

# Desenvolvimento de um Equipamento para os Estudos de Balanço Energético e da Qualidade de Energia

C. J. R. d'Ávila, L. P. Moraes e J. F. Caldeira, UFRJ

R. M. Amorim, LIGHT<sup>1</sup>

**Resumo** - Este trabalho descreve o desenvolvimento de um equipamento integrado para realizar estudos de balanço energético e de qualidade de energia, de forma simultânea, em linhas de distribuição elétrica de média tensão (13.2 kV), na área de concessão da Light SA, na cidade do Rio de Janeiro. É apresentada, ao final, uma síntese dos resultados obtidos nos testes do protótipo em campo.

**Palavras-chave** – Balanço energético, qualidade, monitoramento de energia;

## I. INTRODUÇÃO

O balanço energético em Média Tensão tem se mostrado uma ferramenta eficiente na elaboração dos planos de ação para combate às perdas. A utilização de tecnologias mais avançadas e o desenvolvimento de métodos de medição e interpretação dos resultados têm aumentado a assertividade nas ações.

A Light utiliza medidores eletrônicos de Média Tensão (MT) instalados em pontos estratégicos para a identificação das áreas críticas do seu balanço energético. Todas as subestações (SE) têm medidores em seus transformadores (TR), o que permite o balanço total das SE ou por TR. Essas informações estabelecem um mapa de perdas e direcionam as medidas de recuperação. No entanto, o nível de detalhamento pode ser melhorado para uma maior assertividade, uma vez que não são todas as SE que tem medidores de energia nas linhas de distribuição.

Muitos circuitos alimentadores em MT percorrem regiões com características distintas no perfil dos consumidores ao longo da linha. É o caso de uma rua residencial com uma comunidade de baixa renda no extremo da linha de distribuição. O número de clientes por transformador, o perfil de demanda, a classe dos medidores, a incidência de ligações clandestinas e a possibilidade de recuperação de receitas indicam ações completamente diferentes para cada caso.

Assim, quanto mais próximas dos transformadores de BT as medidas estiverem, mais informações serão obtidas e maior será a quantidade de dados para serem utilizados na avaliação dos planos de ação.

Ainda como uma ação de monitoramento no campo, adicionalmente, a ANEEL exige que a qualidade da energia elétrica fornecida aos clientes seja avaliada de forma rotineira.

Os indicadores da Qualidade de Energia fornecida pela concessionária são obtidos através de equipamentos de medição instalados nas linhas de Média Tensão.

Do ponto de vista do hardware existe grande semelhança entre os circuitos necessários à medição de balanço energético e à medição da qualidade de energia.

Dentro desse princípio, a possibilidade de contar com um equipamento multifuncional capaz de realizar as duas tarefas, de forma simultânea, representa uma grande economia de recursos.

A referência utilizada para o projeto do equipamento foi o PRODIST, da ANEEL [1]. O equipamento desenvolvido foi baseado em uma concepção de alto desempenho, baixo custo e está voltado para o uso externo em linhas de distribuição de MT.

O equipamento agrega a possibilidade de configuração e descarga de dados no local da medição, através do uso de um dispositivo portátil com comunicação wi-fi. Dispõe, ainda, de um módulo para captura de oscilogramas nos eventos de interrupção transitória.

Os dados são armazenados no local e, também, transmitidos via modem GSM/GPRS, na forma de um arquivo texto, para um servidor na concessionária.

## II. HARDWARE

### A. CPU

O equipamento tem um hardware único para as duas funções e é baseado em uma CPU embarcada com um processador ATOM, 1.0 GHz, uma placa conversora A/D de 8 canais, 16 bits, 200.000 amostras por segundo e uma unidade de armazenamento local do tipo SSD com capacidade de 40 GB. Os eventos são registrados com um relógio de tempo universal, por GPS, e os dados são transmitidos através de um modem GSM/GPRS, quadriband, para um servidor de arquivos na concessionária. O equipamento possui um módulo wi-fi que permite a conexão de dispositivos portáteis, como smartphones ou netbooks, para configuração no local ou descarga de dados.

Todas as partes utilizadas no hardware são obtidas com facilidade no mercado e representam um custo baixo na construção do equipamento.

