

Monitorização digital de parâmetros associados à qualidade da energia eléctrica

José Baptista¹, Raul Morais¹, António M. Moura², Paulo Amaral¹, Ricardo Costa¹

¹ Departamento de Engenharias da
Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro
Quinta de Prados – 5000 Vila Real, PORTUGAL
Telef:+351259350300, fax:+351259350300, e-mail baptista@utad.pt, rmorais@utad.pt, pauloamaral@oniduo.pt,

² Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Dep^o de Engenharia Electrotécnica e Computadores – Porto mmoura@fe.up.pt
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, PORTUGAL
Telef:+35122 508 1875

Abstract. This work is inserted in the electrical energy quality area and has as purpose a measurement instrument development and rates analysis of the voltage and the current harmonic distortion in electrical circuits. For measuring and monitoring power quality it's necessary to read from the electrical circuit, the line voltage and current waveforms. Only an analysis of the waveforms allows obtaining the main indicators of the power quality. The line-voltage and current waveforms analysis, initially passes by transforming the analogical signals into digital ones, the digital signals are transformed from the time domain into frequency domain, for that it's used the discrete Fourier transform. With the signals in the frequency domain and through the software developed for this purpose, it's possible to determine in real time the current, voltage, average power, power factor and harmonic distortion rates. From this work resulted an instrument for measuring the basic parameters of an electrical circuit and analysis of the power quality, whose main advantages regarding the gender instruments in the market, is its price that is extremely low and it has high versatility.

Palavras chave

Qualidade da Energia eléctrica, distorção harmónica, instrumento de medida, aquisição e tratamento de dados.

1. Introdução

A preocupação com a Qualidade da Energia Eléctrica (QEE) e uma prioridade que envolve todos os agentes do Sistema de Energia Eléctrica (SEE), desde as empresas responsáveis pela produção, transporte e distribuição até aos consumidores industriais, comerciais e residenciais, bem como os fabricantes de equipamentos eléctricos e electrónicos. São variados os problemas relacionados com a qualidade da energia eléctrica que se colocam nos dias de hoje, principalmente aos consumidores industriais. A indústria moderna não depende da electricidade apenas como fonte de energia para o funcionamento dos equipamentos de força motriz, de iluminação ou de aquecimento. Depende também da electricidade – tal como acontece com outros sectores da

actividade económica – para o funcionamento dos sistemas informáticos, nas mais variadas formas associados a equipamentos do processo produtivo. Electrónica de precisão, equipamento informático e outras cargas eléctricas sensíveis são vulneráveis a perturbações de energia, que afectam a qualidade geral da energia e a fiabilidade do sistema eléctrico. Energia de boa qualidade é absolutamente fundamental para manter a produtividade e a consistência de uma organização.

Luzes que cintilam, perdas de dados, disparos incómodos das protecções e sobreaquecimento de componentes são alguns dos avisos que perturbações de energia podem estar a provocar.

Quando ignorados ou imprevistos, estes problemas podem conduzir a inactividade não programada, perda de produção e avaria de equipamentos. Bem como, pôr em risco a segurança pessoal e aumentar os custos com a energia.

Assegurar uma energia de boa qualidade requer monitorizações frequentes, boas práticas de manutenção e a utilização de equipamentos de monitorização adequados. Apenas ferramentas especificamente concebidas para detectar avarias, registar e analisar parâmetros da qualidade da energia fornecem os detalhes que permitem localizar as fontes de perturbação e diagnosticar os problemas. Os dados registados constituem uma base para manutenção preventiva, permitindo detectar perturbações numa fase inicial.

Através da medição de tensões e correntes do sistema podem-se encontrar as informações necessárias para identificar, analisar e corrigir os problemas da qualidade da energia, para isso, é fundamental que seja utilizada a instrumentação apropriada. O presente trabalho consiste no desenvolvimento de um instrumento, capaz de registar a forma de onda da tensão e da corrente de um circuito eléctrico e analisar essas ondas recorrendo aos algoritmos apropriados, permitindo assim avaliar a qualidade da energia eléctrica no circuito.

O objectivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema modular, flexível e de baixo custo para a monitorização da qualidade da energia eléctrica nos seus mais variados aspectos. O sistema a desenvolver deverá registar a forma de onda da tensão e da corrente num circuito ou receptor eléctrico monofásico, calcular os dados necessários para o HarmoSim[®] - que permite a simulação dos harmónicos presentes numa instalação eléctrica e a análise da distorção harmónica produzida por um ou mais receptores eléctricos - e introduzi-los de forma automática na base de dados. Com os dados registados de tensão e corrente, o sistema desenvolvido fornece em tempo real os seguintes dados:

- Tensão e corrente eficazes;
- Potência activa;
- Factor de potência;
- Taxa de distorção harmónica da tensão e da corrente;
- Factor de pico da tensão e da corrente;
- Forma de onda da tensão e da corrente;
- Espectro dos harmónicos ímpares da tensão e da corrente até ao 25º harmónico.

2. Qualidade da energia eléctrica

O conceito Qualidade da Energia é novo e está indiscutivelmente ligado à nova realidade que se vive no sector eléctrico.

A definição do produto Electricidade merece uma atenção especial. É um produto de características diferentes daquelas que normalmente associamos a bem de consumo. É um produto que não pode ser armazenado, isto é, é produzido na exacta medida em que é consumido. Os desvios aos 50 Hz na frequência da rede atestam precisamente o equilíbrio a que se chegou entre a produção e o consumo.[1]

Os critérios que definem a qualidade deste produto dificilmente são critérios uniformes. Para um utilizador doméstico a qualidade mede-se fundamentalmente de uma forma empírica, usando a maior parte das vezes a iluminação como instrumento de análise (há luz ou não há luz, dizemos muitas vezes). Para um utilizador industrial, para um hospital ou para um grande edifício do sector terciário os critérios que definem a qualidade são completamente diferentes.

Outra das características particulares do produto electricidade é a possibilidade do consumidor receber este bem ao mesmo tempo que o degrada, contribuindo simultaneamente para degradar a "electricidade" recebida pelos seus vizinhos.

A maioria das empresas subestima a energia de fraca qualidade, muitas culpam os distribuidores de energia locais, apesar de ser consensual que a maioria dos problemas de energia tem na verdade origem no interior das instalações. Isto deve-se ao recurso crescente a equipamentos com fontes de alimentação comutadas, variadores de velocidade em motores eléctricos e sistemas electrónicos de iluminação de alta-frequência. Em funcionamento normal o equipamento pode injectar eventos não desejados ou perturbações no sistema de distribuição de energia eléctrica das instalações. As perturbações de energia revelam-se de diversas formas, incluindo a reinicialização de computadores e perdas de

dados, luzes e monitores que cintilam, sobreaquecimento de motores e transformadores, disparo de protecções e facturas de energia maiores. Se estes avisos forem ignorados, pode resultar em equipamentos danificados e interrupções em processos fundamentais.

A rede de distribuição tem um forte impacto na qualidade. A qualidade na produção é quase sempre muito uniforme e praticamente todas as perturbações sentidas pelos consumidores têm origem em acidentes ou incidentes na rede de distribuição. Muitos destes incidentes têm origens em eventos imprevisíveis tais como descargas atmosféricas, curtos-circuitos provocados por aves, incêndios florestais, entre muitas outras causas, e não ha meios técnicos para evitar as suas consequências.

As perturbações de energia definem-se em termos de amplitude e duração. Quando uma perturbação não se enquadra nos limites especificados isto pode afectar o equipamento eléctrico. Entre as perturbações mais comuns encontram-se as descidas e subidas de tensão, a distorção harmónica, o desequilíbrio de tensões, oscilações e efeitos transitórios [2]. Múltiplas perturbações implicam funcionamentos incorrectos de diferentes equipamentos, pelo que se torna indispensável caracterizar e definir essas perturbações.

A definição do que é a qualidade da energia foi objecto de uma norma Europeia, a EN 50160 [3]. O termo Qualidade da Energia não é apropriado quando se fala nesta norma. De facto seria mais rigoroso falar de qualidade da onda de tensão. No entanto, para análise do impacto dos problemas de qualidade em instalações eléctricas é necessário ir além do estudo da qualidade da onda de tensão, mas isso está fora do âmbito deste trabalho.

2.1- Perturbações relevantes em instalações eléctricas

Em sistemas eléctricos de energia as perturbações com maior impacto na actividade produtiva e nas instalações eléctricas são as seguintes[1]:

- Interrupções da alimentação;
- Cavas;
- Sobretensões transitórias;
- Harmónicas de Corrente;
- Harmónicas de Tensão.

2.1.1- Harmónicos de corrente

A utilização intensiva de cargas não lineares é generalizada nas instalações modernas. Um edifício de escritórios ou comércio apresenta hoje em dia mais de 60% de cargas não lineares. Em muitas indústrias as cargas não lineares representam mais de 45% da carga total.

