



XIV SNTPEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

FL/GPC/18
BELÉM-PA/BRASIL/1997

GRUPO V PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GPC)

UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO DE OSCILAÇÕES: APLICAÇÃO NO SISTEMA ARGENTINO

Mauro Pacheco Ferreira *
REIVAX Automação e Controle

Marcos Fischborn
REIVAX Automação e Controle

Paulo Marcos Paiva
REIVAX Automação e Controle

Rodrigo Mussatto
REIVAX Automação e Controle

João Marcos Castro Soares
REIVAX Automação e Controle

RESUMO

A permanente redução de custos do microcomputador, bem como, a evolução de seus recursos de hardware e software, estimulam a sua aplicação em sistemas de controle e energia para aquisição e processamento de sinais elétricos.

As facilidades de conexão com o mundo físico, através de condicionadores de sinais e conversores A/D, permitem medições diretas de pontos disponíveis na planta. A grande capacidade de processamento e de armazenamento de dados possibilita a monitoração e registro dos sinais e de grandezas associadas. Os recursos de comunicação conectam unidades entre sítios distantes e permitem ajustes remotos e transferências de dados.

O SMO - Sistema de Monitoração de Oscilações, é um sistema baseado em microcomputadores, concebido para a monitoração desassistida e análise de grandezas elétricas. Sua instalação no sistema elétrico argentino disponibilizou registros dos sinais associados às principais linhas de transmissão do país.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoração de oscilações - Medições de sistemas de potência - Aquisição de dados - Análise de sinais - Aplicações para microcomputadores.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Argentino é caracterizado pela geração em cinco radiais e um grande centro de carga. Por muitos anos este sistema conviveu com restrições de geração causadas por problemas típicos de estabilidade como oscilações locais, intra-planta e

inter-áreas.

A Compania Administradora del Mercado Mayorista Electrico S. A. - CAMMESA, em conjunto com consultoria internacional contratada, definiu a implantação de sistemas que possibilitassem a redução dos níveis de oscilações para um melhor aproveitamento da capacidade de geração do sistema. Com este objetivo foram instalados, nas principais usinas geradoras do país, Estabilizadores de Sistemas de Potência - ESPs e um sistema de Desconexão Automática de Geração - DAG [13].

Para monitorar a eficiência dos recursos aplicados e estudar o comportamento do sistema elétrico, foi definida a implantação de um Sistema de Monitoração de Oscilações, instalado em algumas subestações do país e nos principais centros de operação.

2.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 Especificações

O SMO tem como principal finalidade monitorar o nível de amortecimento do sistema elétrico argentino nos modos de oscilações inter-áreas, bem como o estado de operação do sistema antes e depois de distúrbios. Os modos de oscilações inter-áreas apresentam componentes de frequência na faixa de 0,4 a 0,7 Hz. A principal diferença entre o Sistema de Monitoração de Oscilações e um Registrador Digital de Perturbações é que este último trabalha com informações no nível da frequência fundamental do sistema (50 ou 60 Hz).

As medidas de potência ativa (P), potência reativa (Q), tensão (V) e frequência (f) das linhas de transmissão são as grandezas de interesse para monitoração. Os registros do comportamento dinâmico do sistema são

feitos a partir de unidades de monitoração instaladas na planta, com operação desassistida e programação local ou remota a partir de centros de controle e estudo. Os dados adquiridos são transferidos para unidades de análise, instaladas nos centros de controle e estudos, com capacidades de cálculos e manipulações gráficas sobre os registros dos sinais.

2.2 Projeto

As especificações iniciais do SMO apresentaram somente as necessidades básicas dos engenheiros argentinos para monitorar o sistema elétrico. A escassez de especificações técnicas em diversos aspectos, tais como, os locais de instalação e os sinais monitorados de cada unidade e o sistema de comunicação disponível, indicava a necessidade de alterações e adaptações do sistema durante o processo de desenvolvimento.

A análise inicial das especificações determinou como solução apropriada um sistema baseado em microcomputadores [7][8], devido às facilidades de hardware e software disponíveis. As experiências de desenvolvimento de sistemas baseados em microcomputadores para aquisição de dados e simulação de sistemas de controle e geração foram as principais referências na definição do projeto do SMO.

