



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

Características e Aplicação de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada

**Murilo Reolon Scuzziato¹, Suzana Mensch de Carvalho², Jonas Roberto Pesente²,
Robson Almir de Oliveira¹, José Luiz Pereira dos Santos²**

¹Centro de Engenharias e Ciências Exatas – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
(UNIOESTE)

²Instituto de Tecnologia Aplicada e Inovação (ITAI)/Laboratório de Automação e Simulação de
Sistemas Elétricos (LASSE)

Foz do Iguaçu - Brasil

RESUMEN

A ampliação dos sistemas de energia elétrica com a interligação de diferentes áreas, devido ao crescimento da demanda, tem aumentado cada vez mais a complexidade dos sistemas de monitoramento, controle e proteção, os quais garantem a confiabilidade da operação do sistema elétrico. Novas tecnologias têm sido propostas para atender aos requisitos de operação, como por exemplo, os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (*Synchronized Phasor Measurement Systems - SPMS*), que não estão sujeitos aos erros normalmente presentes nos métodos indiretos (estimação de estado) para a medição dos ângulos de fase e a defasagem entre duas grandezas diferentes. O SPMS é composto por Unidades de Medição Fasorial (*Phasor Measurement Unit - PMU*), que utilizam como base de tempo uma fonte eficaz de sincronização, representada pelo sistema GPS (*Global Position System*), que viabiliza a realização da medição de grandezas fasoriais em instalações geograficamente distantes. O SPMS permite a obtenção de medidas coerentes para representar o estado de um sistema elétrico de potência, com o tempo de processamento reduzido a patamares compatíveis com aplicações em tempo real, e pode ser utilizado no estudo de fenômenos de longa duração. A pesquisa apresentada neste artigo descreve a arquitetura básica dos SPMS e a metodologia utilizada no cálculo do fasor. A principal proposta é a implementação das técnicas de medição fasorial utilizando o software Scilab, com o objetivo de simular o funcionamento de uma PMU. Também será avaliada a utilização da medição fasorial sincronizada na análise de grandezas do sistema elétrico.

PALABRAS CLAVES

Sistema de Medição Fasorial Sincronizada, Unidade de Medição fasorial, SPMS, PMU.

Murilo Reolon Scuzziato – muriloscz@gmail.com

1. SISTEMA DE MEDIÇÃO FASORIAL SINCRONIZADA

Um sistema de medição fasorial sincronizada é constituído basicamente por unidades de medição fasorial (PMUs), concentrador de dados (Phasor Data Concentrator -PDC), receptores do sinal de GPS e canais de comunicação entre as PMUs e o PDC. Esta estrutura básica está representada na Figura 1.

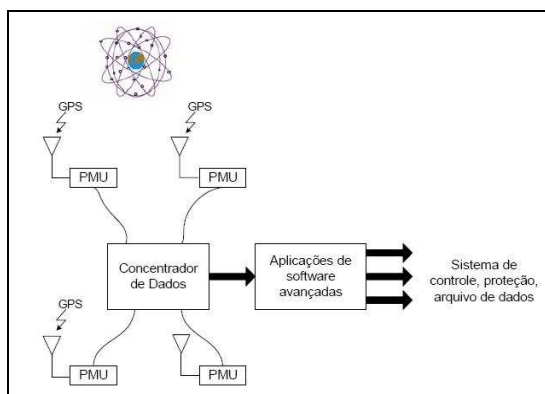


Figura 1 - Estrutura básica de um SPMS [1]

De um modo geral, os sinais elétricos são amostrados em pontos estratégicos do sistema, como as tensões trifásicas nas barras e as correntes trifásicas nas linhas, transformadores e alimentadores das subestações. Essas amostras são utilizadas nos algoritmos para o cálculo do módulo e ângulo dos fasores. Através de uma fonte de sincronização adequada os dados obtidos são associados a uma etiqueta de tempo e enviados ao PDC, através de canais adequados de comunicação, de acordo com os padrões definidos pela norma IEEE C37.118. No concentrador são reunidos os dados de todas PMUs, compondo assim um 'retrato' do estado do sistema.

1.1 Fonte de Sincronização

O GPS é usado como fonte de tempo absoluta para satisfazer aos requisitos de precisão de tempo e confiabilidade exigidos nos SPMS. Ele emite um pulso, que fornece o instante exato em que deve ocorrer a aquisição dos dados, de modo que todas as medições obtidas do sistema de energia elétrica fiquem com a mesma base de tempo.

O erro no pulso de sincronização é da ordem de $1\mu\text{s}$, que corresponde a um erro angular da ordem de $0,021^\circ$ para o sistema elétrico com frequência nominal de 60Hz.

1.2 Concentrador de Dados

O PDC tem a função de receber e reunir de forma coerente os fasores enviados pelas PMUs do SPMS, disponibilizando-os para o uso em aplicações de monitoramento, controle e proteção.

