



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/07
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

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

ENSAIOS DE PMU DE ACORDO COM A NORMA IEEE C37.118.1-2011

**Marcelo Neujahr Agostini (*)
REASON TECNOLOGIA**

**Sérgio Luiz Zimath
REASON TECNOLOGIA**

**José Eduardo da Rocha Alves Junior
CEPEL**

**Daniel Dotta
IFSC**

RESUMO

No presente informe técnico são apresentados resultados de ensaios de PMU de acordo com a norma IEEE C37.118.1-2011. O objetivo principal do trabalho é descrever o processo de ensaio em si, de alguns dos ensaios propostos na norma, tanto em regime permanente quanto dinâmico, sem necessariamente apresentar comparações entre equipamentos de fabricantes diferentes. Objetiva-se provocar e fomentar discussões a respeito dos ensaios e limites aplicados aos equipamentos dos WAMS, em especial às PMUs. Os equipamentos ensaiados atenderam os limites de TVE, FE, tempo de atraso, *overshoot*, e tempo de resposta em relação à TVE e FE, em todos os ensaios realizados. Algumas situações de não conformidade foram detectadas em relação ao RFE, e tempos de resposta respectivos. Uma análise detalhada do limite de RFE proposto na norma IEEE C37.118.1-2011, em comparação com os limites de FE e de TVE, mostra que o limite de RFE proposto pode estar incompatível com os demais limites. Esta percepção já foi sentida por outras equipes, e vem incitando uma revisão antecipada da norma para adequá-la a limites factíveis em função da aplicação a qual se destinam.

PALAVRAS-CHAVE

PMU, Medição Fasorial, Ensaio de PMU, IEEE C37.118

1.0 – INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada, conhecidos de forma mais geral como *Wide Area Measurement Systems* (WAMS) têm sido identificados como uma tecnologia de grande interesse para o aprimoramento da monitoração e controle em tempo real de Sistemas de Energia Elétrica (SEE). Os WAMS são formados, basicamente, por Unidades de Medição Fasorial (ou *Phasor Measurement Units* – PMU), que realizam a medição de fasores de tensão e de corrente no SEE, enviando-os a um sistema de concentração de dados (ou *Phasor Data Concentrator System* – PDCS) [01]. As medições nas PMUs são realizadas de forma sincronizada, a partir de uma referência única para todos os equipamentos, tal como a informação de tempo do Sistema de Posicionamento Global (ou *Global Positioning System* – GPS). Desta forma, obtém-se sincrofases, que podem ser comparados entre si para o registro de pontos de operação instantâneos do sistema elétrico. Os WAMS compreendem um novo paradigma para a monitoração e o controle de sistemas elétricos, especialmente pelas taxas de medição e envio de dados, da mesma ordem de grandeza da frequência dos sistemas elétricos.

Esforços de pesquisa e desenvolvimento estão em desenvolvimento atualmente na área de WAMS, com alguns protótipos instalados em nível mundial, e também no Brasil [02][03][04]. Diversas aplicações de sincrofases vem sendo estudadas e desenvolvidas [05][06][07][08]. Aplicações de supervisão e de monitoração de sistemas elétricos, baseadas em sincrofases, encontram-se atualmente em desenvolvimento, constatando-se, ainda, poucas alternativas comerciais disponíveis.

(*) Rua Delminda Silveira, 855 – Agrônômica – Florianópolis, SC – CEP 88.025-500
Tel: (48) 2108-0331 – E-mail: marcelo.agostini@reason.com.br

No âmbito destes esforços, o tema exatidão de sincrofasores medidos pelas PMUs tem recebido atenção dos pesquisadores e dos desenvolvedores da tecnologia. Neste ambiente, incluem-se questões relacionadas diretamente às PMUs, tal como qualidade da sincronia dos equipamentos, calibração interna, desempenho dos algoritmos e filtros para o cálculo adequado dos sincrofasores [09][10][11][12], especialmente sob regime dinâmico, interoperabilidade entre PMUs de fabricantes diferentes, e outros; bem como questões externas às PMUs, especialmente os erros introduzidos pelos circuitos de instrumentação [09]. Há, também, o interesse em se avaliar corretamente a influência da exatidão dos sincrofasores em cada tipo de aplicação em desenvolvimento.

Em relação ao desempenho das PMUs em si, avanços foram propostos na norma IEEE C37.118.1-2011 [13] em relação à versão anterior IEEE C37.118-2005 [14]. Essencialmente, a versão de 2011 contempla requisitos de desempenho dinâmico, buscando uma melhor exatidão dos sincrofasores medidos pelas PMUs durante distúrbios e mudanças de ponto de operação. Foram, também, melhor definidas as grandezas "frequência" e "variação de frequência", e especificados limites de erros para essas grandezas em cada ensaio proposto, além do "erro vetorial total" (ou *Total Vector Error* – TVE), já existente na versão de 2005 da norma. Foram introduzidos os conceitos de "erro de frequência" (ou *Frequency Error* – FE) e de "erro de variação de frequência" (ou *Rate of Change of Frequency Error* – RFE). Com relação ao desempenho dinâmico das PMUs, requisitos como tempos de resposta, atraso e *overshoot*, além do TVE, FE e RFE, mediante a aplicação de degraus de módulo e de ângulo, foram introduzidos. Um conjunto de ensaios de PMUs de diferentes fabricantes, de acordo com a norma IEEE C37.118-2005, pode ser encontrado em [15].

