



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento Contínuo da Qualidade da Energia Elétrica para Subestações de Distribuição

Eng. Rodrigo Jardim Riella LACTEC riella@lactec.org.br	Eng. Valdinei Paro Ferrari LACTEC ferrari@lactec.org.br	Eng. Gilson Paulillo LACTEC gilsonp@lactec.org.br
Eng. Mauricio Robles Ortega COPEL mrortega@copel.com	Eng. Joel Gonçalves Pereira COPEL joelgp@copel.com	

Palavras-chave

Qualidade da Energia Elétrica
Monitoramento Remoto
Processamento Digital de Sinais Elétricos

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade da energia elétrica para barras de subestações de distribuição. Este sistema é composto por um equipamento de monitoramento contínuo, batizado de *Power Quality Meter* (PQM), conectado diretamente à saída de até dois TPs e por um software de supervisão e visualização remota. O equipamento efetua medições periódicas dos valores de tensão, frequência, distorção harmônica total de tensão, harmônicas até a 50ª e desequilíbrio de tensão para cada circuito, ciclo a ciclo, com resolução de 128 amostras por ciclo. Durante os cálculos, o equipamento também implementa funções de geração de oscilografia, com disparo através de níveis mínimos e máximos configuráveis para cada parâmetro de medição e independentes por canal. Tanto os registros periódicos quanto os oscilográficos são referenciados temporalmente através de uma conexão com sinal de sincronismo de tempo via GPS, com resolução de 1 milissegundo. Todos os dados são enviados pelo PQM a um servidor, que os disponibiliza na rede local da concessionária, sendo esta transmissão realizada tanto por rede *Ethernet* quanto por linha telefônica. Já o software de supervisão possibilita tanto a visualização remota dos dados registrados pelo equipamento como a configuração remota deste.

1. 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 bruscas de amplitude.

Verifica-se, portanto, que enquanto os dispositivos eletrônicos de potência e de 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, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) motivou-se a propor, em conjunto com o Instituto de Pesquisa para o Desenvolvimento (LACTEC), um projeto dentro do programa de pesquisa e desenvolvimento (P&D) da ANEEL, cujo objetivo é realizar a monitoramento contínuo da qualidade da energia elétrica em barras das subestações 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.

Assim, o *Sistema de Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica para Barras de Distribuição* desenvolvido é composto por PQMs, instalados em subestações de distribuição e conectados à saída dos TPs de medição de até dois circuitos trifásicos independentes, e por um software de supervisão remota, com funções de visualização e análise dos registros efetuados, além do envio de comandos e configurações aos equipamentos de monitoramento. Os PQMs registram continuamente todos os parâmetros referentes às tensões dos circuitos trifásicos monitorados e os dados resultantes são automaticamente transmitidos a um servidor de arquivos (*FTP*), que assim concentra todas as informações geradas pelo sistema, possibilitando o rápido acesso a estes dados via *intranet* da concessionária e liberando a memória física dos equipamentos de monitoramento. O diagrama de todo este sistema é mostrada na figura 1.