Os dados são recebidos de forma assíncrona pelo PDC que, através das etiquetas de tempo (*time tags*) com as quais os fasores são formatados, ordena-os de modo a formar conjuntos de medidas fasoriais referentes ao mesmo instante de tempo.

Este processo é realizado continuamente, gerando um fluxo de dados capaz de representar o estado do sistema de forma bastante próxima à situação em tempo real, e que pode ser armazenado em memória ou apresentado graficamente em monitores [2].

1.3 Canais de comunicação

Os canais de comunicação têm o objetivo de viabilizar a transferência de dados entre as PMUs e o PDC atendendo aos requisitos temporais especificados para este tipo de aplicação. A especificação do canal de comunicação vai depender da taxa de geração dos fasores, quantidade de informações enviadas e tempo de latência tolerável pela aplicação.

1.4 Unidade de medição fasorial (PMU)

A estrutura básica de uma PMU é ilustrada na Figura 2. Este equipamento é composto por um sistema de aquisição (módulo de filtragem e módulo de conversão analógica/digital), por um microprocessador e módulo que recebe e processa sinal do sistema GPS.

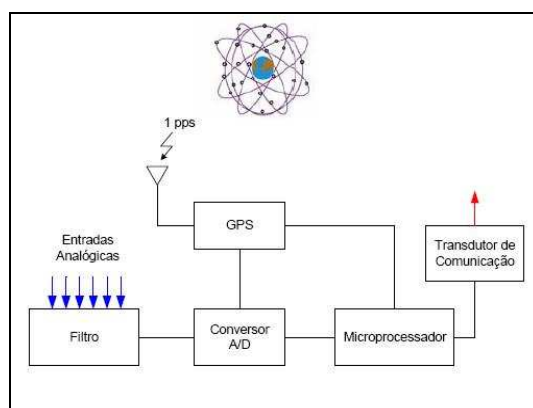


Figura 2 - Estrutura básica de uma PMU [1]

O processo de obtenção das medidas fasoriais inicia-se com a etapa de acondicionamento, onde os sinais oriundos de TCs e TPs auxiliares do sistema elétrico são filtrados, visando evitar efeitos de *aliasing*. Os sinais de tensão e corrente são então discretizados utilizando-se conversores A/D e recebem a referência temporal do GPS. Segundo PHADKE [3], uma taxa de amostragem de 720Hz, que na frequência nominal de 60Hz equivale a 12 aquisições por ciclo, tem-se mostrado suficiente em diversas aplicações.

No microprocessador as amostras são tratadas matematicamente, através do uso de métodos para o cálculo das grandezas fasoriais, como a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform - DFT*).



Os fasores calculados são empacotados juntamente com outras grandezas que podem também ser adquiridas/calculadas pelas PMUs, como frequência, variação de frequência e sinais de estado de equipamentos, e então enviados ao concentrador de dados. [2].

1.5 Aplicações

Os dados disponibilizados pelo SPMS podem ser utilizados em diversas aplicações de monitoramento, controle e proteção em sistemas elétricos de potência.

Dentre as principais, destacam-se o registro do desempenho dinâmico do sistema, monitoramento de grandezas em tempo real, a melhoria da estimação de estados, a identificação dos modos de oscilações locais e entre áreas e a localização de faltas.

Além disso, os dados do SPMS são usados na avaliação da confiabilidade dos resultados de simulações e contribuem para a modelagem de novos sistemas e equipamentos.

2. CÁLCULO DO FASOR

2.1 Definição de fasor

Uma tensão ou corrente senoidal em regime permanente, dada pela equação 1, pode ser representada por um fasor, cujo módulo e ângulo calculados a partir das equações 2 e 3.

$$v(t) = A \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

$$|v(t)| = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$\varphi_v(t) = \varphi_0 \quad (3)$$

Onde, o módulo é dado pelo valor médio quadrático ou valor eficaz da onda e φ_0 depende da escala de tempo.

De acordo com a norma IEEE C37.118, o módulo e ângulo de um fasor são calculados com dados amostrados usando um sinal de tempo comum para as medidas das grandezas feitas em regime permanente e na frequência nominal do sistema. Assim, sincrofasores de locais diferentes têm a mesma referência temporal.

Enquanto a frequência estiver em seu valor nominal a medição do ângulo de fase permanece constante. Porém para valores diferentes da frequência nominal, a norma abre o caminho para os fabricantes de equipamentos criarem suas próprias definições. Ou seja, a norma não possui requisitos relativos à precisão da medição da magnitude dos fasores para valores diferentes dos da frequência nominal do sistema [4].