O equipamento é capaz de monitorar em tempo real as três fases de voltagem e corrente. Os sensores de voltagem e

<sup>1</sup> Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, sob o número 0382-0021/2007, e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

C.J.R. d'Ávila ([case@del.ufrj.br](mailto:case@del.ufrj.br)), L.P. Moraes ([lpmoraess@gmail.com](mailto:lpmoraess@gmail.com)) e J.F. Caldeira ([julianofcaldeira@gmail.com](mailto:julianofcaldeira@gmail.com)) trabalham no Departamento de Engenharia Eletrônica da Escola Politécnica da UFRJ, R.M. Amorim ([renato.amorim@light.com.br](mailto:renato.amorim@light.com.br)) trabalha na empresa LIGHT S.A.

corrente foram desenvolvidos pela equipe, de modo a atender os requisitos de isolamento e, também, a resposta em frequência para captura de eventos transientes.

Os sensores de voltagem utilizam uma rede atenuadora resistiva e os sensores de corrente são baseados na indução da corrente em um núcleo de material ferromagnético com um gap de ar. Os sensores foram ensaiados em laboratório para validação das características de isolamento e calibração.

A Figura 1 abaixo mostra o diagrama de blocos do equipamento.

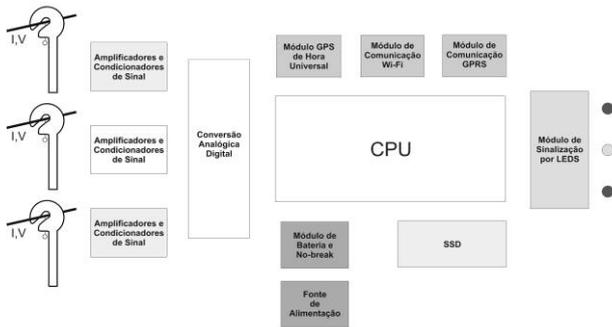


Figura 1. Diagrama de blocos do equipamento

## B. Sensores

O sensor de voltagem e corrente foi construído em um único corpo, com revestimento em fibra de vidro e interior em resina epóxi de alto isolamento elétrico. O sensor foi projetado para operação ao tempo e instalação nas linhas de distribuição aérea de MT. Apresenta como características um isolamento mínimo de 35 kV e uma banda de frequência maior que 1 MHz, permitindo a captura de eventos de curta duração nas linhas de média tensão.

O sensor de voltagem é baseado em um divisor resistivo com compensação capacitiva e uma relação de atenuação de 1:8825. A figura 2 apresenta o esquema elétrico do sensor.

Na medida da corrente foi utilizado um toróide com núcleo de material ferromagnético e um gap de ar para a medição do campo proporcional à corrente na linha.

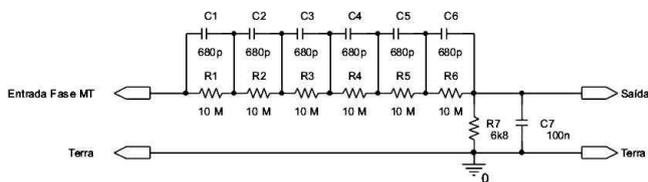


Figura 2. Esquema elétrico do sensor de voltagem.

A figura 3 apresenta os detalhes internos dos sensores de voltagem e de corrente, lado a lado. A figura 4 mostra o sensor construído.

Foram construídas 3 ponteiras com sensores de voltagem e corrente para as medidas nas 3 fases de distribuição de média tensão, conforme mostrado na figura 4.

Os sensores de voltagem e corrente foram calibrados em laboratório para a determinação das constantes de cada ponteira.

A tabela 1 apresenta as constantes medidas para os senso-

res de voltagem e o desvio em relação ao valor teórico da atenuação.

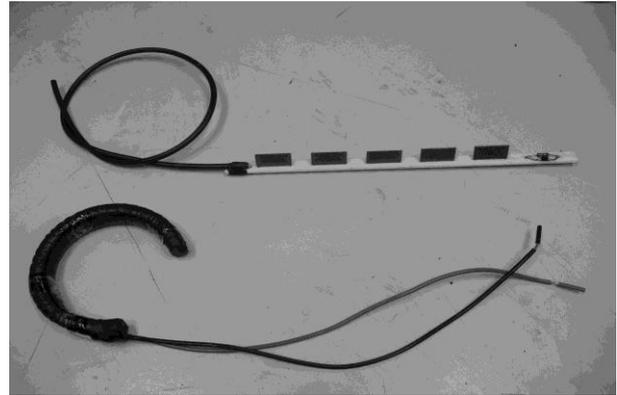


Figura 3. Detalhes internos dos sensores de voltagem e corrente.