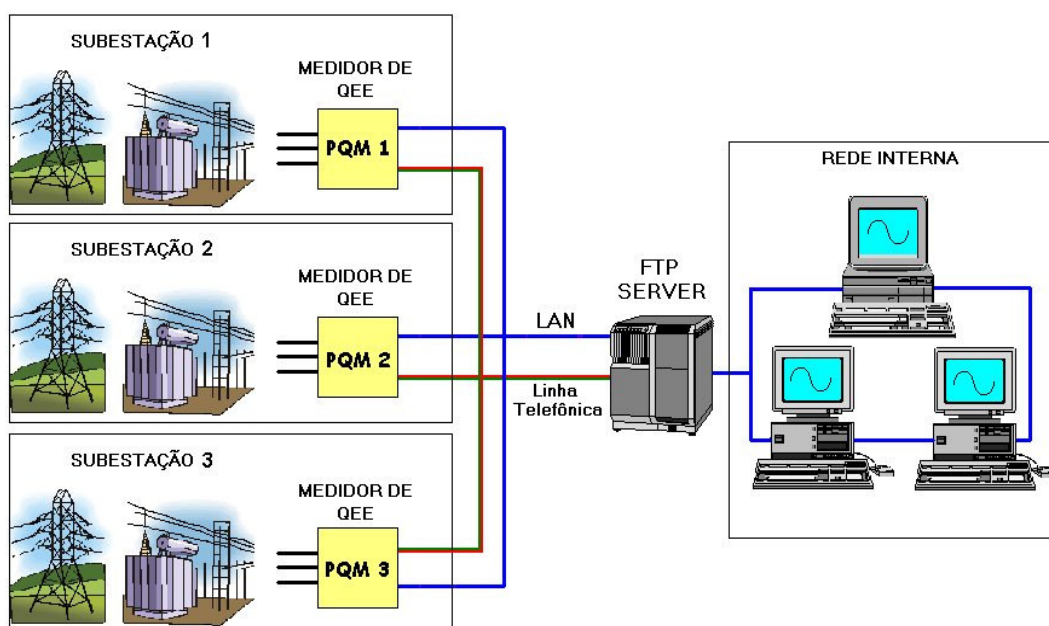


Figura 1 - Diagrama do sistema de monitoramento da qualidade da energia elétrica

2. Desenvolvimento

O projeto deste sistema demandou o desenvolvimento tanto de módulos de *hardware*, que efetuam a aquisição dos sinais de tensão das barras através de seus TPs de medição quanto *softwares* de baixo e alto nível, nos sistemas operacionais *Linux* e *Windows*, para os cálculos dos parâmetros de QEE, geração de arquivos, envio de comandos, armazenamento, visualização e tratamento dos dados gerados.

O *hardware* do equipamento de monitoramento desenvolvido é composto por oito módulos, sendo estes:

- Dois módulos de condicionamento de sinal, um 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*;
- Um módulo de interfaces de comunicação, que implementa proteções elétricas nas conexões de rede *Ethernet* e linha telefônica, e também converte o sinal vindo do GPS de ótico para elétrico, além de incluir um Modem V90 padrão soquet modem, para comunicação via linha telefônica;
- Um módulo gerenciador padrão computador industrial PC104+, que se comunica com o módulo *DSP*, formata os arquivos de registro periódico e oscilográficos e gerencia as comunicações via rede *Ethernet* e linha telefônica.

Estes módulos são interligados segundo o diagrama em blocos da figura 2.

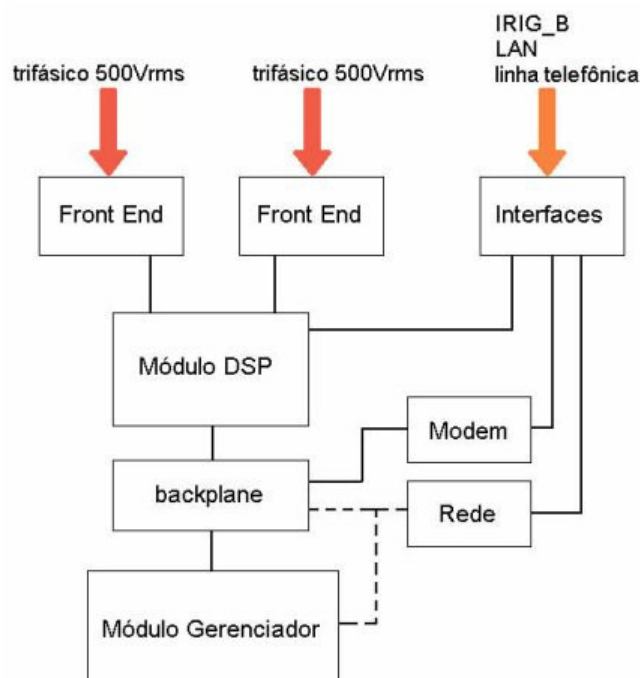


Figura 2 - Diagrama em blocos do equipamento de monitoramento (PQM)

No desenvolvimento do PQM, apenas as placas de modem e do módulo gerenciador não foram projetadas, sendo adquiridos modelos comerciais. As características e funções dos módulos componentes deste equipamento são mais detalhadamente descritas nos itens 2.1 a 2.4.

2.1 Módulo de Condicionamento (*Front End*)

Visando adequar os níveis das tensões de saída dos TPs aos circuitos eletrônicos de aquisição e para prover segurança elétrica ao equipamento, foi desenvolvido um módulo para o condicionamento dos sinais de entrada. As tensões secundárias dos TPs de uma barra são aplicadas a este módulo 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 de óxido metálico.

Estes sinais são então aplicados a circuitos opto-acopladores lineares, que têm por função realizar uma isolamento galvânica de 5300 Vrms entre as entradas e suas respectivas saídas. Para prover alimentação aos circuitos primários desta 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 a um circuito amplificador, cujo ganho é ajustável por meio de potenciômetros digitais, que podem ser controlados através de uma interface ligada à porta paralela de um microcomputador, por um software desenvolvido para realizar esta calibração.

2.2 Módulo de Processamento Digital de Sinais (DSP)

Os sinais de tensão de cada circuito trifásico, após o respectivo condicionamento, entram no módulo *DSP* através de duas conexões distintas, totalizando seis canais analógicos de entrada, os quais são digitalizados simultaneamente e processados em tempo real por este módulo.

Na entrada do módulo *DSP*, os sinais são aplicados a filtros passa-baixas Butterworth de 4ª ordem, com frequência de corte em 3,6 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 de um conversor analógico-digital (A/D), que realiza a conversão simultânea, não multiplexada, dos seis canais analógicos. Sob o controle de um processador digital de sinais (*DSP*), 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 é estabelecida pelo *DSP* e pode ser alterada por *software*.