2.2 Algoritmo de Fourier

A transformada ou filtro de Fourier é utilizado para extrair as informações das componentes fundamental e suas harmônicas. Na prática, a conversão das amostras em medidas fasoriais através da DFT resume-se à implementação da seguinte expressão matemática:

$$\overrightarrow{X}_n = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [x_k (\cos(K\theta) - j\text{sen}(K\theta))] \quad (4)$$

Onde:

$$\theta = \frac{2\pi}{N} = 2\pi f\tau ; n = (0,1,2,3,\dots)$$

Onde N é o número de amostras realizadas em um período da frequência nominal do sistema e τ o intervalo de amostragem correspondente.

2.3 Espalhamento Espectral

A DFT produz um espectro discreto em frequência consistido pela componente fundamental (60Hz, no caso brasileiro) e suas harmônicas. Porém quando a quantidade de amostras (N), utilizadas no cálculo, é diferente de um múltiplo inteiro do período da fundamental ocorre o espalhamento espectral.

Segundo MIRANDA[5] não haverá o efeito do vazamento espectral no cálculo dos fasores para o caso em que a frequência de amostragem do sinal for múltipla inteira da metade da frequência fundamental da rede elétrica. A frequência de amostragem deve ser, no mínimo, igual a duas vezes a frequência da rede elétrica, atendendo o critério de Nyquist.

Se o sinal elétrico a ser analisado possuir a frequência fundamental distinta da frequência nominal, o valor da componente fundamental calculada pela DFT irá apresentar um erro, que aparece na forma de uma oscilação no valor da amplitude do módulo ao longo do tempo [4].

Para reduzir o problema do espalhamento espectral costuma-se multiplicar o sinal por funções no tempo chamadas usualmente de janelas.

A Figura 3 mostra o módulo da filtragem de Fourier para a frequência nominal de 60Hz, utilizando-se diferentes tipos de janelas, de um sinal cuja frequência de oscilação é 59,5Hz. Como pode ser observado, a janela triangular possui melhor desempenho do que as janelas retangular, hamming e hann.

Estudos [5] mostram que para uma variação pequena da frequência fundamental, com exceção da janela retangular, o ângulo não apresenta variação notável, mesmo quando há variação na amplitude.

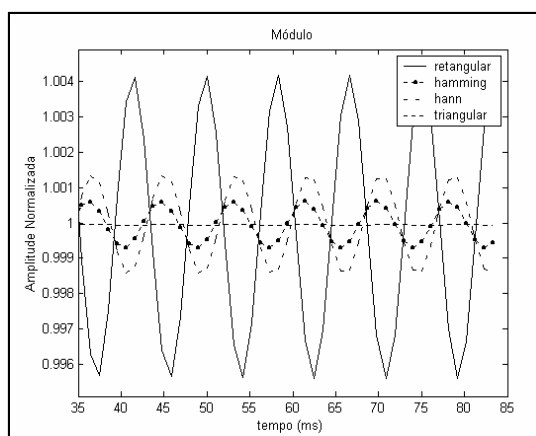


Figura 3 - Módulo de um sinal de 59,5 Hz calculado através da DFT [5]

3. SIMULAÇÃO DE UMA PMU

Após um estudo aprofundado sobre as características e utilização da medição fasorial, utilizou-se o software Scilab para determinar uma técnica apropriada de redução do erro gerado pela DFT, introduzido pela variação da frequência do sinal em relação a nominal.

Para o cálculo dos fasores, a partir de sinais de tensão amostrados, foram utilizadas duas metodologias, descritas na Figura 4.