Foi realizado, também, um ensaio de isolamento nas ponteiras até a tensão de 90 kV.

Tabela 1. Resultados de calibração para a correção do fator de atenuação teórico do sensores de voltagem de cada ponteira

sensor	atenuação	desvio
P1	1:8678	1,7%
P2	1:8759	0,7%
P3	1:8768	0,6%

As constantes obtidas para as medidas de voltagem e corrente foram utilizadas no módulo de aquisição do software do equipamento.



Figura 4. Foto do sensor de voltagem e corrente construído.

## III. SOFTWARE

O software aplicativo do equipamento é dividido em um módulo para balanço energético e outro módulo para qualidade. O software básico é formado por três módulos principais: aquisição, processamento e comunicação.

O módulo de aquisição controla a captura e a digitalização dos dados. O equipamento utiliza uma conversão em 16 bits, com uma taxa de aquisição de 256 amostras por ciclo, totalizando uma frequência de amostragem de 15360 Hz por canal.

O módulo de processamento faz a análise em tempo real do arquivo digitalizado e identifica as singularidades na forma de onda (valores de pico, transientes, interrupções,...), armazenando os dados e os oscilogramas correspondentes na memória local do equipamento.

O módulo de comunicação transfere as medições para a concessionária via modem GSM/GPRS e, ainda, permite configurar o equipamento e realizar a descarga de dados no local via conexão wi-fi.

Para o desenvolvimento dos programas foi escolhida como plataforma o Microsoft Visual Studio 2005, rodando o Framework 2.0. São utilizadas, também, bibliotecas baseadas na plataforma .NET, da Microsoft, que possui métodos e atributos específicos para a programação da aquisição.

A Figura 5 apresenta as páginas e menus do software aplicativo do equipamento. Através dos menus é possível configurar os dados parametrizáveis, realizar medidas de balanço energético e qualidade e exibir relatórios.

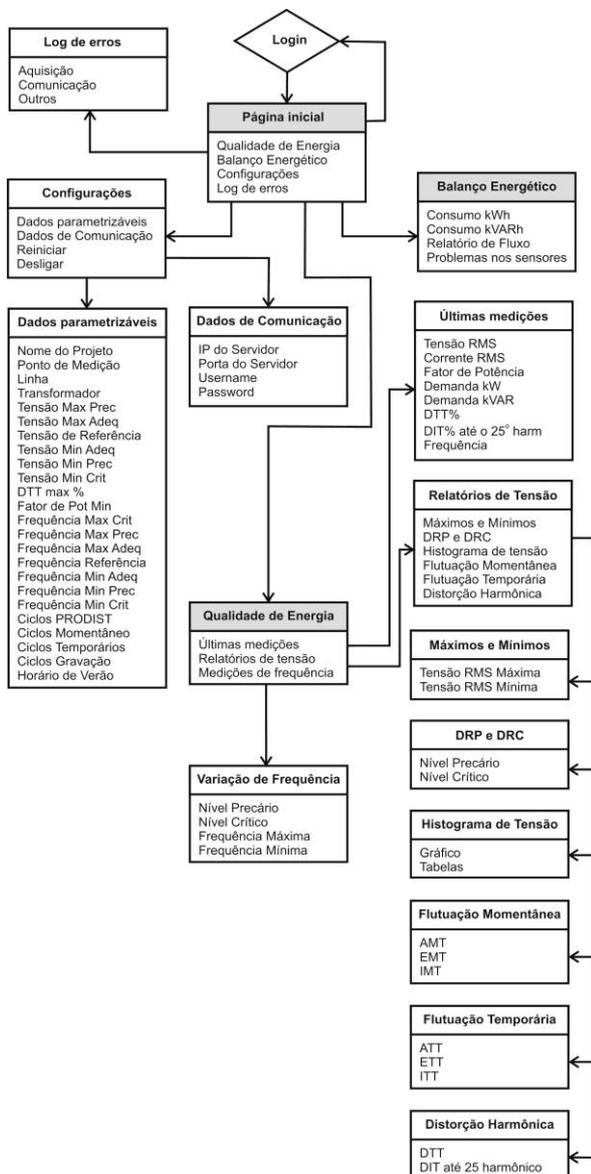


Figura 5. Telas e menus do software aplicativo do equipamento.

#### IV. MEDIDOR DE CONSUMO

Para a medição de consumo, o sistema registra em cada fase o consumo de energia em kWh, kVARh e a temperatura ambiente.