No presente informe técnico são apresentados resultados de ensaios de PMU de acordo com a norma IEEE C37.118.1-2011. O objetivo principal do trabalho é descrever o processo de ensaio em si, de alguns dos ensaios propostos na norma, tanto em regime permanente quanto em comportamento dinâmico, sem necessariamente se apresentar comparações entre equipamentos de fabricantes diferentes. Objetiva-se, com isso, provocar e fomentar discussões a respeito dos ensaios e limites aplicados aos equipamentos dos WAMS, em especial às PMUs.

2.0 – CONFORMIDADE À NORMA IEEE C37.118.1-2011

2.1 – Classes de Desempenho

A norma IEEE C37.118.1-2011 propõe dois conjuntos básicos de ensaios para a determinação de conformidade de PMUs: ensaios de regimes permanente e dinâmico. Cabe ressaltar, inicialmente, que se determina na norma que a documentação para a verificação de conformidade deve ser apresentada pelo fabricante, contendo as informações:

- Classe de desempenho da PMU ensaiada;
- Medições que atendem os requisitos desta classe;
- Resultados dos ensaios comprovando o desempenho da PMU ensaiada;
- Equipamentos e configurações respectivas usadas nos ensaios;
- Condições ambientais durante a realização dos ensaios;
- Análise de erro dos equipamentos usados nos ensaios, caso não seja possível rastreá-los até referências padrões.

São definidas duas classes de PMU: classe P e classe M. A classe P está relacionada com respostas mais rápidas, sem um compromisso maior com filtragens detalhadas dos sinais medidos e/ou calculados. PMUs do tipo P podem ser utilizadas em aplicações que operam em tempo real, para proteção e controle de SEEs, por exemplo.

A classe M está relacionada a medições com exatidão maior que na classe P, porém assumindo que estas características podem acarretar em tempos de resposta mais lentos. PMUs classe M podem ser usadas em sistemas de monitoração e supervisão, e para o registro de ocorrências. A verificação de conformidade de uma PMU deve ser feita de forma independente para cada uma das classes, adotando-se os limites respectivos de erros e faixas de excursão de grandezas dos ensaios de cada classe.

2.2 – Parâmetros de Avaliação para os Ensaios

A qualidade dos sincrofasores medidos é dada pela avaliação do "erro vetorial total" (ou *Total Vector Error* – TVE), definido em (01):

$$TVE_{(n)} = \sqrt{\frac{(\hat{X}_{r(n)} - X_{r(n)})^2 + (\hat{X}_{i(n)} - X_{i(n)})^2}{X_{r(n)}^2 + X_{i(n)}^2}} \quad (01)$$

onde:

$\hat{X}_{r(n)}$ e $\hat{X}_{i(n)}$ → valores real e imaginário do sincrofasor medido, respectivamente;

$X_{r(n)}$ e $X_{i(n)}$ → valores real e imaginário do sincrofasor de referência, respectivamente.

O índice (n) indica que os valores são todos instantâneos, existindo um valor de TVE para cada instante de tempo. O TVE, fasorialmente, corresponde ao módulo do fasor correspondente à diferença entre o sincrofasor medido e o sincrofasor de referência, como mostrado na Figura 1.

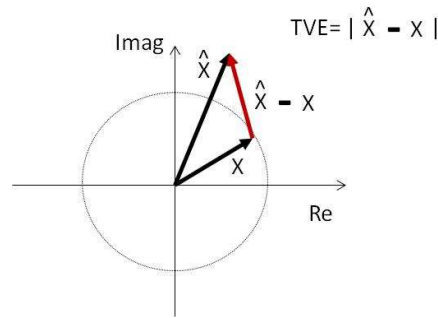


FIGURA 1 – Total Vector Error – TVE

O "erro de frequência" (ou *Frequency Error* – FE) e o "erro de variação de frequência" (ou *Rate of Change of Frequency Error* – RFE) são definidos em (02) e (03), respectivamente:

$$FE_{(n)} = \left| f_{medida(n)} - f_{ref(n)} \right| \quad (02)$$

$$RFE_{(n)} = \left| ROCOF_{medida(n)} - ROCOF_{ref(n)} \right| \quad (03)$$

sendo que a frequência medida pela PMU é definida como a derivada do ângulo de tensão de sequência positiva, medida em Hz, e a taxa de variação de frequência é definida como a derivada da frequência, ou a derivada segunda do ângulo de tensão de sequência positiva, medida em Hz/s.

Para a avaliação do desempenho dinâmico, são definidos os parâmetros "tempo de resposta" (*response time*) e "tempo de atraso" (*delay time*). O tempo de resposta é definido como sendo o tempo de transição de uma certa grandeza entre dois valores estáveis, após a aplicação de um degrau no módulo ou no ângulo do sinal medido pela PMU. Ele é determinado como a diferença de tempo entre os instantes em que o valor da grandeza sai de um certo limite, e retorna e fica novamente dentro deste limite. Os limites são os erros máximos de TVE, FE e RFE, com valores numéricos específicos para cada tipo de ensaio.

O tempo de atraso é definido como o intervalo de tempo entre o instante em que o degrau é aplicado no módulo ou no ângulo, e o instante de tempo em que a grandeza respectiva (módulo ou ângulo) atinge a metade do valor numérico entre o seu estado inicial (antes do degrau) e seu estado final (após o degrau).

Observe-se que o tempo de resposta é obtido avaliando-se apenas TVE, FE e RFE, independente do instante de tempo de aplicação do degrau. Pode-se determinar os tempos de resposta do TVE, do FE e do RFE perante degraus de módulos ou de ângulos. Já para o tempo de atraso é necessário se conhecer com exatidão o instante de tempo de aplicação do degrau no sinal de entrada da PMU, comparando-se este instante com as etiquetas de tempo dos sincrofasores medidos. Pode-se determinar os tempos de atraso para módulos e para ângulos. Podem existir tempos de atraso positivos e negativos, dependendo do algoritmo de compensação de etiquetagem dos sincrofasores usado em cada PMU.

