

Desenvolvimento de um Sistema de Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica para Barras de Distribuição de Subestações

V. P. Ferrari², R. J. Riella², R. Vivekananda², A. G. Reichel², G. Paulillo²,
S. F. Sciammarella², M. R. Ortega¹, J. G. Pereira¹

1- Companhia Paranaense de Energia – COPEL

2- Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC

Resumo: Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoração da qualidade da energia elétrica para barras de distribuição de subestações. Este sistema é composto por um protótipo de equipamento de monitoração, conectado diretamente à saída dos transformadores de potencial de até dois circuitos trifásicos independentes, e por um *software* de supervisão remota e análise de dados. O protótipo do equipamento efetua medições dos valores de tensão RMS, distorção harmônica total (THD), harmônicas individuais até a 50ª harmônica e desequilíbrio de tensão para cada circuito trifásico, ciclo a ciclo, com resolução de 128 amostras por ciclo de 60 Hz. Este também efetua o cálculo da frequência do sinal elétrico integralizada em 16 ciclos. Durante o cálculo destas medidas, o protótipo compara os valores obtidos com níveis mínimos e máximos (*triggers*), configuráveis para cada parâmetro, realizando registros oscilográficos das tensões do circuito trifásico que eventualmente apresentar ao menos uma fase com variação além destes limites. O equipamento realiza também medições periódicas de todos os parâmetros descritos, armazenando os seus valores mínimos, máximos e médios, integralizados em tempos configuráveis, entre 30 segundos e 5 minutos. Tanto os dados de registros periódicos quanto os oscilográficos são referenciados temporalmente através de uma conexão com sinal de sincronismo de tempo, via Sistema de Posicionamento Global (GPS), com resolução de 1 ms. Todos os dados são enviados pelo protótipo a um servidor de arquivos, que os disponibiliza na rede local da concessionária, sendo esta transmissão possível de ser realizada tanto por rede *Ethernet* quanto por linha telefônica. Já o *software* de supervisão possibilita tanto a visualização remota dos dados registrados pelo protótipo como a configuração remota deste. Além dessas funções, o aplicativo dispõe de uma ferramenta de análise mais detalhada das ocorrências, utilizando técnicas de inteligência artificial para aumentar a precisão na localização dos eventos dentro dos registros oscilográficos.

Palavras-chave – Qualidade da Energia Elétrica, Monitoração Remota, Processamento em Tempo Real.

I. INTRODUÇÃO

Com a crescente aplicação de dispositivos semicondutores nos sistemas industriais, juntamente à incorporação cada vez mais significativa de sistemas de potência com controle eletrônico, torna-se conseqüente o crescimento no nível de interferência nos sinais elétricos de alimentação, pois os chaveamentos efetuados por estes dispositivos não lineares causam efeitos indesejáveis como distorções na forma de onda e variações de amplitude.

Com isso, verifica-se que enquanto os avanços nas áreas de eletrônica de potência e controles industriais contribuem para a melhoria dos índices de produção industrial e para o uso mais eficiente da energia elétrica, estes dispositivos também colaboram fortemente para a deterioração da qualidade da energia. Devido a estes fatores, o tema Qualidade da Energia Elétrica (QEE) vem constituindo-se nos últimos anos em fonte de preocupações para as concessionárias, consumidores, fabricantes de equipamentos e órgãos reguladores, tanto em nosso país quanto no exterior.

Neste contexto, foi desenvolvido um sistema piloto que busca realizar a monitoração contínua da rede de distribuição e disponibilizar na rede de computadores da concessionária os dados obtidos de forma remota. Desta maneira, o sistema desenvolvido constitui-se numa ferramenta prática para a avaliação do produto “energia elétrica”, fornecendo informações importantes para a orientação de ações de controle da sua qualidade.