Após a configuração dos parâmetros pelo usuário o equipamento inicia a aquisição e realiza a análise e a validação dos sinais. Caso os sinais estejam dentro dos padrões os cálculos de consumo são feitos e os resultados são gravados em disco.

A Figura 6 apresenta o fluxograma da medição de consumo pelo equipamento.

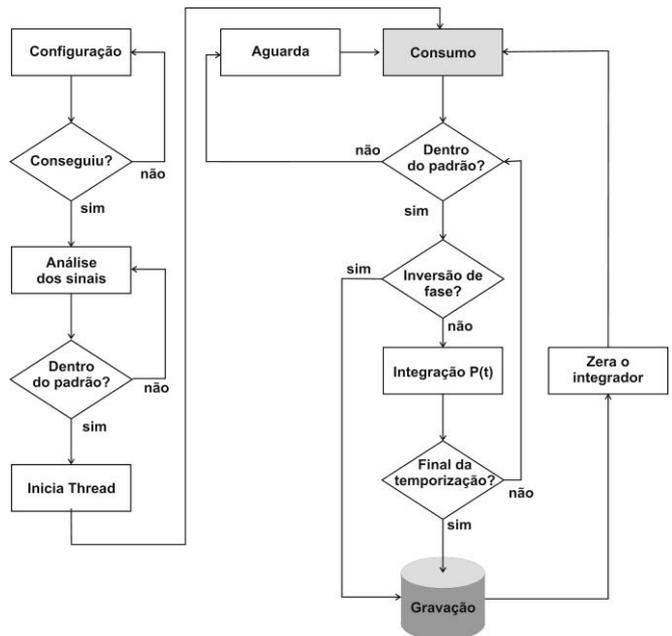


Figura 6. Medição de consumo.

##### A. Balanço de energia

Quando mais de um equipamento é instalado em segmentos de uma linha de distribuição é possível realizar o balanço energético e identificar o consumo por segmento.

Com um equipamento instalado em um ponto A e outro equipamento instalado em um ponto B, na mesma linha, o consumo entre A e B pode ser obtido pela subtração ( $A - B$ ) das medições realizadas pelos equipamentos, dentro do mesmo intervalo de tempo.

O balanço energético pode ser feito considerando os dados obtidos pelos equipamentos em comparação com as informações comerciais da energia faturada pela empresa.

Caso haja uma discrepância dos valores, as possíveis causas relacionadas às perdas técnicas ou comerciais devem ser estudadas.

##### B. Inversão de Fase

No cálculo do balanço energético deve ser considerada a possibilidade de uma inversão no sentido da corrente na linha, por necessidade alguma manobra. As figuras 7.a e 7.b abaixo exemplificam esse caso.

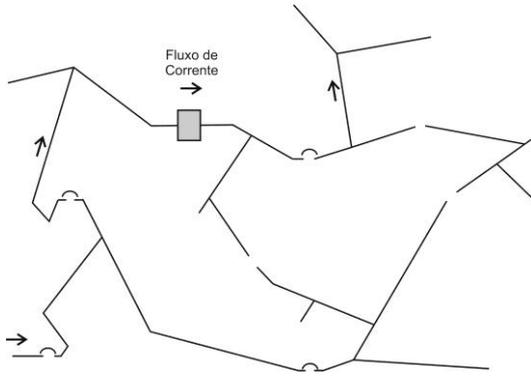


Figura 7.a. Configuração com fluxo de corrente normal no equipamento.

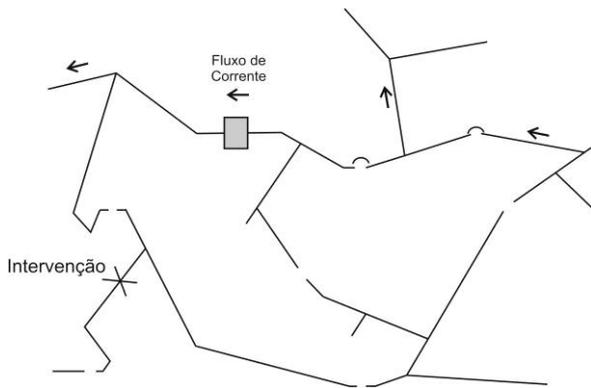


Figura 7.b. Configuração com o fluxo de corrente invertido no equipamento, devido a uma manobra na linha.

