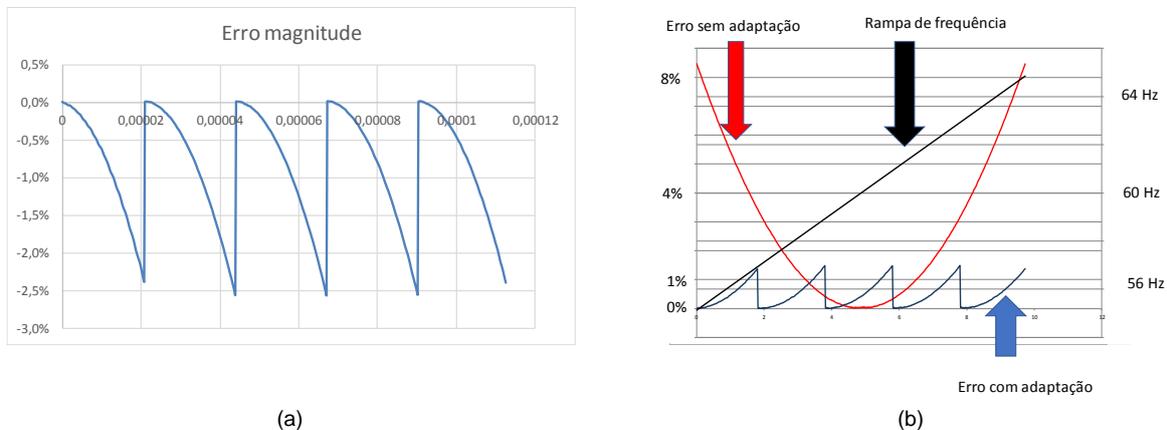


FIGURA 7 – Erros para o ensaio de rampa de frequência: (a) erro de magnitude e (b) TVE

3.0 - RESULTADOS DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UNIDADES DE MEDIÇÃO FASORIAL

Esta seção tem o objetivo de avaliar se os fenômenos relatados nas PMUs, através dos ensaios com o calibrador, apresentados nos itens 2.1 e 2.2, poderiam se manifestar em simulações de eventos de sistemas elétricos. Para isto foram realizados ensaios baseados em duas ferramentas: a plataforma ANATEM de simulação em tempo real em malha aberta e o simulador em tempo real RTS.

3.1 Ensaio para verificar as diferenças entre uma PMU com classe M e classe P do mesmo fabricante

No simulador em tempo real realizou-se ensaio com o circuito elétrico apresentado na figura 8. Há duas PMUs do mesmo fabricante instaladas na barra da esquerda, configuradas como “M” e “P”. Foi aplicada uma falta e os disjuntores brk1 e brk2 abriram cerca de 150 ms após o evento, permanecendo abertos por 300 ms. Quando os mesmos foram fechados, a falta já havia sido retirada.

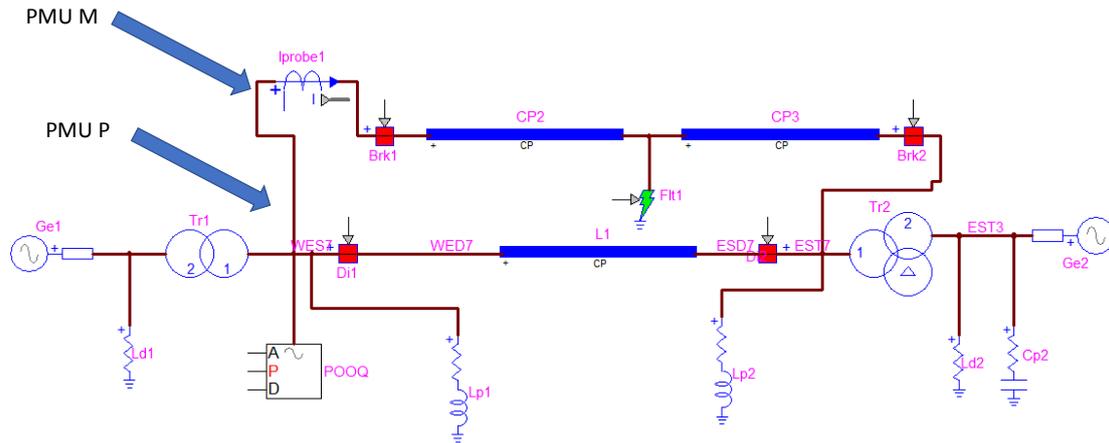


FIGURA 8 – Circuito usado no simulador em tempo real

Observam-se na figura 9 os resultados da simulação. A PMU M demora mais a para atingir o ponto de operação se comparada a PMU P, conforme havia sido observado nos ensaios do calibrador (item 2.1). É importante destacar que nos ensaios realizados não foram levados em consideração possíveis efeitos dinâmicos trazidos pelos transformadores de instrumentos.