II. DESENVOLVIMENTO

O sistema piloto para monitoração da qualidade da energia elétrica foi desenvolvido visando a avaliação contínua dos parâmetros de QEE, em barras de distribuição de subestações. O sistema, cujo diagrama em blocos é mostrado na figura 1, é composto pelo protótipo de um equipamento de monitoração, instalado na subestação e conectado à saída dos transformadores de potencial (TP) de até dois circuitos trifásicos independentes, registrando continuamente os parâmetros referentes à QEE, e por um *software* de supervisão remota, com funções de visualização, análise dos registros efetuados e configuração do equipamento de monitoração.

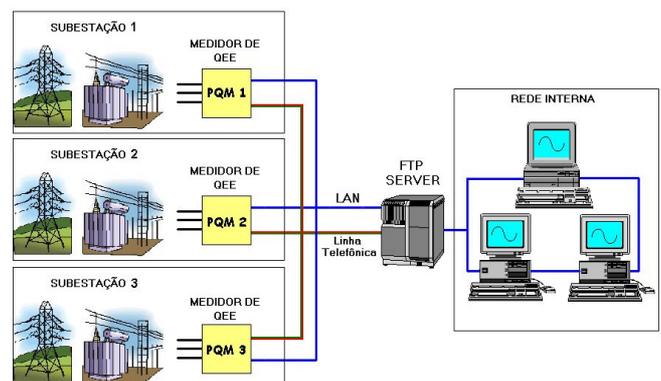


Figura 1 - Diagrama do sistema de monitoração da qualidade da energia elétrica.

Os dados gerados pelos equipamentos de monitoração são automaticamente transmitidos a um servidor de arquivos (FTP), que assim concentra todos os dados gerados pelo sistema, possibilitando o rápido acesso a estes dados e liberando a memória física dos equipamentos de monitoração.

O *hardware* do protótipo do equipamento de monitoração é composto por oito módulos, sendo estes: duas placas de condicionamento de sinal, uma para cada circuito trifásico, que ajustam os níveis de tensão dos sinais vindos dos TPs para os níveis passíveis de digitalização; um módulo de processamento digital de sinais (DSP), que realiza a conversão analógico-digital (A/D), todos os cálculos referentes aos parâmetros de QEE e obtenção da estampa de tempo via GPS; uma placa *backplane*, que realiza a interface entre os barramentos PC104+ e PCI, além da conexão para a entrada de alimentação do equipamento; uma placa de interfaces, que implementa proteções elétricas nas conexões de rede e linha telefônica, e também converte o sinal vindo do GPS de ótico para elétrico; uma placa de rede PCI para a comunicação via *Ethernet*; uma placa modem PCI para a comunicação via linha telefônica e um módulo gerenciador, que comunica-se com o módulo DSP, formata os arquivos de registro periódico e oscilografia e gerencia as comunicações via *Ethernet* e linha telefônica. Estes módulos são interligados segundo o diagrama em blocos da figura 2.

Durante o desenvolvimento do protótipo, apenas as placas de rede, modem e do módulo gerenciador não foram projetadas, sendo adquiridos modelos comerciais. As características e funções dos módulos componentes do equipamento são mais detalhadamente descritas nos itens 2.1 a 2.5.

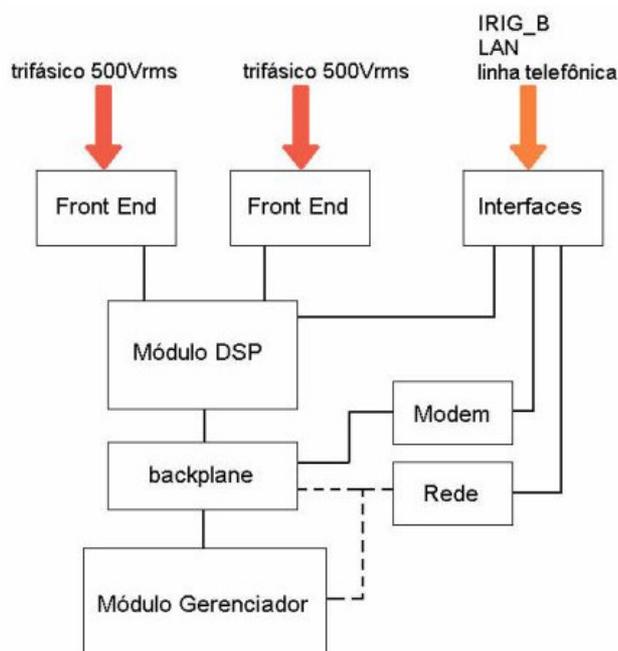


Figura 2 - Diagrama em blocos do equipamento de monitoração.