A medição da corrente e tensão aplicada a uma carga não linear está representada na figura 1, neste caso uma lâmpada fluorescente compacta. Na figura 2 está representado o espectro harmónico de corrente correspondente. Repare-se que o 3º harmónico representa 50% da fundamental, o 5º harmónico cerca de 34%, o 7º cerca de 26%, o 9º cerca de 28%.

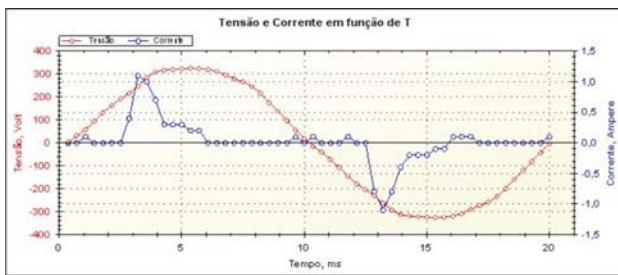


Fig. 1. Formas de onda da tensão e corrente relativas a iluminação fluorescente.

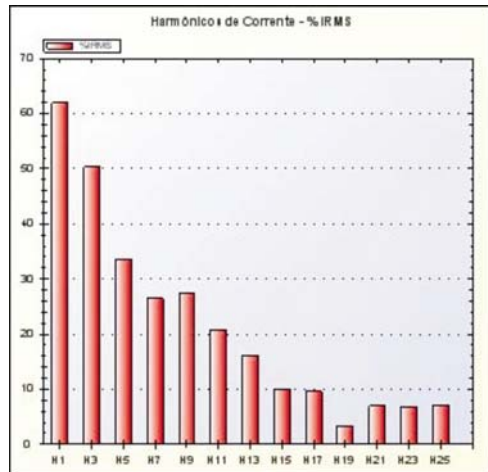


Fig. 2. Espectro harmônico da corrente relativo a iluminação fluorescente.

Actualmente existe uma grande proliferação de cargas não lineares com espectros semelhantes aos da iluminação fluorescente compacta, exemplos disso são as fontes de alimentação comutadas. Computadores, balastos electrónicos, variadores de velocidade, aparelhos microondas, monitores LCD, carregadores de telemóvel, etc. são exemplos de aparelhos que utilizam fontes de alimentação comutadas. A utilização maciça de equipamentos deste tipo, introduz nas instalações eléctricas uma quantidade considerável de poluição harmónica.

2.1.2- Harmónicos de tensão

A existência de harmónicos de corrente leva ao aparecimento de harmónicos de tensão. Pois, os harmónicos de tensão são o resultado do produto da corrente harmónica pela impedância harmónica da rede de alimentação. Se pretendermos reduzir os harmónicos de tensão, uma das formas de o fazer consiste em reduzir a impedância harmónica a montante [2].

Os harmónicos de tensão têm grande impacto em muitos equipamentos [2]:

- Impacto nos motores:
- Impacto nos condensadores:
- Impacto nos sistemas informáticos

3. Metodologia de cálculo das grandezas a monitorizar

Para quantificar e analisar as perturbações que podem afectar uma instalação eléctrica, é necessário monitorizar

periodicamente na instalação ou partes da instalação, a forma da onda de tensão e onda de corrente.

A monitorização consiste em registar determinado número de amostras de um período da onda de tensão e corrente, posteriormente esses dados são processados de acordo com os métodos e algoritmos adequados para obter as informações desejadas.

Descrevem-se de seguida os métodos de cálculo utilizados no processamento dos sinais de tensão e corrente registados, para obtenção das grandezas eléctricas necessárias à avaliação da qualidade da energia eléctrica [2][4][5][6].

3.1- Valor eficaz

O valor eficaz de um sinal distorcido, obtém-se calculando a raiz quadrada da soma quadrática das suas componentes harmónicas, de acordo com a equação (1).

$$Y = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2} \quad (1)$$

3.2- Taxa de distorção harmónica

A taxa de distorção harmónica – THD (*Total Harmonic Distortion*) definiu-se como consequência da necessidade de poder quantificar numericamente os harmónicos de tensão ou corrente existentes num determinado ponto do sistema eléctrico. Segundo a definição dada pelo IEEE Std 519[7] este parâmetro representa a relação entre o valor eficaz dos harmónicos e o valor eficaz da componente fundamental, sendo calculado com base na equação (2).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (2)$$

Na equação (1 e 2), o valor de Y representa a amplitude do harmónico de ordem n . O cálculo da amplitude Y_n é feito através da Transformada Discreta de Fourier (DFT) aplicando a equação (3), a fase correspondente a cada um dos harmónicos é calculada a través da equação (4).