Os conceitos acima são ilustrados na Figura 2. O "overshoot" é a diferença numérica entre o valor máximo atingido pela grandeza durante a transição, em relação ao seu valor estável, após a aplicação do degrau.

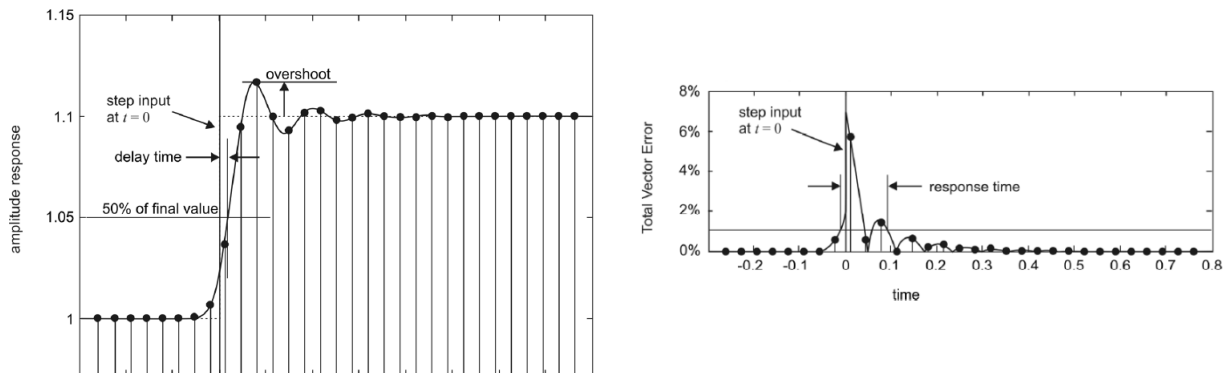


FIGURA 2 – Tempos de Resposta e de Atraso, e Overshoot – Fonte: IEEE C37.118.1-2011

2.3 – Condições Gerais para os Ensaios

Os ensaios consistem, basicamente, em se variar as grandezas elétricas individualmente, em certas faixas de variação, avaliando-se os erros ao longo do ensaio. Os sinais medidos pela PMU sob ensaio devem ser comparados com os sinais de referência injetados no equipamento, calculando-se os erros respectivos, que devem permanecer abaixo de valores limites. Deve-se variar apenas a grandeza de interesse, em cada ensaio, mantendo-se as demais nas condições nominais.

A obtenção dos sinais de referência para a avaliação dos erros pode ser feita de duas formas básicas: usando-se uma "PMU de referência", ou um "gerador de sinais de referência sincronizado". No primeiro caso, uma PMU de referência é conectada em paralelo com a PMU sob ensaio, medindo os mesmos sinais aplicados durante os ensaios. A PMU de referência deve ter um desempenho certificado de, pelo menos, 4 vezes os requisitos dos ensaios. Por exemplo, nos casos onde se exige um TVE_{\max} de 1%, a PMU de referência deve ser certificada em ensaios prévios com requisitos de TVE_{\max} de 0,25%. O gerador de sinais não precisa ser sincronizado, desde que atenda os requisitos de exatidão de módulos e de frequência dos sinais gerados para os ensaios.

Outra forma é utilizar um gerador de sinais de referência sincronizado ao GPS, garantindo-se que os sinais de tensão e de corrente gerados estejam referenciados à mesma base de tempo da PMU sob ensaio. Neste caso, considera-se que os sinais injetados na PMU são exatos, e portanto pode-se usar os valores teóricos dos sincrofasores requeridos em cada ensaio como os sinais de referência, para a avaliação dos erros respectivos.

As variações das grandezas durante os ensaios devem ser realizadas sempre em condições de sistema elétrico equilibrado. Os erros devem ser analisados em todos os sincrofasores fornecidos pela PMU, tanto individuais por fase quanto de sequência positiva, dependendo das opções de externalização de dados da PMU sob ensaio.

3.0 – ENSAIOS REALIZADOS

Nesta primeira etapa do trabalho, foram selecionados e realizados alguns dos ensaios propostos na norma IEEE C37.118.1-2011, tais como os de variação de frequência, variação de módulo e de variação de ângulo, no caso de regime permanente, e de degraus de módulo e de ângulo na categoria regime dinâmico.

As funções de medição fasorial sincronizada de Registradores Digitais de Perturbações Multifunção Reason [16], modelos RVP-304 (firmware 29B07), RVP-310 (firmware 39A02) e RVP-311 + módulo de aquisição RA332 (firmware 09A02), com sincronização via relógio GPS Reason modelo RT2000 foram ensaiadas e apresentam-se os resultados neste informe. A geração dos sinais de ensaio foi realizada com uma mala de testes Omicron CMC353 [17], sincronizada via módulos CMGPS e CMIRIG-B. Esta arquitetura permite a geração de sinais sincronizados ao GPS, sem a necessidade de uma PMU de referência. A classe de desempenho das PMUs, considerada para fins de avaliação nos ensaios, é a classe M.

Foram configurados e conectados três canais de tensão e três de corrente, formando um circuito completo trifásico. A PMU foi programada para enviar os sincrofasores de tensão e de corrente trifásicos e de sequência positiva, total de 8 sincrofasores por frame de dados. A tensão nominal de entrada da PMU é de 115 V, corrente nominal 5 A, com todo o sistema configurado para operar com frequência nominal de 60 Hz. Os testes foram realizados com as taxas de transmissão de fasores de 20 frames/s e 60 frames/s.