2.1 – Módulo de condicionamento.

Para converter os sinais vindos dos transformadores de potencial para níveis de tensão adequados ao processamento e para prover segurança elétrica ao equipamento, foi desenvolvida uma placa para o condicionamento dos sinais de entrada. As tensões das três fases de um circuito trifásico são

aplicadas nesta placa através de três entradas independentes, totalmente isoladas entre si, possibilitando tanto ligações em delta quanto em estrela. Cada entrada é protegida contra surtos de tensão através de varistores. Estes sinais são então aplicados em circuitos opto-acopladores lineares, que têm por função realizar uma isolamento galvânica de 5300 Vrms entre sua entrada e saída. Para prover alimentação aos circuitos primários da barreira de isolamento, foi implementada no módulo de condicionamento uma fonte chaveada que fornece tensões independentes, reguladas e estáveis para cada circuito opto-acoplador. O sinal de saída de cada opto-acoplador é aplicado em um amplificador seguidor de tensão, que possui as funções de prover corrente suficiente para a estabilidade do sinal e manter este sinal grampeado em um nível de tensão CC (*offset*) necessário para o perfeito acoplamento com o conversor A/D. A tensão de grampeamento é ajustável por meio de potenciômetros digitais, que são controlados através de uma interface ligada à porta paralela de um microcomputador, por um *software* desenvolvido para realizar esta calibração.

2.2 – Módulo DSP.

Após o condicionamento dos sinais de tensão de cada circuito trifásico, efetuado pelos dois módulos de condicionamento, estes já se encontram dentro dos padrões para a digitalização e processamento, tarefas estas executadas pelo módulo DSP. Os sinais vindos das placas de condicionamento entram no módulo DSP através de duas conexões independentes, totalizando seis canais analógicos de entrada, os quais são digitalizados simultaneamente e processados em tempo real.

Assim que entram no módulo DSP, os sinais são aplicados a filtros passa-baixas Butterworth de 4ª ordem, com frequência de corte em 3 kHz, que funcionam como filtros *anti-aliasing*, evitando assim a sobreposição espectral quando da digitalização destes sinais. A saída de cada um dos filtros é aplicada a uma entrada do conversor A/D, que realiza a conversão simultânea, não multiplexada, dos seis canais analógicos. Sob o controle de um processador digital de sinais, o conversor A/D amostra os sinais de entrada a uma taxa de 7680 Hz, o que caracteriza 128 amostras por ciclo de 60 Hz, com uma resolução de 16 bits por amostra e curva de quantização linear. Esta taxa de amostragem provém de uma frequência padrão disponibilizada em uma porta serial do DSP, que é então utilizada pelo conversor A/D para gerar a frequência de amostragem.

Os sinais digitalizados pelo conversor A/D são então enviados ao processador, que tem por função efetuar os cálculos de todos dos parâmetros relativos à QEE. Desta forma, o *firmware*, ou *software* embarcado do processador, efetua o armazenamento de cada uma das amostras vindas do conversor A/D, durante o período de um ciclo de 60 Hz. Após este período, o *firmware* calcula os valores de tensão RMS e THD do ciclo adquirido, para cada canal. Estes valores são inicialmente acumulados, para o cálculo de seus valores médios e testados em relação a seus limites (*triggers*). Os valores máximo e mínimo da tensão RMS, ocorridos durante o período de integralização, também são armazenados para a