O equipamento é capaz de identificar, de forma automática, em relação ao início do teste, a mudança no sentido da corrente na linha e corrigir as medidas para que o cálculo do balanço energético seja consistente.

Para o procedimento de correção o equipamento verifica se o sinal da Potência Ativa calculada é negativo. Nessa situação, que caracteriza a inversão da corrente na linha, o algoritmo passa a introduzir um ângulo de defasagem de  $180^\circ$  nos cálculos.

## V. MEDIDOR DE QUALIDADE

Para a medida da qualidade no fornecimento de energia, o sistema registra para cada fase a tensão RMS, a corrente RMS, o fator de potência, a distorção harmônica, a potência ativa, a potência reativa, a potência aparente e a frequência.

Após a configuração dos parâmetros pelo usuário o equipamento inicia a aquisição e realiza a análise e a validação dos sinais. Caso os sinais estejam dentro dos padrões os cálculos de qualidade são feitos e os resultados são gravados em disco.

A figura 8 apresenta o fluxograma da medição de parâmetros de qualidade no fornecimento de energia.

A análise do sinal, de forma contínua, é realizada em períodos de tempo sucessivos determinados por um temporizador que pode ser configurado pelo usuário. Toda vez que o temporizador é zerado, o sistema grava o valor do consumo até aquele ponto e reinicializa os contadores de integração.

O equipamento verifica, ainda, se os valores RMS estão

dentro das faixas estabelecidas para os cálculos de qualidade. Caso ocorra uma interrupção no fornecimento de energia o equipamento entra em um modo de espera até que seja restabelecida a tensão na linha. Durante esse período de interrupção o algoritmo não é executado e os parâmetros de qualidade de energia não são calculados. Com o retorno do fornecimento o equipamento entra novamente no modo de medida.

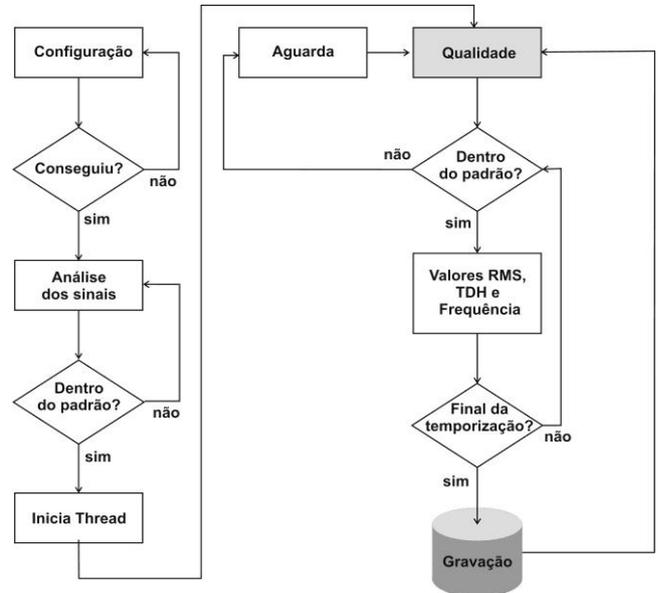


Figura 8. Medição de qualidade no fornecimento de energia.

### A. Valores RMS

Os valores da tensão e corrente RMS são calculados pelas equações (1) e (2) a seguir.

$$V_{RMS} = \sqrt{\int_0^{2\pi} V(\varphi)^2 d\varphi} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\int_0^{2\pi} I(\varphi)^2 d\varphi} \quad (2)$$

Segundo o PRODIST [2], a tensão de atendimento deve ser classificada por faixas em torno da tensão de referência (TR) que corresponderá à tensão contratada. No caso deste equipamento são seguidas as regras de um SDMT (Sistema de Distribuição de Média Tensão), conforme a Figura 9.



Figura 9. Faixas de tensão de atendimento, segundo PRODIST.

A tensão de referência é de 13800V, a faixa de tensão adequada vai de 13110 a 14490V e a faixa precária vai de 12420 a 14766V. A faixa crítica vai de 10000 a 12420V e, também, acima de 14766V. A tensão off é de 10000V.

Valores medidos abaixo da tensão off indicam que a linha está desenergizada.

### B. Fator de Potência

O fator de potência é calculado a partir dos valores das potências ativa e reativa (P, Q), ou das respectivas energias (EA, ER), utilizando a expressão em (3).

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2+ER^2}} \quad (3)$$

Para as unidades consumidoras com tensão inferior a 230kV o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00, indutivo, ou entre 1,00 e 0,92, capacitivo, de acordo com a regulamentação vigente.