O projeto estabelecido para o desenvolvimento do SMO seguiu os princípios da engenharia de sistemas baseados em computador [1], definindo inicialmente os escopos (funções primárias) dos componentes de hardware e software pertinentes ao sistema. O plano de projeto estabeleceu estimativas, alocação de recursos, cronogramas e um modelo de controle de projeto. Uma equipe de desenvolvimento dedicada foi alocada para a execução do projeto. As técnicas de engenharia de hardware e de engenharia de software foram as guias de trabalho da equipe.

2.3 Arquitetura

A busca de um sistema modular e flexível foi o fundamento da arquitetura estabelecida. As funcionalidades do sistema foram divididas em três grupos distintos: aquisição de sinais, comunicação de dados e análise de sinais. Para a implementação de hardware e software usou-se módulos especificamente projetados e produtos comerciais.

Foram definidas Unidades Locais de Monitoração (ULM) e Unidades Centrais de Análise (UCA), ambas baseadas em microcomputadores, equipadas com hardware e software adequados as suas funcionalidades.

As ULMs operam de forma desassistida, permitindo a monitoração de sinais (medidas diretas), cálculo de grandezas associadas (medidas indiretas), detecção de eventos, armazenamento de registros e transmissão para as UCAs. As UCAs permitem a recepção, gerenciamento, análise e manipulação dos registros, bem como o controle remoto das ULMs. A

comunicação entre ULMs e UCAs é feita através de linhas telefônicas dedicadas ao equipamento.

Uma visão geral da arquitetura do sistema pode ser observada na Figura 1.

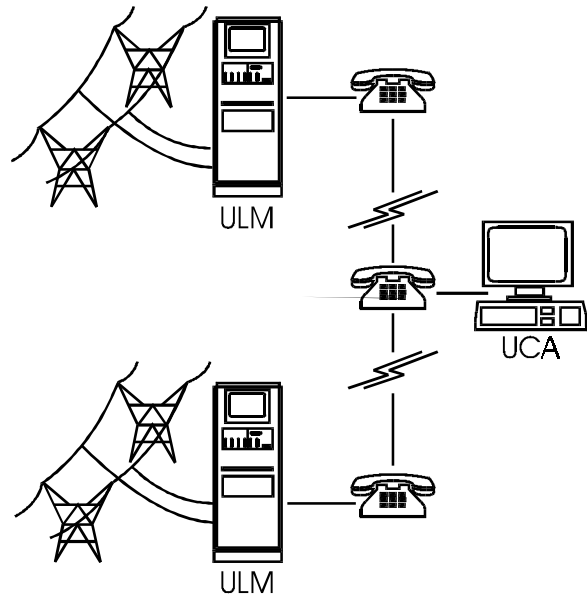


FIGURA 1

2.4 Hardware

2.4.1 Unidade Local de Monitoração (ULM)

A ULM é baseada em microcomputador padrão industrial, tipo IBM-PC compatível, com processador Pentium de 100 MHz, memória RAM de 8 MB e monitor gráfico padrão SVGA. É equipado com modem interno, para comunicação via linha telefônica, com velocidade de transmissão de 28800 bps.

Para monitoração de sinais, utiliza uma placa de aquisição de dados compatível com barramento ISA, contendo 16 entradas analógicas de 16 bits, 8 saídas analógicas, 8 entradas digitais e 8 saídas digitais.

O condicionamento dos sinais analógicos de entrada é feito através de TPs e sensores de corrente, acoplados a circuitos de Sample-Hold, para medições de tensões e correntes das linhas de transmissão, e, através de isoladores galvânicos rápidos, para medições de grandezas originadas de transdutores localizados em outros painéis.

O equipamento é montado em painel padrão industrial de 19 polegadas para instalação em quiosques das subestações. Apresenta indicador frontal de operação com LEDs representativos de operações de hardware e software, comandados por circuitos específicos e saídas digitais da placa de aquisição de dados. Também possui um circuito de rearme remoto conectado à linha telefônica.

2.4.2 Unidade Central de Análise (UCA)

A UCA é um microcomputador, tipo IBM-PC compatível, com processador Pentium de 133 MHz, memória RAM de 32 MB e monitor gráfico padrão SVGA. Para comunicação via linha telefônica é utilizado um modem interno de 28800 bps.

2.5 Software

2.5.1 Software para aquisição de sinais

As ULMs são equipadas com um software para monitoração e registro de sinais, desenvolvido para sistema operacional DOS ou compatível, projetado com técnicas de análise estruturada e totalmente escrito em linguagem C.