Os dados medidos pela PMU foram recolhidos em tempo real com o programa PMU Connection Tester [18], gerando-se arquivos de dados CSV, que por sua vez eram introduzidos em um programa de processamento matemático, calculando-se os erros respectivos.

Nos ensaios de regime permanente, cada patamar das grandezas variadas duraram 10s, sendo os erros avaliados durante 5s, entre os instantes 4s e 9s em cada patamar, garantindo-se a estabilidade das medidas. Foram avaliados os erros das três fases e da sequência positiva, calculando-se o valor de erro máximo entre todos os valores avaliados. Todas as demais grandezas, excluindo-se a grandeza variada em cada ensaio, foram mantidas em suas condições nominais e sistema equilibrado. Foi usada a função *State Sequencer* da mala Omicron, que permite programar uma sequência de estados com as grandezas em valores pré-definidos.

3.1 – Ensaio de Variação de Frequência

Neste ensaio variou-se a frequência dos sinais de entrada entre 55 Hz e 65 Hz, em passos de 1 Hz, total de 11 patamares. Usou-se a mesma faixa de variação em ambas as taxas de envio de fasores. Foi variada a frequência de todos os canais de tensão e de corrente simultaneamente. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

3.2 – Ensaio de Variação de Módulo

Neste ensaio variaram-se os módulos de tensão dos sinais de entrada entre 10% de V_{nom} (11,5 V) e 120% de V_{nom} (138 V), em passos de 10% de V_{nom} ; e de corrente entre 10% de I_{nom} (0,5 A) até 200% de I_{nom} (10 A), em passos de

17,27% (0,864 A), com um total de 12 patamares. Os passos de variação dos módulos de tensão e de corrente foram realizados simultaneamente, uma vez que a operação dos canais de tensão e de corrente são independentes, tanto na mala de testes quanto nas PMUs ensaiadas. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Ensaio de Variação de Frequência

	Taxa de 20 frames/s			Taxa de 60 frames/s		
	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (mHz/s)	TVE (%)	FE (mHz)	RFE (mHz/s)
Limites Máximos	1	5	10	1	5	10
RPV-304	0,25	0,134	15,411	0,15	0,748	45,776
RPV-310	0,19	0,435	10,834	0,12	0,580	22,888
RPV-311	0,20	0,481	14,877	0,21	0,893	56,992

3.3 – Ensaio de Variação de Ângulo

Neste ensaio variaram-se os ângulos dos sinais de entrada entre -180° e $+180^\circ$, de forma contínua. Para isso, programou-se um estado único na mala de testes, com a frequência dos sinais em 60,12 Hz. O tempo total de ensaio foi de 34s, suficiente para que os ângulos variassem em toda a faixa de excursão por mais de 4 ciclos. A variação dos ângulos de tensão e de corrente foi realizada simultaneamente. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaio de Variação de Módulo e de Ângulo

Limite	TVE _{máx} = 1%			
	Ensaio de Variação de Módulo		Ensaio de Variação de Ângulo	
	Taxa de 20 frames/s	Taxa de 60 frames/s	Taxa de 20 frames/s	Taxa de 60 frames/s
RPV-304	0,33	0,35	0,11	0,05
RPV-310	0,40	0,47	0,11	0,04
RPV-311	0,47	0,46	0,10	0,07

3.4 – Ensaio de Degraus de Módulo e de Ângulo

Os tempos de resposta e de atraso típicos de uma PMU são menores que o período de amostragem dos sincrofasores (inverso da taxa de envio de sincrofasores). Então, para a determinação precisa destes tempos, seria necessária uma taxa de envio consideravelmente maior que as taxas nominais.

Uma forma de se conseguir um aumento da resolução nos pontos medidos é realizar "n" repetições de cada ensaio de aplicação do mesmo degrau, defasando-se os instantes de aplicação do degrau de "T/n" a cada repetição, sendo "T" o período de amostragem de sincrofasores. Ao término do processo repetitivo, uma curva detalhada pode ser montada a partir das "n" repetições, intercalando-se os pontos de cada repetição. A curva de dados resultante equivale à mesma PMU operando com uma taxa de envio de "n" vezes a taxa nominal [13].

Assim, o procedimento usado para o ensaio de degraus de módulo e de ângulo foi o seguinte:

- Procedimento para um ciclo:
 - Parte-se da condição nominal, mantendo-se o estado por 1s;
 - Aplica-se o degrau positivo na grandeza sob ensaio, mantendo o estado por 1s;
 - Aplica-se o degrau negativo na grandeza sob ensaio, retornando-se para a condição nominal, mantendo o estado por 1s;
- Repete-se o ciclo acima por 10 vezes, adiantando-se o início de cada ciclo subsequente em $(1/10 \times 1/\text{taxa})$ s;
- O 3º patamar do ciclo anterior (retorno à condição nominal) é o mesmo 1º patamar do ciclo seguinte;
- Tempo de ensaio para cada grandeza variada: 21s;
 - 21 estados e 20 transições;
- Aplica-se o procedimento acima para os degraus de módulo ($\pm 10\%$), e em seguida repete-se o processo aplicando-se os degraus de ângulo ($\pm 10^\circ$);
 - O último patamar do último ciclo de variação de módulo (retorno à condição nominal) é o mesmo 1º patamar do 1º ciclo de variação de ângulo;
 - Total do ensaio: 41 estados, 40 transições;
 - Tempo total do ensaio: 41s;
- Montam-se as curvas detalhadas dos sincrofasores medidos, a partir das 10 repetições de cada ciclo;
 - Nas curvas detalhadas haverá 5 estados, 4 transições;
 - As duas primeiras transições são degraus de módulo, e as duas seguintes de ângulo;
 - Taxa de amostragem detalhada resultante: $10 \times$ taxa do ensaio;
 - Período detalhado: 3s;

- Calcula-se os erros TVE, FE e RFE a partir das curvas detalhadas.