### C. Distorção Harmônica

Para a medida da distorção harmônica é realizada a FFT (*Fast Fourier Transform*) do sinal e calculada a potência do espectro de harmônicos em relação à potência da frequência fundamental, em 60Hz.

O espectro harmônico, para fins do cálculo da distorção total, deve compreender uma faixa de frequências desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ( $h_{min} = 25$ ).

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais na rede de Média Tensão não devem ser superiores a 8% [2].

### D. Frequência

A medida da frequência da rede se baseia no cruzamento de zero dos sinais. A partir da taxa de aquisição de dados é contabilizada a quantidade de pontos entre dois cruzamentos de zeros consecutivos e é calculada a frequência da rede. Para a redução do erro na medida, o algoritmo utiliza uma interpolação entre as duas aquisições em torno do cruzamento de zero.

Segundo a orientação do PRODIST [2], não é admissível a frequência da rede exceder 66Hz ou ser inferior a 56,5Hz.

É admitida a permanência acima de 62Hz por, no máximo, 30 segundos e acima de 63,5Hz por, no máximo, 10 segundos.

É permitida a permanência abaixo de 58,5Hz por, no máximo, 10 segundos e abaixo de 57,5Hz por, no máximo, 5 segundos.

### E. Taxa de amostragem e erro de fase na conversão

O processamento dos sinais de tensão e corrente é realizado a partir da digitalização no conversor A/D. As medidas são obtidas com uma taxa de amostragem de 200000 amostras por segundo para os sete canais de aquisição. Essa taxa estabelece um limite superior de 476 amostras por ciclo de senóide de 60Hz.

Foi escolhido, então, o número de 256 amostras por ciclo,

equivalente a 15360 Hz por canal e que corresponde a uma taxa de amostragem de 107520 Hz.

Portanto, as amostras dos canais são obtidas em instantes de tempo diferentes, dentro de uma mesma varredura. Essa característica exige um cuidado na escolha dos canais e, também, do algoritmo a ser utilizado para os cálculos de consumo de energia, de modo a assegurar a acurácia.

Como forma de minimizar as diferenças entre os instantes de tempo em que são obtidos os valores de tensão e corrente de cada canal, foi utilizada a ordem mostrada na tabela 2.

Tabela 2. Distribuição dos canais de aquisição

canais	descrição
0	temperatura
1	tensão A
2	corrente A
3	tensão B
4	corrente B
5	tensão C
6	corrente C

Assim, em uma mesma fase, a diferença de tempo entre a aquisição da tensão e da corrente é minimizada, uma vez que os canais estão dispostos em uma seqüência direta.

A esta diferença de tempo corresponde uma diferença de fase, em graus, entre a tensão e a corrente. É necessário determinar essa diferença, de modo que os valores obtidos possam ser corrigidos pelo algoritmo do cálculo do consumo.

$$\Delta T_{amostr} = \frac{1}{f} = \frac{1}{107.52kHz} = 9,301\mu s \quad (4)$$

$$\Delta T_{rede} = \frac{1}{f} = \frac{1}{60Hz} = 16666,67\mu s \quad (5)$$

$$\Delta \theta = 360 \times \frac{9,301}{16666,67} \cong 0,200901596^\circ \quad (6)$$

O valor encontrado em (5) é constante e é utilizado pelo algoritmo de processamento como uma correção nos cálculos de consumo e qualidade de energia.

Porém, existe outro fator que é variável e, também, afeta a acurácia dos cálculos. Esse fator está relacionado com o número de amostras por ciclo da senóide de 60Hz.

Foram escolhidas 256 amostras por ciclo para a digitalização dos sinais de tensão e corrente. Nesse caso, a resolução é de 1,40625 graus entre as medidas.

Essa resolução não permite identificar o cruzamento de zero através de uma aproximação com o valor em graus da abscissa da primeira amostra após a passagem pelo eixo horizontal.

Portanto, para reduzir o erro, foi adotada a técnica de interpolação entre os valores das medidas. Determina-se, através da troca de sinal, o valor definido pelo primeiro ponto após o cruzamento do eixo horizontal, chamado de ponto N.

Encontra-se o último ponto antes do cruzamento do eixo horizontal, chamado N-1.

Calcula-se o coeficiente angular da reta que une os dois valores e encontra-se, através da interpolação, o ponto exato do cruzamento do eixo.

A Figura 10 apresenta a solução adotada.