Pode-se definir o modo de operação do sistema através de suas interfaces de programação. Na interface de programação dos canais de monitoração, pode-se definir o título de identificação do canal, cor e limites de display, unidade da grandeza monitorada e seus fatores de conversão, ganho do conversor A/D e opções para traçado gráfico em tempo real e armazenamento em arquivo de dados.

As principais formas de disparo disponíveis são: ultrapassagem de amplitude máxima ou mínima, invasão ou saída de faixa, desvio de valor médio e ultrapassagem de amplitude em uma componente de frequência.

As bases de tempo para visualização e registro de sinais são configuráveis. O número de pontos adquiridos e armazenados em arquivo são controlados pelo passo de aquisição e pelo fator de amostragem definido.

É possível realizar cálculos de grandezas indiretas (como P, Q, V e f), dependentes dos sinais de entrada, através de uma interface de modelagem por diagrama de blocos. A topologia e os parâmetros dos blocos do diagrama podem ser totalmente definidos pelo usuário. São disponibilizados mais de 50 tipos de blocos para utilização em modelos de até 200 blocos. É possível monitorar e armazenar os sinais de até 10 variáveis do modelo de cálculo.

Quando utilizado de forma independente do hardware de aquisição de dados, o programa assume a característica de um simulador de sistemas, podendo ser utilizado em estudos e análise de desempenho.

2.5.2 Software para análise de sinais

A visualização e manipulação dos registros adquiridos pelas ULMs podem ser feitas pelo Sistema de Visualização de Curvas - SVC, uma aplicação 32 bits voltada para o sistema operacional Windows 95, desenvolvido com técnicas de orientação a objetos [2][3] e implementado em linguagem C++ [4][5][6].

O programa trabalha com o conceito de Projetos, um

conjunto de curvas adquiridas e/ou modificadas associado com um conjunto de visualizações destas curvas. Isto permite que uma janela de visualização mostre todas as curvas do projeto ou apenas algumas delas. As visualizações também permitem que uma mesma curva seja vista em janelas diferentes com escalas e fatores de zoom diferenciados. Arquivos de registros distintos podem ser tratados simultaneamente, possibilitando copiar, visualizar e sobrepor curvas de projetos diferentes.

É possível associar comentários aos sinais, incluindo textos formatados sobre as janelas de visualização ou associando descrições em janelas apropriadas. Ao projeto e às visualizações também é possível associar resumos e descrições de suas finalidades. O software também permite exportar figuras para documentação em editores de texto comerciais.

As referências de data e hora de registro de sinais são consideradas pelo SVC. Desta forma, quando curvas adquiridas em tempos diferentes forem superpostas, estas diferenças serão mostradas graficamente com precisão de milissegundos.

O programa dispõe de 16 funções de zoom e formatação de eixos com diversos algoritmos de aproximação/afastamento. As curvas podem ser formatadas com diversos tipos de pontos e cores, suas coordenadas podem ser editadas e alteradas, bem como suas unidades e base de tempo.

Pode-se caminhar pelos pontos de uma curva através do recurso do Tracer e destacar pontos característicos do sinal através de símbolos predeterminados ou configuráveis pelo usuário. O destaque de pontos, além de identificar aspectos típicos ou não de um sinal, serve como ferramenta auxiliar na manipulação das curvas, em operações como corte de curva, identificação de máximos, mínimos e aproximação por mínimos quadrados.

O SVC permite que sejam realizadas facilmente diversas operações sobre as curvas adquiridas, desde funções matemáticas simples como módulo, ganho e offset e offset horizontal até a identificação de frequências de ruído superpostas ao sinal através de transformadas rápidas de Fourier, bem como a eliminação de tais frequências com o uso de filtros numéricos. A eliminação rápida de pontos provenientes de uma aquisição ruidosa pode ser feita através do Filtro de Stout [9] e uma diminuição da resolução da curva (diminuição do número de pontos) pode ser feita através de uma amostragem por média do sinal adquirido. As operações de soma, multiplicação e diagrama XY de dois sinais diferentes levam em conta a defasagem no tempo entre os sinais que serão operados, que não precisam ter origem comum, o mesmo número de pontos nem o mesmo passo de aquisição. As operações sobre curvas atualmente implementadas no software são as seguintes: módulo, ganho e offset, raiz quadrada, quadrado, inversão, FFT Hanning, FFT Retangular, filtros passa baixa, passa alta, passa faixa, corta faixa, filtro de Stout,

aproximação por mínimos quadrados, amostragem por média, histograma estatístico da curva, busca de máximos e mínimos, corte de curva, offset horizontal, interpolação, análise do sinal por Prony-Kumaresan, oscilação de frequência, tempo linear, soma, multiplicação e diagrama XY.