Os sinais digitalizados pelo conversor A/D são então enviados ao *DSP*, que tem por função efetuar o cálculo de todos dos parâmetros relativos à QEE. Desta forma, o software embarcado do *DSP* (*firmware*), 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 até então registrada no período de integralização, a transformada rápida de Fourier (*FFT*) deste ciclo é calculada e as harmônicas individuais resultantes, até a 50ª ordem, 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 de cada circuito trifásico, sendo estes valores também acumulados para o cálculo do valor médio e máximo ocorrido 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 configurado, o *DSP* efetua todos os cálculos dos valores médios que compõem um registro periódico e comunica ao módulo de gerenciamento que este registro está completo e pode ser extraído. Assim, o módulo gerenciador lê diretamente da memória do *DSP* os dados integralizados para composição do 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 *DSP* sinaliza ao

módulo gerenciador que deve ser montada uma oscilografia do circuito trifásico referente ao canal que entrou em estado de *trigger*. Para tanto, o DSP disponibiliza a estampa de tempo referente ao início do evento e as amostras do ciclo atual, que gerou o *trigger*, além das amostras de 10 ciclos anteriores à ocorrência deste evento. Nos ciclos posteriores, o DSP continuará sinalizando a ocorrência, até que o seu fim 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 um outro arquivo é registrado quando da volta ao estado normal.

Para a obtenção da estampa de tempo dos eventos, o DSP interpreta o sinal codificado no padrão IRIG-B vindo de um receptor GPS, conectado ao módulo de interfaces de comunicação. 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 contagem 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 Módulo de Interfaces de Comunicação

Este módulo 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 ao módulo 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 na entrada da linha telefônica é feita através de um circuito em cascata composto por centelhador a gás, 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 de rede *Ethernet* 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 o módulo DSP.

2.4 Módulo Gerenciador

O *hardware* do módulo gerenciador é formado por um PC industrial padrão PC104+. 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*, especificamente 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. 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 padronizado (*FTP*) os arquivos com todos os parâmetros de QEE medidos. Este aplicativo também é responsável pela recepção e processamento de comandos enviados pelo software de supervisão remota e pelo carregamento do *firmware* do DSP, 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 sinalizações geradas pelo módulo DSP, interpreta os seus significados e lê diretamente da memória

interna do *DSP* os dados referentes aos registros periódicos e oscilográficos, formatando-os para o aplicativo de registro e comunicação. A foto do equipamento de medição completo pode ser vista na figura 3.



Figura 3 - Equipamento de monitoramento da qualidade da energia elétrica (PQM)

2.5 Software de Supervisão

Visando facilitar a visualização dos dados gerados e a configuração remota do equipamento de medição de QEE, foi desenvolvido um aplicativo *Windows*, que implementa estas funções. Este software é composto por 5 pastas, referentes aos registros periódicos, oscilografias, 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 da fase 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 os respectivos valores para as fases B e C do mesmo 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 e o gráfico da forma de onda do circuito trifásico em que houve a ocorrência é plotado automaticamente. Esta tela, mostrando um registro oscilográfico monofásico, pode ser vista na figura 4.