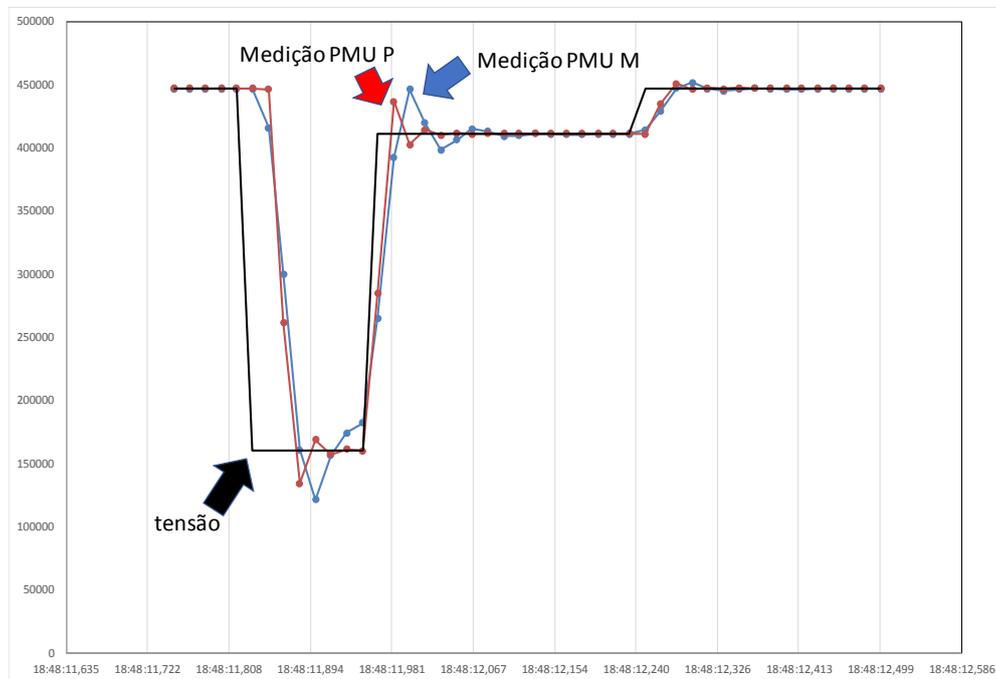


FIGURA 9 – Resultados obtidos com as PMUs M e P

3.2 Ensaios de simulação em tempo real com variação de frequência

Com o objetivo de verificar o efeito de adaptação em frequência descrito no item 2.2, realizaram-se dois ensaios: (a) Ensaio no STR usando-se um sistema elétrico proposto por Kundur (7); (b) Ensaio em ANATEM usando-se modelo do SIN (Sistema Interligado Nacional).

3.2.1. Ensaio com sistema elétrico do Kundur

Apresenta-se na figura 10 o sistema elétrico usado para as simulações, onde duas PMUs diferentes foram instaladas na barra 1. Uma das PMUs (PMU 1) possui configuração de adaptação de frequência e a outra PMU (PMU 2) foi usada como padrão para comparação, tendo passado em todos os testes da norma realizados no calibrador de PMUs. Foi simulada uma falta e houve uma separação momentânea das duas regiões resultando numa no aumento da frequência medida na barra 1.