Na Figura 3(a) é mostrado um exemplo de transição entre um estado e outro (curva em azul), durante a aplicação de um degrau de módulo de tensão no sinal de entrada da PMU (curva em vermelho). Na Figura 3(b) é mostrada a mesma transição, porém considerando-se a curva detalhada, montada a partir da intercalação de 10 repetições de aplicação do mesmo degrau, conforme o procedimento descrito acima. Ambos os gráficos mostram uma mesma janela de tempo (as escalas das abscissas estão mostradas em "pontos", e não diretamente em segundos). Observa-se um aumento considerável de resolução da curva, melhorando-se desta forma a exatidão na determinação dos tempos de resposta e de atraso.

Para exemplificar o processo de montagem das curvas detalhadas, na Figura 4(a) são mostrados os dados de módulo de tensão obtidos durante pouco mais de um ciclo de repetições da aplicação de degraus de módulo de tensão. Pode-se observar a aplicação de dois degraus consecutivos, estando o segundo adiantado de 1,667ms, ou 0,1 ciclo de rede em relação ao degrau anterior. Os pontos de cada repetição são intercalados, compensando-se as defasagens consecutivas usadas na aplicação de cada degrau, e a curva resultante é a mostrada na Figura 4(b). Os pontos das demais repetições da aplicação de degrau, fora dos limites na Figura 4(a), formam os demais pontos da curva da Figura 4(b).

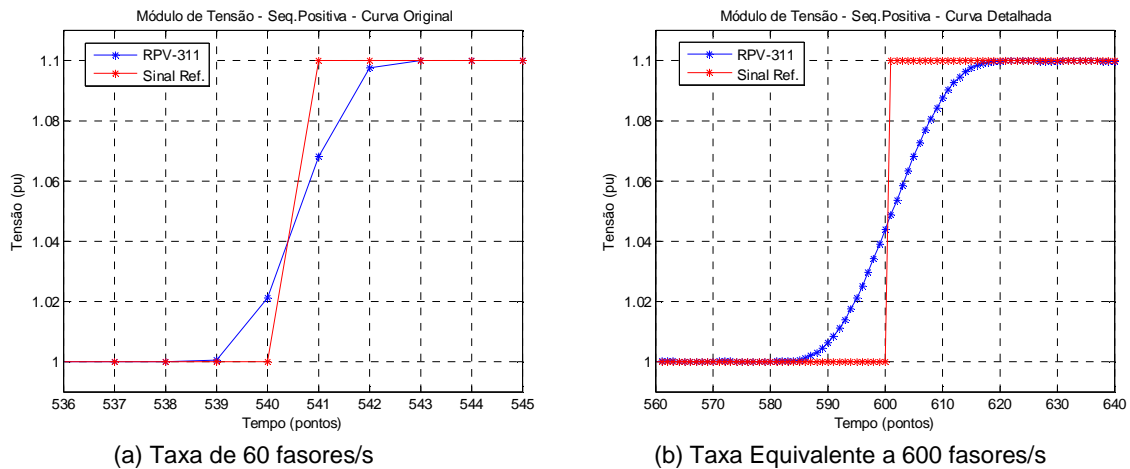


FIGURA 3 – Detalhe de uma Transição – Degrau Positivo de Tensão

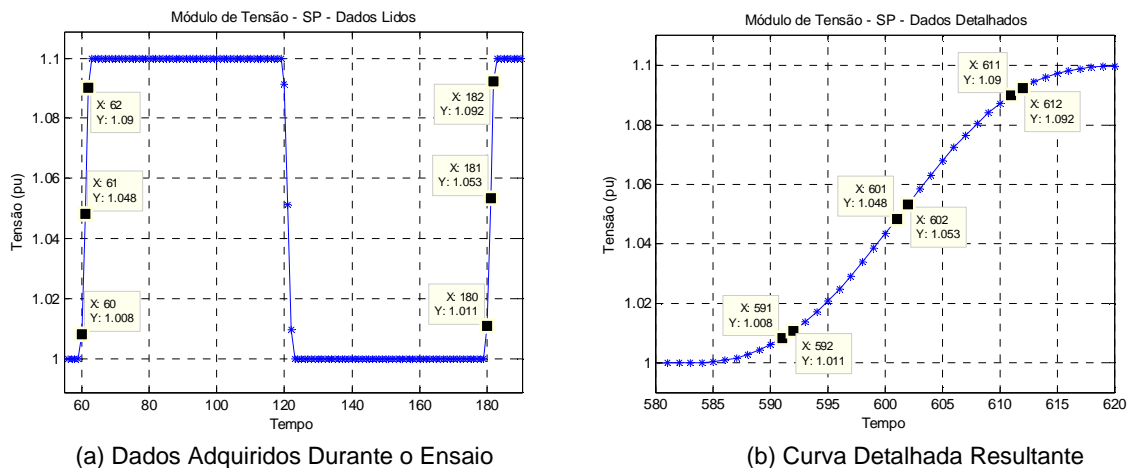


FIGURA 4 – Montagem da Curva Detalhada

A partir dos erros TVE, FE e RFE, calculados com base nas curvas detalhadas, foram determinados os tempos de atraso e de resposta, e o *overshoot*. Os resultados são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

4.0 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Observe-se nas Tabelas 1, 2, 3, e 4 que as PMUs sob ensaio atenderam os limites de TVE, FE, tempo de atraso, *overshoot*, e tempo de resposta em relação à TVE e FE, em todos os ensaios realizados. Algumas situações de não conformidade foram detectadas em relação ao RFE, e tempos de resposta respectivos (células marcadas em

amarelo). O valor limite para o RFE dado na norma IEEE C37.118.1-2011, para todas as condições de ensaio apresentadas acima, é de 10 mHz/s enquanto que para o FE, nestas condições, é de 5 mHz.