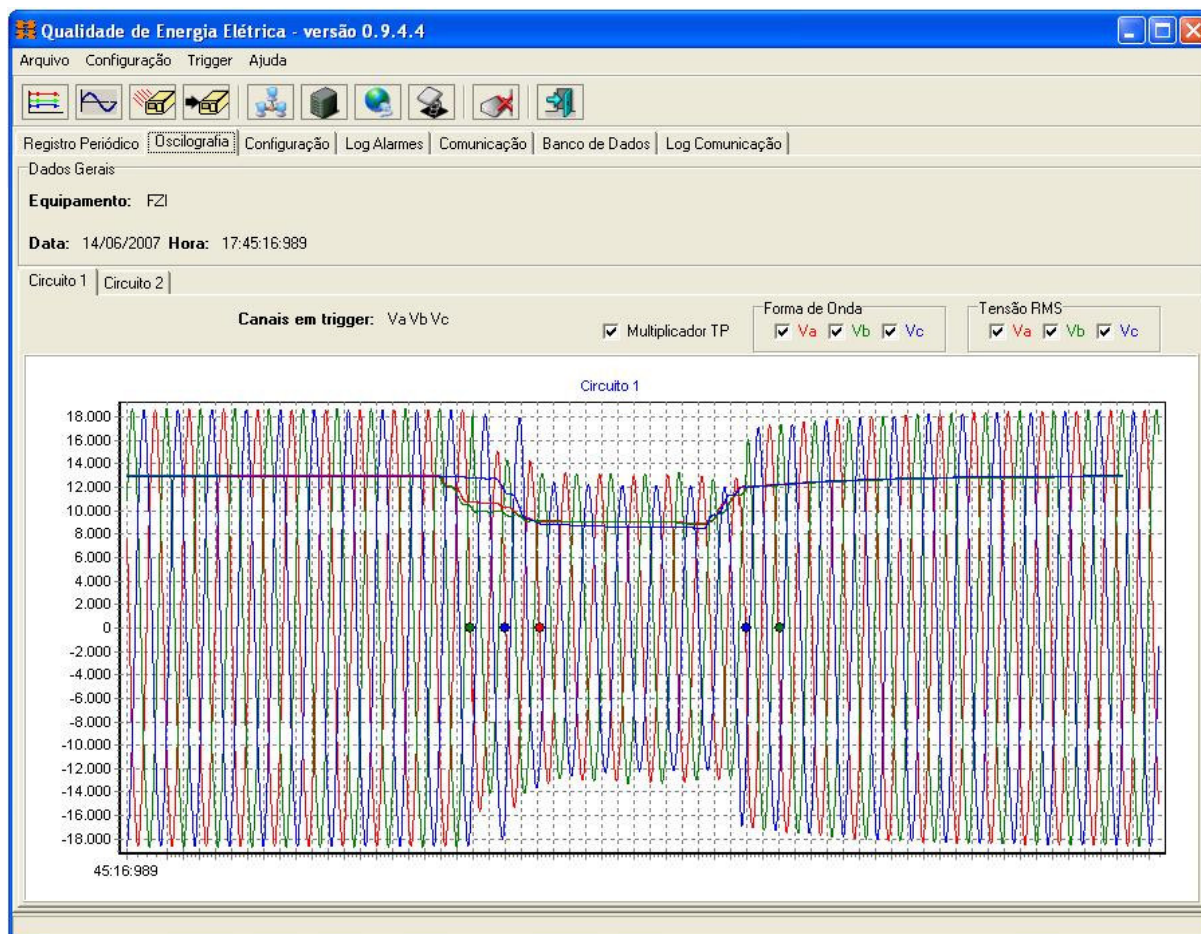


Figura 4 - Software de supervisão, mostrando o registro oscilográfico de um afundamento de tensão ocorrido em uma barra de 13,8 kV da Subestação Fazenda Iguazu, da Copel Distribuição.

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 uma das fases 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.

Na pasta de comunicação, encontram-se campos para configuração de endereços de rede e botões para envio de comandos aos medidores de QEE, como os de atualização de configuração e *firmware* e de *trigger* de usuário. Neste último, o operador pode comandar o registro de uma oscilografia de tamanho máximo no circuito selecionado a qualquer instante.

O software de supervisão também permite a exportação dos registros periódicos e dos dados oscilográficos para arquivos no padrão PQDIF (IEEE 1159.3) e CSV, possibilitando a posterior análise em softwares de cálculo como Matlab e Excel.

3. Conclusões

O sistema desenvolvido vem sendo testado e aperfeiçoado há aproximadamente dois anos, quando da primeira instalação de um PQM em uma subestação da Copel. Até o momento, foram instalados três equipamentos de monitoramento nas subestações que apresentam maior número de ocorrências de variações de tensão, sendo prevista para breve a instalação de mais 11 destes equipamentos. Os equipamentos já instalados têm mostrado uma grande robustez de *hardware*, sendo que nenhum dos equipamentos instalados apresentou falhas devido a avarias ou problemas de projeto de *hardware*, sendo executadas apenas revisões nos *softwares* embarcados e de visualização do sistema.

Além disto, 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.

Assim, 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 o monitoramento da qualidade da energia elétrica em barras de distribuição.

Com este sistema, a concessionária poderá dispor de uma importante ferramenta para análise contínua e remota dos parâmetros de QEE.

4. Bibliografia

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, 2007.

EN 50160 - Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems. fevereiro/2000.

Gaouda, A. M., Salama, M. M. A., Sultan, M. R., Chikhani, A. Y., “Power quality detection and classification using wavelet-multiresolution signal decomposition”, *IEEE transactions on Power Delivery*, Vol. 14, No. 4, October 1999, p. 1469-1476.

IEEE 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1992.

Operador Nacional do Sistema Elétrico, “Módulo 10 - Normas para UTR”, revisão 2, 2003.

Penna, C., Rezende, J. W., “Detecção, localização e identificação de distúrbios da qualidade da energia através da transformada wavelet”, in: *XV Seminário Nacional de Energia Elétrica*, 2002

Robertson, D.C., Camps, O. I., Mayer, J.S., “Wavelets and electromagnetic power system transients”, *IEEE transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 2, April 1996, p.924-930.

W. Pedrycz, F. Gomide, “An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design”, *MIT Press*, 1998.