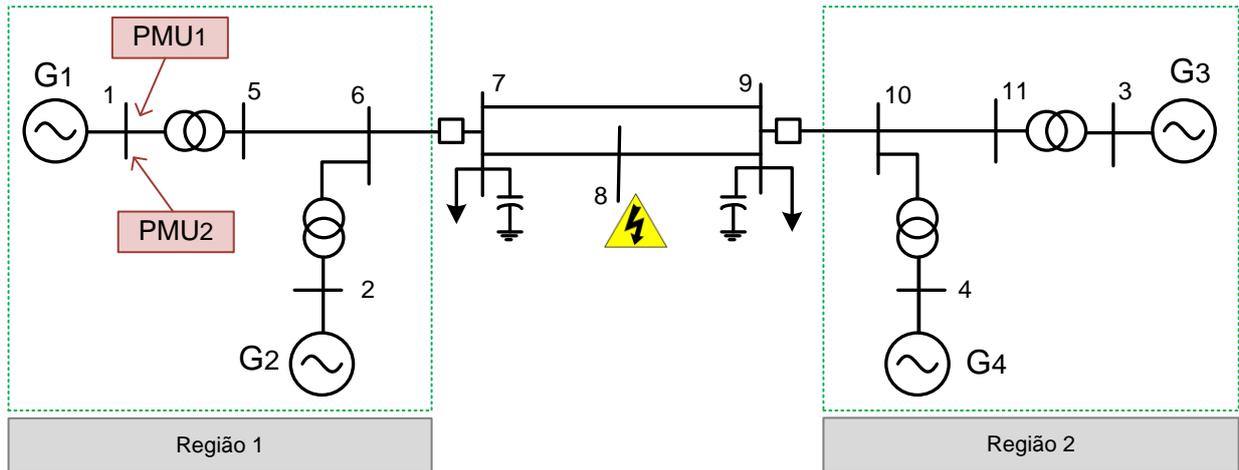


FIGURA 10 – Circuito usado para simulação no simulador digital

Observam-se os resultados do ensaio na figura 11. Verifica-se uma pequena diferença inicial entre as medições das duas PMUs, cujo valor é muito inferior a 1%. Contudo, logo no início do evento, devido à variação de frequência, os valores de magnitude de tensão medidos pelas duas PMUs começam a divergir, para voltar a se tornar próximos, em uma primeira adaptação da PMU 1, ocorrida no tempo de 47 min e 47 s. A partir deste momento, as magnitudes medidas pelas duas PMUs começam a divergir novamente. Aproximadamente dois segundos depois (47 min e 49 s), há uma nova adaptação da PMU 1 e as medições convergem novamente.

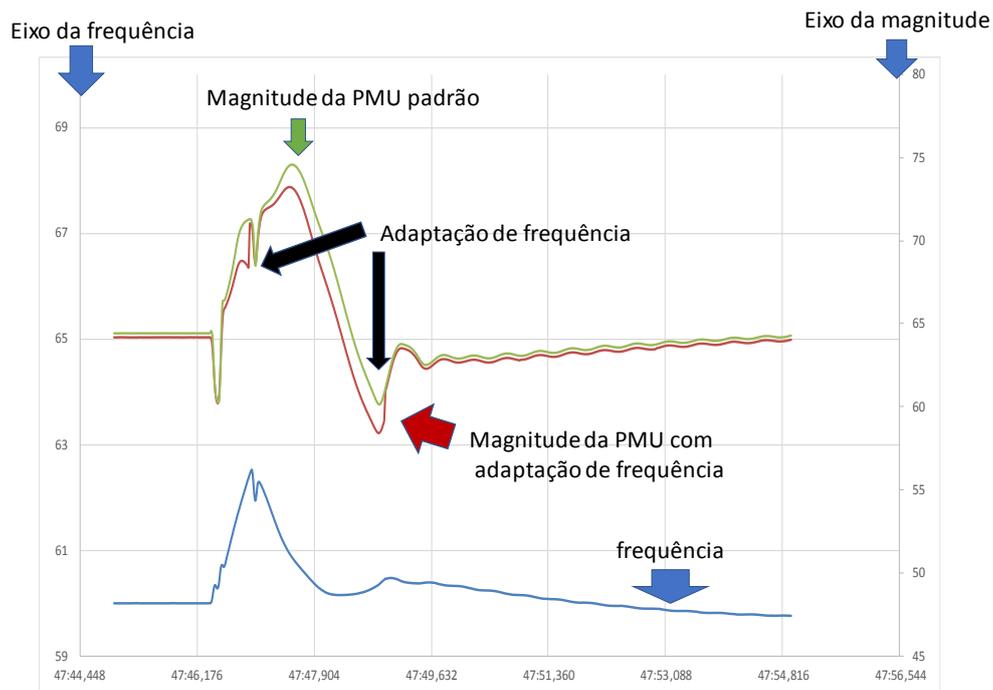


FIGURA 11 – Resultados da simulação com duas PMUs sendo uma padrão e outra com adaptação de frequência