Tabela 3 – Ensaio de Degraus de Módulo e de Ângulo – 20 frames/s

Tempo de Atraso			Overshoot		
Equipamento	Módulo	Ângulo	Equipamento	Módulo	Ângulo
Limite	12,50ms	12,50ms	Limite	10%	10%
RPV-304	5,000ms	0ms	RPV-304	0,14%	0,71%
RPV-310	5,000ms	0ms	RPV-310	0,25%	0,66%
RPV-311	5,000ms	5,000ms	RPV-311	0,17%	0,72%

Tempo de Resposta						
Equipamento	Degrau de Módulo			Degrau de Ângulo		
	TVE (1%)	FE (5mHz)	RFE (10mHz/s)	TVE (1%)	FE (5mHz)	RFE (10mHz/s)
Limite	0,282s	0,478s	0,520s	0,282s	0,478s	0,520s
RPV-304	0,095s	0s	0,290s	0,115s	0,330s	0,390s
RPV-310	0,095s	0s	0,300s	0,115s	0,085s	0,400s
RPV-311	0,095s	0s	≥0,9s	0,115s	0,080s	≥0,9s

Tabela 4 – Ensaio de Degraus de Módulo e de Ângulo – 60 frames/s

Tempo de Atraso			Overshoot		
Equipamento	Módulo	Ângulo	Equipamento	Módulo	Ângulo
Limite	4,167ms	4,167ms	Limite	10%	10%
RPV-304	1,667ms	1,667ms	RPV-304	0,41%	0,50%
RPV-310	1,667ms	1,667ms	RPV-310	0,26%	0,50%
RPV-311	1,667ms	1,667ms	RPV-311	0,52%	0,34%

Tempo de Resposta						
Equipamento	Degrau de Módulo			Degrau de Ângulo		
	TVE (1%)	FE (5mHz)	RFE (10mHz/s)	TVE (1%)	FE (5mHz)	RFE (10mHz/s)
Limite	0,079s	0,120s	0,129s	0,079s	0,120s	0,129s
RPV-304	0,032s	0s	0,255s	0,038s	0,085s	≥0,3s
RPV-310	0,032s	0s	≥0,3s	0,038s	0,098s	≥0,3s
RPV-311	0,032s	0,002s	≥0,3s	0,038s	0,112s	≥0,3s

Obs.:

1) Tempos de resposta de "0s" indicam que o erro não chegou a sair do seu limite durante o degrau aplicado.

2) O método usado para a detecção do tempo de resposta tem um limite máximo de 0,9s na taxa de 20 frames/s, e de 0,3s a 60 frames/s.

Considerando-se que a taxa de variação de frequência é calculada a partir de valores consecutivos de frequência, que por sua vez é calculada a partir de valores consecutivos de ângulos absolutos de tensão de sequência positiva, que influenciam diretamente o TVE, estes três limites de erros devem ser coerentes entre si.

Um erro de frequência (FE) de ± 5 mHz equivale a diferenças de até 10 mHz em valores de frequência medidos entre frames de dados consecutivos. Em uma taxa de transmissão de 1 frame/s, esta variação equivale a: $10 \text{ mHz} / (1 / 1 \text{ frame/s}) = 10 \text{ mHz/s}$. Porém, quando a taxa de transmissão é maior, diminui-se o período entre medidas consecutivas, e a mesma variação de frequência entre um ponto e outro equivale a valores maiores de taxa de variação de frequência. Por exemplo, a 20 frames/s, 5 mHz em FE equivalem a 200 mHz/s em RFE; já a 60 frames/s, os mesmos 5 mHz em FE equivalem a um RFE de 600 mHz/s.

Porém, o limite de RFE definido na norma IEEE C37.118.1-2011, para os casos dos ensaios apresentados acima, é sempre de 10 mHz/s, independente da taxa de transmissão em cada ensaio. Se forem considerados os limites de 200 mHz/s e 600 mHz/s para o RFE, nas taxas de 20 e 60 frames/s, respectivamente, pode-se observar que os equipamentos atenderiam os limites com folga no ensaio de variação de frequência (Tabela 1). Considerando-se estes novos limites de RFE para a determinação dos tempos de resposta nos ensaios de degraus de módulo e de ângulo, os resultados foram analisados novamente e estão apresentados na Tabela 5. Outros trabalhos de análise de ensaios de PMU também têm levantado questões desta natureza [12]. Na norma IEEE Std C37.242-2013 [19] apresentam-se resultados informativos com relação a um modelo de PMU referência em seu anexo B. De uma

maneira geral, os resultados de RFE são da ordem de 1000 vezes maiores que os de FE, confirmando a assertiva de que a relação entre FE e RFE deve ser aumentada na norma de PMUs.