composição do registro periódico. O mesmo ocorre para o valor máximo da THD. Caso a THD de um ciclo seja maior que a máxima registrada no período de integralização, a transformada rápida de Fourier (FFT) deste ciclo é calculada e as harmônicas individuais resultantes, até a 50^a, são armazenadas, referindo-se, portanto, à máxima THD do período. Ainda no tempo de um ciclo de 60 Hz, são calculados os valores dos desequilíbrios de tensão dos dois circuitos trifásicos, sendo estes valores também acumulados e armazenados os seus limites de variação no período. Outro cálculo efetuado pelo *firmware* do DSP é o da frequência instantânea dos sinais de entrada. Entretanto, como este algoritmo baseia-se na contagem de tempo entre os cruzamentos por zero do sinal filtrado, faz-se necessário o uso de um tempo maior para que o cálculo deste parâmetro atinja a precisão necessária. Desta forma, são utilizados 16 ciclos para o cálculo da frequência, utilizando-se este valor como parâmetro para integralização. Portanto, a cada novo ciclo, a frequência medida refere-se à média dos últimos 16 ciclos.

Ao fim do período de integralização, para a composição de um registro periódico, o *firmware* do processador efetua todos os cálculos dos valores médios e seta um *flag* interno que indica ao módulo de gerenciamento que este registro está completo e pode ser extraído. Assim, o módulo gerenciador lê diretamente da memória do processador os dados referentes ao registro periódico e compõe o arquivo de registro periódico, a ser enviado ao servidor de arquivos. O período de integralização dos registros é configurável entre 30 segundos e 5 minutos, sendo esta configuração realizada através do *software* de supervisão remota.

Caso algum dos valores de tensão RMS, THD, frequência ou desequilíbrio de tensão extrapole algum limite mínimo ou máximo, também configurável via *software* de supervisão, o processador seta um *flag* interno de *trigger*, sinalizando ao módulo gerenciador que deve ser montada uma oscilografia do circuito trifásico referente ao canal que entrou em estado de *trigger*. Assim, o processador sinaliza a estampa de tempo referente ao início do *trigger* e disponibiliza tanto as amostras de 10 ciclos anteriores à ocorrência deste *trigger* como as amostras do ciclo atual, que gerou a ocorrência. Nos ciclos posteriores, o processador continuará sinalizando a ocorrência, caso ela ainda exista, ou o seu fim, caso este seja detectado. Este procedimento possibilita ao módulo gerenciador montar um arquivo que contém o registro oscilográfico com as ocorrências de anormalidades nos parâmetros medidos, com 10 ciclos anteriores à ocorrência, até 1 segundo de ocorrência e 10 ciclos posteriores a esta. Caso o estado que gerou o *trigger* permaneça por um tempo maior que 1 segundo, o arquivo é encerrado e outro novo é aberto quando da volta ao estado normal.

Para a obtenção da estampa de tempo dos eventos, o processador interpreta o sinal codificado no padrão IRIG-B vindo de um receptor GPS, conectado à placa de interfaces. Este sinal garante o sincronismo de todos os eventos registrados pelo equipamento, com resolução temporal de 1 ms, sendo esta estampa de tempo anexada a todos os registros periódicos e oscilográficos. Mesmo no caso de haver uma perda no sinal de sincronismo, o processador mantém a con-

tagem de tempo, utilizando o seu relógio interno. Entretanto, a perda ou retorno do sinal IRIG-B, assim como outros eventos de sistema, são sinalizados pela geração de registros de alarmes.

2.3 – Placa de Interfaces.

O módulo de interfaces tem por funções prover proteção elétrica contra surtos de tensão nas interfaces de comunicação *Ethernet* e linha telefônica e transformar o sinal óptico IRIG-B, vindo do GPS, em elétrico, para ser aplicado à placa DSP. Desta forma este módulo é composto por três entradas: uma para conexão da rede *Ethernet*, uma para conexão de linha telefônica analógica e um conector para fibra óptica. A proteção da conexão com a linha telefônica é feita através de um circuito em cascata composto por centelhador, fusível rearmável e supressor de transientes, cuja finalidade é evitar a queima do modem PCI interno, em caso de surtos de tensão. Já a proteção da placa *Ethernet* PCI interna do equipamento é feita utilizando-se uma cadeia de diodos supressores de transientes de baixa capacitância.