3.2.2. Ensaio utilizando o ANATEM de um evento do sistema elétrico brasileiro onde ocorre variação de frequência

Foi realizada uma simulação utilizando o ANATEM de um evento possível de ocorrer no sistema interligado nacional. Este evento se caracteriza pelo bloqueio de um dos dois bipolos que transmitem a energia gerada nas usinas hidrelétricas de Jirau e Santo Antônio, a partir da subestação de 500kV de Porto Velho, no Acre, até a subestação de 500 kV de Araraquara, em São Paulo. A consequência deste evento para as usinas é uma rejeição transitória de 2000 MW, até que o equilíbrio carga/geração seja restabelecido pelo bipolo remanescente e pelos reguladores de velocidade das máquinas. A figura 12 mostra a variação de frequência (sobre-frequência), atingindo um valor de pico de aproximadamente 61,1 Hz, na barra de alta da usina de Santo Antônio. Os dados fasoriais de saída do ANATEM foram utilizados como entrada para o simulador de tempo real no qual foram instaladas as mesmas PMUs do ensaio

anterior (item 3.2.1) na barra de Santo Antonio. Verificou-se que as duas PMUs medem a frequência de forma muito próxima. Contudo, há uma diferença entre as magnitudes medidas. Esta diferença é corrigida em intervalos de tempo específicos, devido justamente ao algoritmo de adaptação à frequência da PMU 1. Pode-se ver na figura 12 o efeito do algoritmo de adaptação nesta PMU.