Tabela 5 – Tempos de Resposta com RFE Ajustado

Tempo de Resposta – RFE Ajustado				
Equipamento	Degrau de Módulo		Degrau de Ângulo	
	$F_s=20$ RFE (200mHz)	$F_s=60$ RFE (600mHz/s)	$F_s=20$ RFE (200mHz)	$F_s=60$ RFE (600mHz/s)
Limite	0,520s	0,129s	0,520s	0,129s
RPV304	0s	0s	0,325s	0,095s
RPV310	0s	0s	0,245s	0,090s
RPV311	0s	0s	0,335s	0,098s

4.1 – Considerações sobre Exatidão de PMUs

Neste tópico pretende-se apenas introduzir a discussão acerca de quanto a exatidão de PMUs, para processos estáticos e dinâmicos, importa para as aplicações planejadas para estes dispositivos. A utilização de dados e definição de aplicações que utilizem dados fasoriais é altamente relacionado com os problemas específicos de cada operador ou transmissora. Com a definição das aplicações prioritárias os requisitos de exatidão necessários podem ser melhor definidos. Este assunto é vasto e pretende-se apenas situar as discussões precedentes no âmbito do contexto no qual serão instalados estes equipamentos.

Os dados de medição fasorial têm-se mostrado importantes para a análise de ocorrências e blackouts [20]. Esta é a principal aplicação prática da tecnologia até o momento. Para esse tipo de aplicação, a PMU deve estar preparada para fornecer dados sob condições de larga variação de frequência, como apresentado em [21] e em [22].

Outra aplicação de relevância é a estimação de estados, como descrita na referência [23]. Verificou-se que as medidas de PMUs auxiliam na utilização de estratégia de eliminação múltipla de medidas, permitindo a identificação mais rápida dos ramos suspeitos de erros grosseiros de medição. Contudo, para se conseguir este objetivo, a exatidão do sistema de medição envolvendo PMUs e os sensores deve ser melhor que os requisitos de medição operacional, e acredita-se ser verdade na maioria dos casos, devido aos requisitos de exatidão requeridos nas normas atuais de PMUs. Várias outras aplicações estáticas são descritas na literatura [24], tais como detecção de diferença angular, apoio no fechamento de conexões em paralelo, e outras.

Outra aplicação discutida na literatura [05][24] é a identificação de modos de oscilação. Evidentemente, a exatidão das PMUs influencia nos valores obtidos e deve ser avaliada. Contudo, deve-se sempre lembrar que os algoritmos que usam processos recursivos e estatísticos para análise modal permitem auto correção e tendem a atenuar eventuais dificuldades devido à exatidão.

Para todas as aplicações, a exatidão de PMUs deve ser estudada caso a caso, e é um campo aberto para investigações.

5.0 – CONCLUSÕES

Neste informe foram apresentados alguns dos ensaios de conformidade de PMU, propostos na norma IEEE C37.118.1-2011, bem como os procedimentos e resultados da aplicação destes ensaios em PMUs comerciais. O objetivo foi descrever o processo de ensaio em si, sem necessariamente se apresentar comparações entre equipamentos de fabricantes diferentes, buscando-se fomentar discussões a respeito dos ensaios e limites aplicados aos equipamentos dos WAMS, em especial às PMUs.

A infraestrutura usada para os ensaios envolveu uma mala de testes com função de sincronização ao GPS, função esta imprescindível para as análises de erros relacionados aos ângulos dos sincrofasores, devido à ausência de equipamentos de referência disponíveis no mercado para este fim.

O ensaio de regime dinâmico, com a aplicação de degraus de módulo e de ângulo, mostrou-se complexo devido à necessidade de aumento de resolução para a obtenção das medidas fasoriais, com a repetição sucessiva de degraus defasados no tempo. O procedimento recomendado na norma IEEE C37.118.1-2011 foi reproduzido com sucesso.

Observou-se nos resultados apresentados que as PMUs ensaiadas atenderam os limites de TVE, FE, tempo de atraso, *overshoot*, e tempo de resposta em relação à TVE e FE, em todos os ensaios realizados. Algumas situações de não conformidade foram detectadas em relação ao RFE, e tempos de resposta respectivos. Uma análise detalhada do limite de RFE proposto na norma IEEE C37.118.1-2011, em comparação com os limites de FE e de TVE, mostrou que o limite de RFE proposto pode estar incompatível com os demais limites. Esta percepção já foi sentida por outras equipes, e vem incitando uma revisão antecipada da norma para adequá-la a

limites factíveis em função da aplicação a qual se destinam. Consta-se, ainda, uma carência de literatura e discussões desses requisitos.