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad (3)$$

$$\angle(k) = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[Y(k)]}{\text{Re}[Y(k)]} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

3.3- Factor de potência

Correntemente é comum considerar-se o factor de potência como sendo o $\cos\phi$, onde ϕ representa o ângulo

entre as componentes fundamentais da corrente e da tensão. Esta consideração apenas pode ser feita quando na presença de sinais (tensão e corrente) puramente sinusoidais sem harmónicos. O cálculo do factor de potência tendo em conta não só as componentes fundamentais assim como todos os harmónicos presentes, é feito através da equação (5).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_{h1} \times U_{h1} \times \cos \varphi}{I_{rms} \times U_{h1}} \quad (5)$$

4. Implementação

O sistema implementado é modular e flexível, para corresponder aos objectivos propostos o sistema é composto essencialmente por três módulos independentes e um computador como apresentado na figura 3:

- Módulo de transdutores e condicionamento dos sinais de tensão e corrente;
- Módulo de conversão dos sinais analógicos em sinais digitais;
- Módulo de processamento dos sinais digitais e interface com o computador;
- Computador cuja função é guardar e processar os respectivos dados;

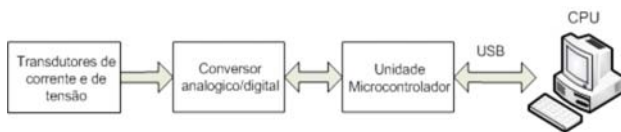


Fig. 3. Arquitectura básica do sistema

4.1- Módulos de condicionamento dos sinais

O módulo de condicionamento dos sinais é composto pelos transdutores, que convertem os sinais de tensão e corrente do circuito a medir, em sinais de corrente de menor amplitude compatíveis com o conversor ADC. Os transdutores são o LA 100-P (corrente) e o LV 25-P (tensão), ambos de efeito de hall e do fabricante LEM.

Entre a saída de cada um dos transdutores e a entrada da ADC foi criado um circuito condicionador de sinal. O valor da corrente de entrada deve ser o mais próxima possível do valor nominal de 100A. Como a corrente de entrada mínima é de 25A será necessário utilizar 4 espiras no transdutor.

Apesar do sinal de saída do transdutor respeitar o limite máximo de tensão do ADC, foi adicionado também o circuito condicionador de sinal da figura 4 e 5 cujo objectivo é criar um *buffer* à saída do transdutor.

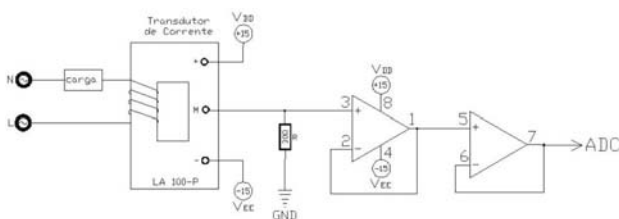


Fig. 4. Circuito do condicionador do sinal de corrente

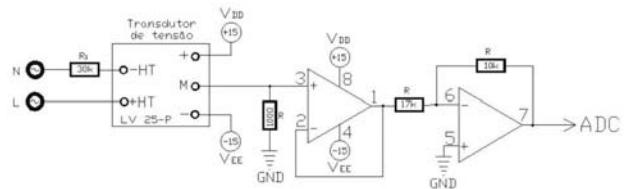


Fig. 5. Circuito do condicionador do sinal de tensão

4.2- Módulo de conversão analógico-digital

O módulo de conversão A/D da Figura 6 tem a função de digitalizar os sinais de tensão e corrente que lhe são aplicados pelos módulos de condicionamento dos sinais. É composto apenas por um ADC, que é controlado por um microcontrolador.

São utilizados apenas dois canais da ADC, um para o sinal de tensão e outro para o sinal de corrente. O modo de conversão a utilizar é o bipolar, este modo de conversão reduz a resolução de 12 bits para 11 bits.

Na conversão é utilizado o relógio interno do ADC. O ADC após receber os 8 bits de controlo faz a conversão por aproximações sucessivas sem recorrer ao sinal de relógio externo. Após a conversão o ADC coloca na saída o resultado, só após esta etapa é que é iniciado um novo ciclo de conversão, com a ADC a receber novamente o byte de controlo. A interface entre o ADC e o microcontrolador é um barramento SPI.