Uma vez que a entrada óptica do sinal IRIG-B é imune a transientes elétricos, não há proteção implementada para esta conexão, sendo o transdutor óptico alimentado através de uma conexão com a placa DSP.

2.4 – Placa *Backplane*.

A placa *backplane* desenvolvida apresenta dois objetivos: converter o barramento padrão PC104+ de um PC industrial, utilizado como módulo gerenciador, para o padrão PCI, sendo esta conversão basicamente mecânica, e prover a alimentação de todo o sistema através da conexão com uma fonte padrão ATX. Desta maneira, a placa *backplane* é composta por dois conectores, padrão PC104+, com os barramentos ISA e PCI, para encaixe do PC industrial, dois conectores padrão PCI para o encaixe das placas de rede e modem, um conector para a fonte ATX, leds indicativos das tensões de alimentação e um conector para chave liga/desliga, que comanda a alimentação de todo o equipamento. Na placa *backplane* também encaixa-se o módulo DSP, uma vez que este comunica-se com o módulo gerenciador a partir do barramento ISA PC104.

2.5 – Módulo Gerenciador.

O *hardware* do módulo gerenciador é formado por um PC industrial padrão PC104+, adquirido de um fabricante industrial. Para o gerenciamento do PC industrial e sua comunicação com as placas de rede, modem e módulo DSP, foi compilado um *kernel* do sistema operacional *Linux*, específico para este equipamento. Esta compilação levou em conta o reduzido espaço de armazenamento e uma adequada configuração para sua instalação e operação a partir de uma memória de massa semicondutora não volátil (*flash*). Esta característica contribuiu significativamente para o aumento da robustez do equipamento, uma vez que não se utiliza unidade de disco rígido, que possui partes móveis e baixa confiabilidade para esta aplicação.

Para o registro e comunicação dos dados gerados pelo módulo DSP, foi desenvolvido um aplicativo no espaço de

usuário do *Linux*, que monta, grava e transmite via Protocolo de Transferência de Arquivos (FTP) os arquivos com todos os parâmetros de QEE calculados. Este aplicativo também é responsável pela recepção e processamento de comandos enviados pelo software de supervisão remota e pelo carregamento do *firmware* do processador, o qual pode assim ser atualizado remotamente. A comunicação desse aplicativo com o módulo DSP é viabilizada por um módulo de *kernel* (*device driver*) desenvolvido especificamente para prover esse interfaceamento. O *device driver* atende às interrupções geradas pelo módulo DSP, interpreta os seus *flags* e lê diretamente da memória interna do DSP os valores referentes aos registros periódicos e oscilográficos, formatando-os para o aplicativo de registro e comunicação.

Todo o protótipo do equipamento de medição, incluindo uma fonte ATX, adaptada para ser alimentada pelo banco de baterias de 125 Vcc da subestação, foi acondicionado em um gabinete padrão rack 19" *half size*. A foto do protótipo do equipamento pode ser vista na figura 3.



Figura 3 –Interior do protótipo do equipamento de monitoração da qualidade da energia elétrica.

2.6 – Software de Visualização.

Visando facilitar visualização dos dados gerados e a configuração remota do protótipo do equipamento de medição, foi desenvolvido um aplicativo Windows, que implementa estas funções. Este software é composto por 5 pastas, referentes aos registros periódicos, oscilografia, configuração, log de eventos e comunicação.

Ao se abrir um arquivo de um registro periódico, automaticamente a sua pasta é aberta, sendo mostrados três gráficos, referentes às variações máxima, mínima e média dos valores de tensão RMS do canal A do circuito 1 durante um dia de aquisição. Navegando-se nesta pasta, é possível alternar-se para a visualização dos valores de THD, frequência e desequilíbrio de tensão. Em suas sub-pastas, ainda é possível visualizar estes valores para cada uma das 3 fases de cada circuito.

Ainda na pasta de registro periódico, é possível visualizar cada um dos registros isoladamente. Ao selecionar esta opção, a pasta de registro periódico muda de interface, mostrando os detalhes do registro selecionado, como valores mínimos, médios e máximos de todos os parâmetros medidos e o espectro harmônico da maior THD daquele período,

referenciado por estampa de tempo.