A norma IEEE C37.118.1-2011 propõe, ainda, outros ensaios não abordados neste informe, tais como de distorção harmônica e de interferência de sinais fora de banda (*Out-of-band*), em regime permanente, e de modulação de módulo e de ângulo, de rampa de frequência e de latência, em regime dinâmico. A realização destes ensaios está em andamento, e deverá ser tema de um próximo trabalho, a ser apresentado em breve.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, 1 ed. Blacksburg, VA. Springer, 2008. doi: 10.1007/978-0-387-76537-2.
- [02] Projeto MedFasee. (2013) [On-line]. Disponível: <http://www.medfasee.ufsc.br/>
- [03] DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N.; DOTTA, D. et al. Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo de Sistema de Medição Fasorial Sincronizada no Sistema de Transmissão de 440 KV da CTEEP. In: *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE*. Florianópolis, SC, Outubro de 2011.
- [04] RAMOS, M.A.F.; OLIVEIRA, D. B.; SILVA FILHO, J. E. et al. Instalação de PDC de Subestação na Estrutura da Rede de Oscilografia. In: *XI Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Florianópolis, Novembro de 2012.
- [05] JEREMIAS, T.; ZIMMER, V.; DECKER, I. C. et al. Estudo do Desempenho de Metodologias para o Monitoramento em Tempo Real dos Modos de Oscilações Eletromecânicas do SIN utilizando Medição Fasorial Sincronizada. In: *XI Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Florianópolis, SC, Novembro de 2012.
- [06] TREVISAN, F.; DECKER, I. C.; AGOSTINI, M. N. et al. Validação de Parâmetros de Unidades Geradoras Usando Dados de Medição Fasorial Sincronizada e Simulação Dinâmica Híbrida. In: *XXI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE*. Florianópolis, SC, Outubro de 2011.
- [07] PESENTE, J. R.; DECKER, I. C.; SILVA, A. S. Estudo da Utilização de Medição Sincronizada de Fasores para o Esquema de Controle de Emergência do Sistema de Transmissão de Itaipu em 60Hz. In: *X Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Recife, PE, Outubro de 2010.
- [08] ESCALANTE, S. L.; BOMFIM, A. L. B.; TARANTO, G. N. et al. Utilização de Sinais Remotos de PMUs Sincronizados na Estabilização do Sistema Interligado Nacional. In: *XX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE*. Recife, PE, Novembro de 2009.
- [09] ALVES JUNIOR, J. E. R.; OLIVEIRA, S. C. G.; WATANABE, E. H. Análise de Algoritmos Internos de Unidades de Medição Fasorial. In: *XI Seminário Técnico de Proteção e Controle – STPC*. Florianópolis, Novembro de 2012.
- [10] DOTTA, D.; CHOW, J. H.; VANFRETTI, L. et al. A MATLAB-based PMU Simulator. Accepted at the *IEEE PES General Meeting*, Vancouver, BC, Canada, July 2013.
- [11] DOTTA, D.; CHOW, J. H. Second Harmonic Filtering in Phasor Measurement Estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2242701, April 2012.
- [12] ROSCOE, A. J.; ABDULHADI, I. F.; BURT, G. M. P-Class Phasor Measurement Unit algorithms using adaptive filtering to enhance accuracy at off-nominal frequencies. *Smart Measurements for Future Grids (SMFG), IEEE International Conference on Digital*. doi: 10.1109/SMFG.2011.6125761. November, 2011.
- [13] IEEE Std. for Synchrophasor Measurements for Power Systems. IEEE Std C37.118.1-2011. December 2011.
- [14] IEEE Std. for Synchrophasors for Power Systems. IEEE Std C37.118-2005. June 2005.
- [15] MORAES, R.M.; HU, Y.; STENBAKKEN, G. et al. PMU Interoperability, Steady-State and Dynamic Performance Tests. *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 4. doi: 10.1109/TSG.2012.2208482. December 2012.
- [16] Reason Tecnologia. (2013) [On-line]. Disponível: <http://www.reason.com.br/>
- [17] Omicron. (2013) [On-line]. Disponível: <http://www.omicronusa.com/>
- [18] PMU Connection Tester. (2013) [On-line]. Disponível: <http://pmuconnectiontester.codeplex.com/>
- [19] IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control. IEEE Std C37.242™-2013. March 2013.
- [20] AKKE, M.; THORP, J. Sample Value Adjustment Improves Phasor Estimation at Off-Nominal Frequencies. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, October, 2010.
- [21] RUIZ, C. et al. The Colombian 2007 blackout. In: *IEEE Transmission and Distribution Conference*, 2008.
- [22] DECKER, I. C.; DOTTA, D.; AGOSTINI, M. N. et al. Monitoring of a Large Scale Event in the Brazilian Power System by WAMS. In: *International Institute for Research and Education in Power Systems (IREP) – VIII Bulk Power System Dynamics and Control*. Búzios, RJ, Agosto de 2010.

[23] MORAES, R. M. *Sincrofasores em Sistemas de Potência: aplicações na estimação de estado*. Tese de Doutorado, UFF, 2009.

[24] Volskis, H. et al. Aplicações de PMU e seu impacto na operação do SIN. In: *X EDAO – Encontro para Debates de Assuntos de Operação*. São Paulo, 2008.

7.0 – DADOS BIOGRÁFICOS



Marcelo Neujahr Agostini é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, 1996) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, 2002). Participa do Projeto MedFasee desde 2002, projeto pioneiro no desenvolvimento da tecnologia de medição fasorial no Brasil. Áreas principais de interesse: medição fasorial sincronizada, modelagem e dinâmica de sistemas elétricos, modelagem orientada a objetos, engenharia de software e computação de alto desempenho aplicadas a sistemas elétricos.



Sérgio Luiz Zimath formou-se em Engenharia de Controle e Automação em 1997 na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem trabalhado para Reason Tecnologia desde 1995 onde foi o responsável pelo desenvolvimento de diversos produtos, tais como RT1000 e RT2000 (relógios GPS), bem como do Registrador Digital de Perturbações RPIV, entre outros. Atualmente é o Diretor de Inovação, responsável pelo desenvolvimento de novos produtos, softwares e projetos de pesquisa de novas tecnologias.



José Eduardo da Rocha Alves Junior 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.



Daniel Dotta é graduado em Engenharia Elétrica (2000), mestre (2003) e doutor em Sistemas de Energia Elétrica (2008) pela Universidade Federal de Santa Catarina, com estágio de pesquisa no Rensselaer Polytechnic Institute (RPI, 2011). Atualmente é professor do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Suas áreas principais de interesse são medição fasorial sincronizada, controle e engenharia de software aplicadas a sistemas elétricos.