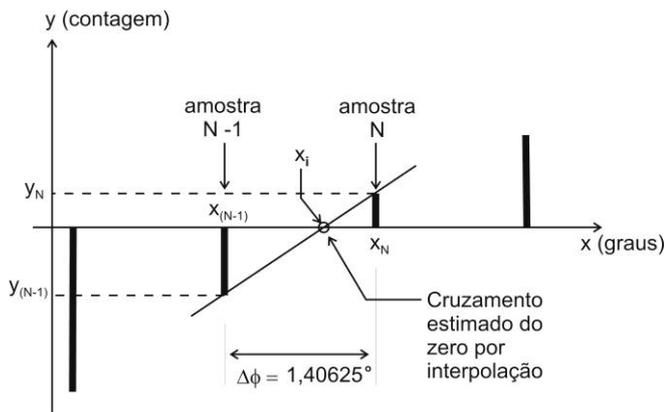


Figura 10. Interpolação por reta para determinar o cruzamento do zero.

De forma analítica, pode-se encontrar o valor  $x_i$ , em graus, no cruzamento do eixo, em (10).

A reta interpolada entre os valores das amostras N-1 e N é representada por

$$y = ax + b \quad (7)$$

Com  $y = 0$ ,

$$ax = -b \quad (8)$$

$$x = \frac{-b}{a} = \frac{-b \cdot \Delta x}{\Delta y} \quad (9)$$

$$x_i = x_{(N-1)} + \frac{y_{(N-1)}}{(y_N - y_{(N-1)})} \times \Delta \phi \quad (10)$$

Com essas correções os valores obtidos pelo equipamento apresentam um erro máximo de 0,1% na medida de consumo. Os erros encontrados nos cálculos dos valores RMS e de outras grandezas são, ainda, menores.

## VI. TESTES E RESULTADOS

Uma unidade do equipamento foi instalada em Nova Iguaçu, entre a Av. Elias Persiano e a Rua M, próximo a Estrada Variante Rio - São Paulo. A localização (-22.831804,-43.606169), como latitude e longitude, em graus, pode ser identificada dentro do Google Maps.

Para os testes, o equipamento ganhou a identificação ID000001 e o nome dado ao projeto no campo foi TSTPD1504. Os testes foram realizados entre o dia 15/04/2010, às 12h26m, e o dia 16/05/2010, às 10h23m.

O período compreendido entre os dias 13/5/2010 e 16/05/2010 não foi considerado. Apenas os dados referentes às quatro primeiras semanas completas foram utilizados na análise.

Foram avaliadas as funcionalidades do equipamento na medição dos parâmetros de qualidade de energia e a capacidade de obter os dados necessários ao cálculo do balanço energético.

As figuras 11, 12 e 13 mostram a instalação do equipamento para os testes de campo.



Figura 11. Foto da preparação do equipamento para a instalação.

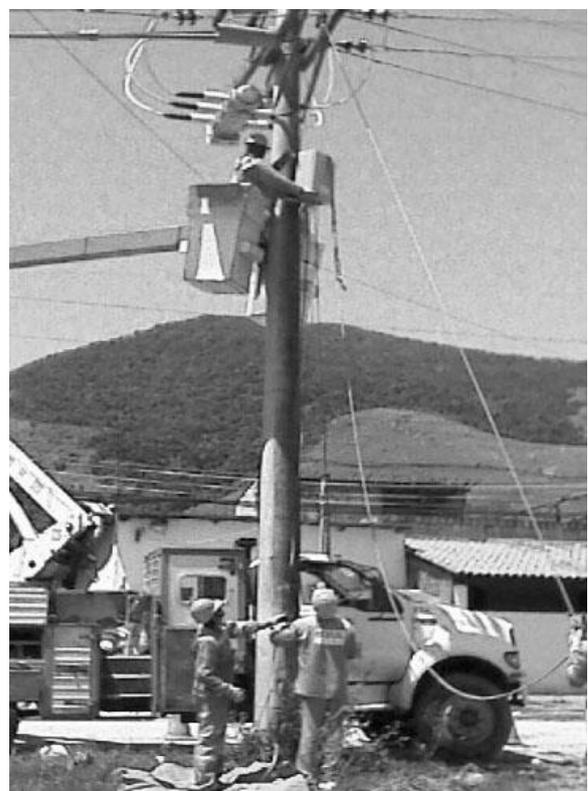


Figura 12. Foto da instalação para os testes de campo.