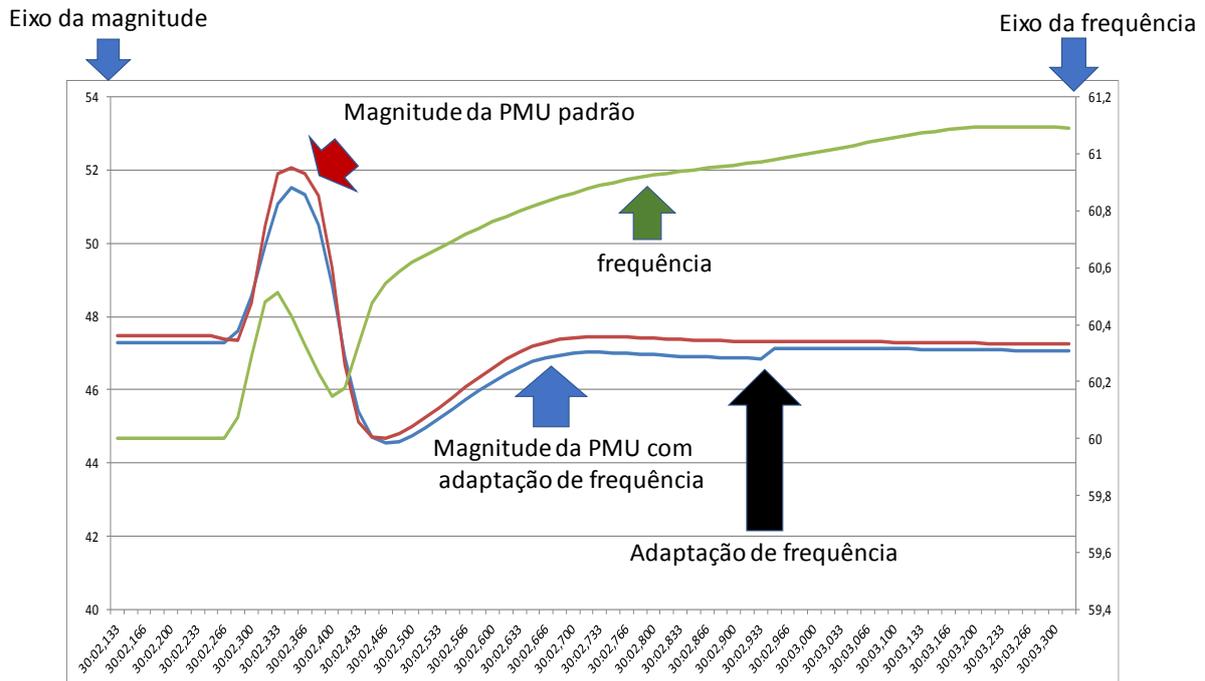


FIGURA 12 – Resultados do ensaio usando-se a plataforma ANATEM

4.0 - CONCLUSÕES

A crescente utilização de sistemas de medição sincrofásorial para monitoramento dos sistemas elétricos de potência em nível mundial, e no Brasil a partir da iniciativa do Operador Nacional do Sistema, impõe a necessidade de capacitação técnica dos agentes setoriais. O Cepel, centro de pesquisas do sistema Eletrobras, vem se preparando para enfrentar os desafios associados a utilização desta nova tecnologia. Neste sentido, foi criado e já se encontra em operação o LabPMU, cuja infraestrutura foi apresentada no item 1.1 deste trabalho. As principais áreas de atuação deste laboratório são a realização de ensaios de referência em PMUs, a validação de aplicativos para PMUs e a pesquisa tecnológica visando conhecer os detalhes envolvidos na utilização desta tecnologia.

Este trabalho apresentou alguns exemplos de atividades relacionados a esta terceira área de atuação do LabPMU. Foram apresentadas situações passíveis de ocorrer em campo e estudados os comportamentos de PMUs reais quando submetidos a condições similares. A metodologia empregada foi baseada na verificação do desempenho de PMUs utilizando um calibrador programado para executar todos os ensaios previstos na norma C37.118.1, e em dois tipos de simulação: simulação em tempo real utilizando um sistema baseado em dados fornecidos pelo ANATEM, e simulação em tempo real baseado em um simulador digital em tempo real.

Um dos objetivos das simulações foi o de verificar se o comportamento das PMUs, apresentado nos ensaios com o calibrador de PMUs, pode trazer reflexos quando estas unidades estiverem instaladas no SIN. Os resultados das simulações indicam claramente que sim. Este fato reforça ainda mais conclusões já alcançadas pela equipe de pesquisadores do LabPMU quanto à necessidade de realização de ensaios laboratoriais detalhados, antes da instalação das PMUs no campo, como forma de mitigar a ocorrência de possíveis problemas advindos de situações não previstas ou não analisadas.

A projeção de trabalhos futuros do laboratório envolve:

- O estudo da influência dinâmica de transformadores de instrumentos sobre a resposta do sistema de medição sincrofásorial. O comportamento estático de transformadores de corrente visando PMUs já possui referência a respeito (8).
- A verificação de ferramentas já disponíveis no SAGE para PMUs (9).

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) IEEE, "IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems," *IEEE Std C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std C37.118-2005)*, 2011.
- (2) <http://sage.cepel.br/sage/index.php/pt/SAGE>, acessado em 03/04/2017.
- (3) <http://br.flukecal.com/products/electrical-calibration/electrical-calibrators/sistema-de-calibração-para-unidade-de-medição>, acessado em 03/04/2017.
- (4) S. E. M. Oliveira, R. D. Rangel, L. M. Thomé, R. Baitelli, and C. H. Guimarães, "Programa ANATEM para Simulação do Desempenho Dinâmico dos Sistemas Elétricos de Potência," in *Simpósio de Planejamento e Operação de Sistemas Elétricos de Potência*, 1994.
- (5) <http://www.opal-rt.com/systems-hypersim>, acessado em 03/04/2017.
- (6) R. B. Sollero, L. C. Lima, A. L. D. O. Filho, J. C. C. D. Oliveira, M. A. M. Rodrigues, P. Stein, Lambert, "Concentrador De Dados Sincrofasoriais Integrado A Um Sistema De Supervisão, Controle E Gerenciamento De Sistemas Elétricos De Potência", in *XXIII SNPTEE*, 2015.
- (7) P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Professional Publishing, 1994.
- (8) L. C. G. Brito, J. J. E. R. Alves, and G. N. Taranto, "Análise dos erros de transformadores de corrente na exatidão dos sistemas de medição sincronizada de fasores," in *XXII SNPTEE*, 2013.
- (9) L. C. Lima, M. A. Rodrigues, J. Timbó, M. D. S. Moreale, H. A. R. Volskis, A. C. Esteves, "Aplicação de PMUs nas Salas de Controle do ONS", VIII SIMPASE, 2009.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



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.