A análise modal do sinal através do método de Prony-Kumaresan [10] é extremamente útil na análise de sinais de sistemas de potência. O resultado desta operação é um sinal recuperado e um gráfico no plano "S" complexo que são inseridos no projeto corrente com seus resumos de curva preenchidos com as informações de pólos e componentes do sinal. Além disso são disponibilizados os resultados de frequência, amortecimento mais a data da curva para serem incluídos num arquivo ASCII, através do qual é gerado o Histograma de amortecimento.

Todos os outros componentes do sinal recuperado como amplitude, fase, frequência, decaimento, data da curva, passo de aquisição, ponto inicial e número de pontos da curva de origem são disponibilizados para gerar curvas com apenas um determinado conjunto de componentes escolhidos pelo usuário. Com isto podem ser verificados quais são os componentes do sinal que realmente influenciam o sinal analisado, excluindo-se componentes com baixa amplitude e componentes que se comportam como ruído de fundo.

Todas as curvas resposta das operações são mantidas no projeto, possibilitando operações em cascata através de macros gravadas e configuradas pelo usuário. Estas operações são aplicadas sobre uma única curva fonte do projeto, gerando ao final do processo diversas curvas resposta, uma para cada operação realizada.

2.5.3 Comunicação

O gerenciamento das funções de comunicação é feito através de pacotes comerciais de software integrados com programas executáveis de apoio e tarefas em lote. Qualquer pacote comercial de comunicação de dados, que implemente controle remoto e transferências de arquivos por execução de rotinas programáveis, pode ser utilizado no sistema [14]. A adaptação é feita através das tarefas em lote e programas executáveis de apoio.

A transferência de arquivos das ULMs para as UCAs pode ser configurada para ser feita automaticamente logo após o término de um registro, somente em um horário programado, ou então, esperar por uma solicitação das UCAs.

Pode-se configurar o número de tentativas de conexão e o tempo entre as tentativas, bem como o número máximo de arquivos para a transmissão, aumentando assim a eficiência do processo de comunicação com linhas telefônicas precárias. A configuração dos parâmetros das ULMs pode ser efetuada remotamente, reduzindo-se a necessidade de um operador para a realização desta tarefa. Para as UCAs, desenvolveu-se

um gerenciador de arquivos para organizar os registros recebidos das diversas ULMs.

3.0 - INSTALAÇÃO

Os locais de instalação do SMO no sistema elétrico argentino estão demarcados na Figura 2 [11].

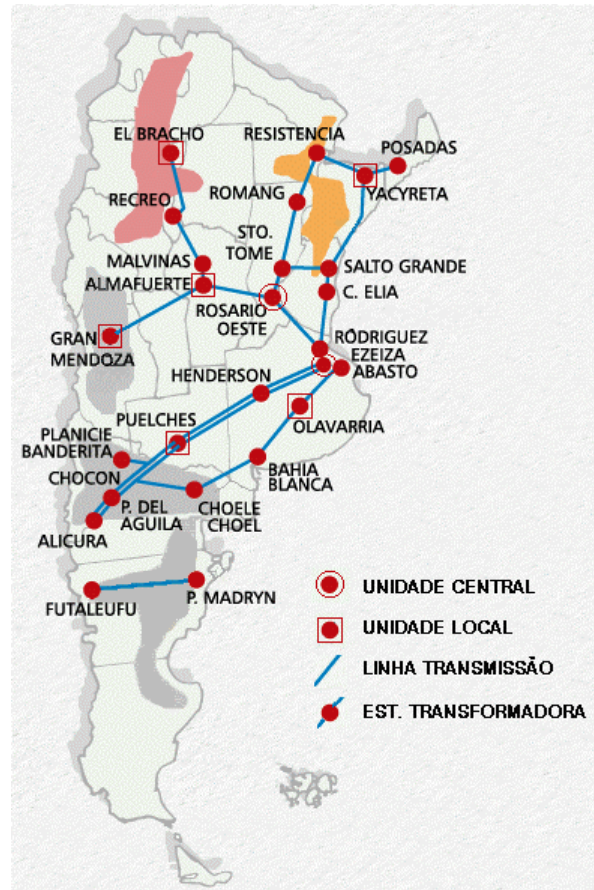


FIGURA 2

As grandezas monitoradas em cada estação transformadora (E. T.) são listadas a seguir, e estão associadas às linhas de alta tensão (L. A. T.).