Figura 13. Foto do equipamento instalado para os testes de operação.

Os resultados foram obtidos a partir dos dados de quatro semanas, totalizando 28 dias de análise. Na análise em regime permanente o equipamento realiza uma amostra a cada 5 minutos. Desse modo, para cada semana foram obtidas 2016 amostras de cinco minutos.

O padrão PRODIST utiliza 1008 amostras de 10 minutos. Portanto, foi necessário agrupar duas amostras sequenciais para formar uma nova amostra.

#### A. DPC e DRC

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelo equipamento no cálculo dos fatores de transgressão precária (DRP) e crítica (DRC), segundo o PRODIST, em uma das fases da linha de MT. Os eventos analisados situaram-se somente na faixa de transgressão crítica, por isso são apresentados apenas os índices DRC.

Tabela 3. Resultados obtidos nos testes de campo para a análise dos Fatores de transgressão precária (DRP) e crítica (DRC), segundo PRODIST

Período	Adequados	Precários	Críticos	DRC
semana 1	1768	0	248	12,3%
semana 2	1981	0	35	1,7%
semana 3	1988	0	28	1,4%
semana 4	1963	0	53	2,6%

#### B. VTCD

O equipamento é capaz de identificar as variações de tensão de curta duração (VTCD), segundo o PRODIST, e registrar os oscilogramas correspondentes aos eventos.

A figura 14 mostra o registro de um afundamento temporário de tensão (ATT) com o oscilograma associado.

Descrição: ATT  
 Data Início: 2010/4/19 18:46:44.534  
 Data Fim: 2010/4/19 18:47:5.784  
 Fase: Trifásico  
 Tensão de trigger: 2724,69  
 Gps Lock: Ligado  
 Base de tempo única: Sim

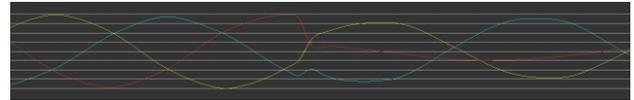


Figura 14. Cabeçalho de identificação de um evento de ATT e o oscilograma correspondente obtido pelo equipamento.

Para o período de teste descrito foi construída apenas uma unidade do equipamento e, por isso, não foi possível a realização dos cálculos de balanço energético. O próximo teste prevê a instalação de cinco unidades, com reversão programada da corrente em parte da linha.

## VII. CONCLUSÕES

O equipamento desenvolvido mostrou-se adequado tanto para a obtenção dos dados necessários ao balanço energético quanto para os indicadores da qualidade de energia.

Os erros encontrados nas medidas situaram o equipamento dentro da classe de funcionamento exigida no PRODIST e compatível com outros equipamentos em operação no mercado.

A possibilidade do uso de um único equipamento para as duas funções permitiu mais agilidade, flexibilidade e economia de recursos nas ações de campo.

As funções de configuração e descarga remota de dados no local do teste, assim como a obtenção dos oscilogramas nos eventos de curta duração, se mostraram importantes e agregaram um valor significativo ao equipamento.

Finalmente, o baixo custo do equipamento torna viável a instalação de mais unidades ao longo das linhas, permitindo uma escala de monitoramento mais abrangente e com maior precisão.

## VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PRODIST – Procedimentos de Distribuição, Módulo 5 – Sistemas de Medição, ANEEL, 2008.
- [2] PRODIST – Procedimentos de Distribuição, Módulo 8 – Qualidade, ANEEL, 2008.
- [3] CODI - ELETROBRÁS, Coleção Distribuição de Energia Elétrica, Volume 4, Manutenção e Operação de Sistemas de Distribuição, Edgard Blucher, 1982.
- [4] CODI - Diretrizes e Critérios para a Manutenção Preventiva das Redes Aéreas de Distribuição, Relatório CODI-16.01.
- [5] C.J.R. d'Ávila, A.F. Mello, L.P. Moraes, P.G.G. Fernandes e J.F. Caldeira, “Desenvolvimento de um Equipamento para a Identificação de Falhas Transitórias em Linhas de Distribuição em Média Tensão”, apresentado no XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda, Outubro, 2008.
- [6] M.A. Saidel, L.F. Kurahassi, A.L.V. Gimenes, L.C.R. Galvão, “Sistema de Informação Autônomo como Ferramenta

menta de Apoio à Gestão de Energia”, apresentado no Congresso de Computación Aplicada - CAIP2007, Assunção, Paraguai, 2007.