Ao se abrir um arquivo de oscilografia, a pasta correspondente torna-se visível, plotando automaticamente o gráfico da forma de onda do circuito trifásico em que houve a ocorrência. Esta tela, mostrando um registro oscilográfico mono-fásico, pode ser vista na figura 4.

Neste gráfico, também são inseridos pontos que indicam o ciclo de ocorrência dos *triggers*. Estes pontos informam o tipo de *trigger* ocorrido e a respectiva estampa de tempo. Além destas informações, os pontos também são *links* para janelas com informações mais detalhadas, como canal, tipo, estampa de tempo e os valores instantâneos medidos no ciclo de ocorrência do *trigger*.

Na abertura dos arquivos de oscilografia são aplicados algoritmos de decomposição *Wavelet* e lógica *Fuzzy*, que possibilitam tanto a localização exata do início e fim da ocorrência quanto o seu intervalo de duração, com precisão de uma amostra. Com a aplicação destes algoritmos, é possível ter-se uma medição precisa dos parâmetros de QEE durante a ocorrência, em que o canal estava em condição de *trigger*.

Na pasta de configuração, são disponibilizados campos para a configuração remota do equipamento. Estas configurações referem-se ao tempo de integralização dos registros periódicos e níveis de *trigger* para cada variável de cada um dos canais dos dois circuitos. Visando tornar o processo de configuração mais seguro, o *software* verifica a validade dos dados inseridos e apresenta na pasta *log* de eventos resultados referentes a esta análise. Desta forma, em caso de configuração válida, é sinalizado um OK na pasta *log* de eventos e é salvo um arquivo de configuração, a ser enviado ao equipamento.

O software de visualização também permite a exportação dos registros periódicos e dos dados oscilográficos para arquivos padrão PQDIF (IEEE 1159.3).

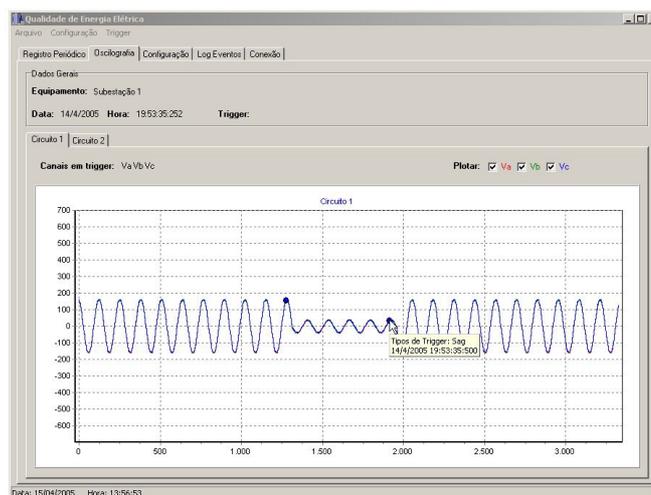


Figura 4 – Tela principal do software de visualização, mostrando o registro oscilográfico de um afundamento de tensão.

III. CONCLUSÕES

Em uma análise qualitativa, o projeto foi bem sucedido, uma vez que atingiu-se o objetivo inicial de gerar um sistema piloto plenamente funcional para a monitoração da qualidade da energia elétrica em barras de distribuição.

O sistema resultante deste projeto foi testado em laboratório em uma fonte trifásica de precisão que gera anormalidades configuráveis na qualidade dos sinais de tensão e os resultados obtidos ficaram de acordo com as especificações.

Com este sistema, a concessionária poderá dispor de uma importante ferramenta para análise contínua e remota dos parâmetros de QEE. Entretanto, o resultado final mostra-se como um sistema que ainda deve ser validado por intensivos e contínuos testes em condições reais de operação. Testes estes que indicarão os últimos passos para a concretização deste sistema como um produto, com possibilidade de utilização em larga escala.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1992.
- [2] EN 50160, "Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems", Feb. 2000.
- [3] Mallat, S., "A Wavelet Tour of Signal Processing", Academic Press, Boston , USA, 1998.