E. T. Almafuerite: Transformador 1, lado 500 kV, medição adicional (P); Transformador 2, lado 500 kV, medição adicional (P); L. A. T. Malvinas Argentinas, 500 kV, sinais básicos (P, Q, f e V); L. A. T. Rosário Oeste, 500 kV, medições adicionais (P e Q); L. A. T. Embalse, 500 kV, medições adicionais (P e Q).

E. T. Gran Mendoza: L. A. T. Rio Grande, 500 kV, medições básicas (P, Q, f e V); L. A. T. Los Reyunos, 220 kV, medições adicionais (P, Q e V); L. A. T. Cruz de Piedra 1, 132 kV, medições adicionais (P e V); L. A. T. Cruz de Piedra 2, 132 kV, medição adicional (P).

E. T. El Bracho: L. A. T. Recreo, 500 kV, medições básicas (P, Q, f e V).

E. T. Olavarria: L. A. T. Bahia Blanca, 500 KV, medição

adicional (P, Q e V); L. A. T. Abasto, 500 KV, medições básicas (P,Q, f e V).

E. T. Puelches: L. A. T. Chocon 1 + L. A. T. Chocon 2, 500 KV, medições adicionais (P e Q); Barramento 500KV, medição adicional (V); Capacitor de Puelches, medições básicas (P,Q, f e V).

E. T. Rincon de Santa Maria: L. A. T. Yacyreta 1 + L. A. T. Yacyreta 2 + L. A. T. Yacyreta 3, medições adicionais (P e Q); Transformador 500KV, medição adicional (P e Q); L. A. T. Resistencia, medição adicional (P e Q); L. A. T. Salto Grande, medições básicas (P, Q, Vt e f).

As grandezas associadas às medições básicas são transduzidas por software, com modelo de cálculo implementado. As medições adicionais são originadas de transdutores.

4.0 - EXPERIÊNCIAS COM O SISTEMA

Os sinais mostrados a seguir demonstram os recursos que são disponibilizados pelo SVC na análise de alguns registros obtidos nas ULMS durante a etapa de comissionamento do sistema. Abaixo pode ser visto, na Figura 3 - (a), um sinal com ruído obtido na usina de Yaciretá (Argentina) através do equipamento de aquisição de sinais da REIVAX e, depois, na Figura 3 - (b), o mesmo sinal tratado pelo Filtro de Stout, filtro numérico fornecido no programa SVC.



FIGURA 3 - (a)



FIGURA 3 - (b)

Na Figura 4 pode ser observado um sinal de oscilação de potência resultante da aplicação de um degrau de tensão de 2,5%, adquirido na usina de Yaciretá (Argentina), decomposto e analisado através do método de Prony-Kumaresan. Os componentes deste sinal podem ser vistos na Tabela ao final do trabalho.

5.0 - SINCRONIZAÇÃO

As referências de tempo dos registros de cada unidade de monitoração podem ser tomadas conforme os recursos de relógio disponíveis. Nos SMOs podem ser instalados modernos sistemas de sincronismo via satélite, como o GPS - Global Positioning System, para sincronismo das unidades de monitoração [12].

6.0 - EVOLUÇÃO

Como pode ser observado pelas características mencionadas, o Sistema de Monitoração de Oscilações pode ter outras funções implementadas por software ou por hardware, aumentando facilmente a sua capacidade. Com isso, é viável ampliar ainda mais a sua utilização, sendo possível aplicá-lo em outros sistemas com características particulares.

Por exemplo, sem a visualização gráfica em tempo real, o sistema alcança ciclos inferiores a 1 milissegundo de aquisição e cálculo, o que permite aplicação em proteção (cálculo de impedância, etc), medição de harmônicos de mais baixa ordem, entre outros usos.