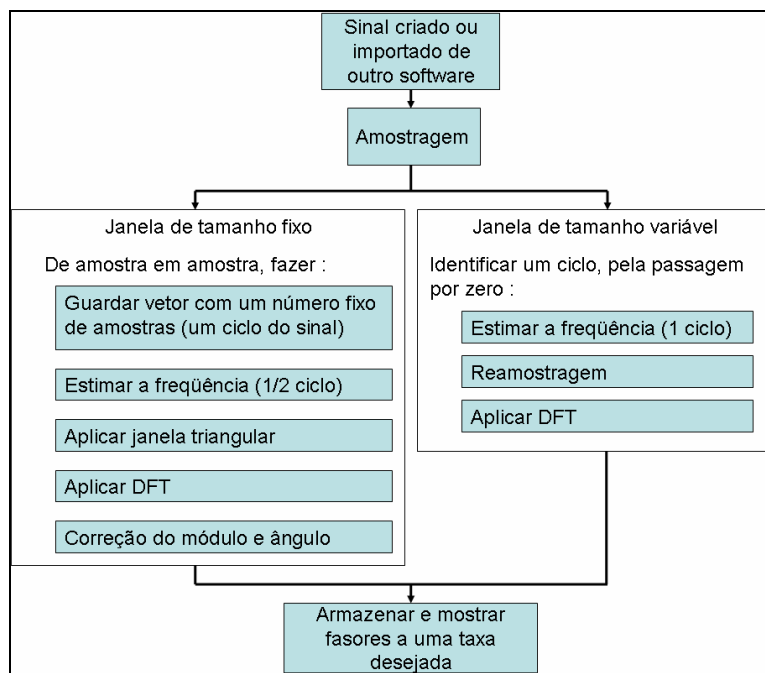


Figura 4 - Estrutura dos algoritmos

Com o objetivo de avaliar o desempenho da técnica de medição fasorial os sinais de tensão gerados pelo software ATP, no qual está implementado o sistema de transmissão que interliga a usina de Itaipu à subestação de Ivaiporã (conforme Figura 5) foram utilizados como sinais de entrada no algoritmo que simula uma Unidade de Medição Fasorial, no software Scilab. Em seguida, as técnicas descritas anteriormente foram utilizadas para obtenção do módulo e do ângulo dos fasores destas grandezas.

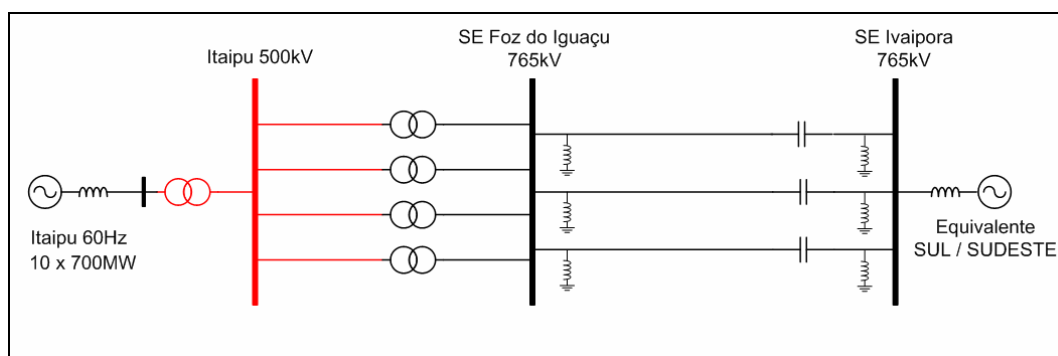


Figura 5 - Sistema de transmissão de 765kV

O mesmo sistema de transmissão foi implementado no software ANAREDE, nas mesmas condições de operação, para a validação dos valores obtidos na simulação da filosofia de uma PMU através do software Scilab.

3.1 Resultados Preliminares e Considerações

Os resultados para o sistema em regime, operando com sua frequência nominal e utilizando a metodologia de janela fixa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Módulo da tensão e defasagem angular entre as barras do sistema testado

| Barra | Módulo [pu] | | Defasagem Angular [graus] | | | |
|---------------|-------------|------------|---------------------------|---------------|---------|------------|
| | ANAREDE | Scilab-PMU | De | Para | ANAREDE | Scilab-PMU |
| Itaipu | 1,010 | 1,009 | Itaipu | Foz do Iguaçu | 7,1 | 7,3 |
| Foz do Iguaçu | 0,962 | 0,960 | Foz do Iguaçu | Ivaiporã | 14,3 | 14,1 |
| Ivaiporã | 0,999 | 1,002 | | | | |

Observa-se que os resultados obtidos no Scilab estão bem próximos dos valores gerados no ANAREDE. A pequena diferença é devido à condição inicial nos dois softwares não ser exatamente a mesma.

Os testes realizados com sinais de frequência variável foram realizados utilizando sinais gerados no próprio Scilab e os TVEs (Total Vector Error) obtidos foram abaixo de 1% conforme exige a norma.



Novos testes com diferentes condições de operação e variações das grandezas de entrada serão realizados com o intuito de verificar a conformidade com todos os requisitos exigidos pela norma IEEE C37.118.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ehrensperger, Juliana Gubert; Decker, Ildemar Cassana. (2003) “Sistemas de Medição Fasorial: Estudo e Análise do Estado da Arte”, Relatório Técnico Interno LabPlan RT-01/2003. Florianópolis.
- [2] Agostini, Marcelo N. (2004) “Simulador de Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada”, Relatório Técnico Interno LabPlan RT-01/2004. Florianópolis.
- [3] Phadke, A.G.; Pickett, B.; Adamiak, M. et al. (1994) “*Synchronized Sampling and Phasor Measurements for Relaying and Control*”, IEEE Transactions on Power Delivery, New York, Janeiro, vol. 9, n. 01, p. 442-452.
- [4] Teodoro, Fernando Henrique. (2007) “Estudo e avaliação do desempenho de sistemas de medição fasorial sincronizada”, Monografia - Universidade Federal de Santa Catarina.
- [5] Miranda, André Luiz Lins. (2005) “Projetos de filtros digitais para análise de sinais do sistema elétrico”, Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Do Rio De Janeiro.