Com unidades sincronizadas e linhas de comunicação dedicadas, é possível calcular ângulos de fase entre pontos críticos do sistema, com importantes possibilidades para o acompanhamento online da estabilidade do sistema.

7.0 - CONCLUSÕES

Parece haver hoje uma posição dos planejadores e operadores dos sistemas elétricos de verificar, através de medidas, se os imensos recursos aplicados estão otimizados e, tomar as ações corretivas no menor tempo possível. Equipamentos como o SMO descrito devem atender estas necessidades.

Sua modularidade e flexibilidade de projeto facilitaram a implementação de novas funcionalidades, conforme as necessidades de adaptação durante o comissionamento, e prevê-se a mesma flexibilidade em futuras aplicações.

8.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] - PRESSMAN, Roger S.. *Engenharia de Software*. São Paulo : Makron Books, 1995.
- [2] - RUMBAUGH, J. et al.. *Modelagem e Projetos Baseados em Objetos*. Rio de Janeiro : Campus, 1994.
- [3] - MARTIN, J., ODELL, James J.. *Análise e Projeto Orientados a Objeto*. São Paulo : Makron Books, 1995.
- [4] - WEISKAMP, Keith, FLAMING, Bryan. *The Complete C++ Primer*. Cambridge : Academic Press, 1992.
- [5] - KRUGLINSKY, David. *Inside Visual C++*. Redmond : Microsoft Press, 1996.
- [6] - RICHTER, Jeffrey. *Advanced Windows*. Redmond : Microsoft Press, 1995.

- [7] - CHANG, Chung-Liang, LIU, Ah-Shing, CHEN, Yung-Tien. Dynamic Performance Monitoring System of Taiwan Power Company. *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 815-822, August 1993.
- [8] - CHIOU, Chiew-Yann, et al. A Powerful Personal Computer-Based Plant Transient Recording and Analysis System. *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 849-857, August 1993.
- [9] - STOUT, Bob. Olympic Filtering for Noise Data. *C/C++ Users Journal*, 3 (March 1995), pp. 35-38.
- [10] - DAVID, Pedro. *Análise Modal de Sinais Discretos pelo Método de Prony-Kumaresan*. Galileo Tecnologia, Rio de Janeiro, 1996.
- [11] - <http://www.cammesa.com.ar>
- [12] - IEEE Std 1344-1995, IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems.
- [13] - CAMMESA (Ed. Merz & McLellan), Recursos Estabilizantes para el SADI - Pliego nº 1/95 (Stabilizing Resources for the Argentina Interconnected System), September 1995.
- [14] - STAC. *Reachout - User's Guide*. San Diego, 1996.

TABELA - COMPONENTES DO SINAL DA FIGURA 4.

Amplitude	Fase	Freqüência	Decaimento	Amortecimento
0.974713	0.000003	0.000000	0.000000	0.000000
0.607220	-46.712610	0.592331	0.616252	16.335890
1.151549	-113.768390	1.054458	0.731595	10.975687
1.723955	135.457927	1.517216	0.506345	5.304058
0.689037	-8.124980	1.874520	0.810387	6.864313
0.867650	-45.591704	2.520159	2.190474	13.702966
0.063403	163.092666	3.343739	0.637742	3.034123
0.120541	63.614938	5.387897	0.998048	2.946892

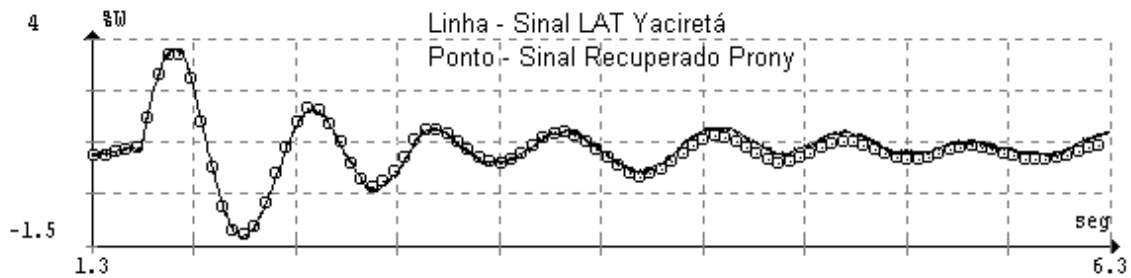


FIGURA 4