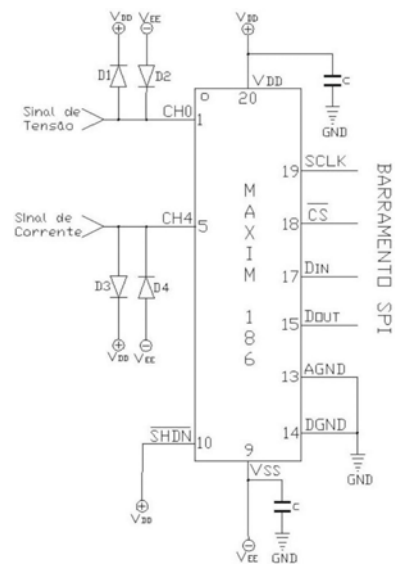


Fig. 6. Conversor analógico-digital

4.3- Módulo microcontrolador

Este módulo é composto por um controlador USB cuja função é fazer o interface com o computador e como o nome indica, é composto também por um microcontrolador, que executando o software desenvolvido para o efeito controla o ADC, guarda os dados que resultam da conversão e disponibiliza-os ao computador.

O software para o microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C recorrendo à ferramenta de desenvolvimento MPLAB IDE v8.00 da *Microchip*.

4.4- Software auxiliar

O elemento responsável pelo processamento dos sinais adquiridos é o computador. Nele, através do software apropriado, é implementada a interface entre a máquina e o utilizador, os sinais digitalizados são processados e analisados de acordo com a finalidade desejada. No sistema de aquisição de dados o computador é um componente de grande importância, pois deve permitir o processamento dos sinais digitalizados em tempo real. A linguagem de programação escolhida foi o Visual Basic .NET, os factores que mais pesaram na escolha desta linguagem de programação, foram o facto de se tratar de uma ferramenta de desenvolvimento de aplicações para Windows muito produtiva, fácil de aprender e bastante divulgada.

Este software tem como objectivos principais, dar ordem ao módulo microcontrolador para iniciar uma aquisição de dados a cada 2,5seg (este tempo pode ser alterado), determinar e apresentar no ecrã os valores de tensão, corrente, potência activa, factor de potência, factores de pico da tensão e da corrente e taxas de distorção harmónica. Na Figura 7 está apresentado um exemplo do ambiente gráfico criado.

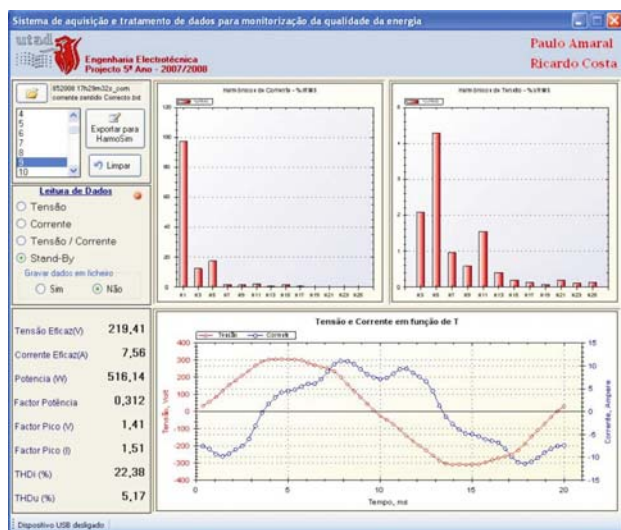


Fig. 7. O ambiente gráfico do programa

5. Resultados obtidos

Na generalidade dos ensaios efectuados, a diferença verificada entre os valores medidos no instrumento desenvolvido neste projecto e os instrumentos utilizados para comparação (*Dranetz Power Platform 4300*), é muito pouco significativa e vai de encontro ao esperado. Relativamente à análise de erros, estes tornam-se de difícil avaliação, uma vez que os aparelhos utilizados para comparação de valores, voltímetro, amperímetro e analisador de energia também apresentam erros nas suas medições.

O instrumento desenvolvido neste projecto é composto por vários componentes que introduzem uma percentagem de erro no resultado final da medição, são eles os próprios transdutores de tensão e corrente, as resistências e amplificadores operacionais dos

condicionadores de sinal e o erro de conversão do ADC. Todas estas fontes de erro revelam ser de difícil execução uma tentativa de cálculo do erro nas grandezas medidas.

5.1- Ensaio do motor de indução monofásico

O ensaio ao motor de indução consistiu em alimentar o motor em vazio através de um auto-transformador para permitir um arranque suave regulando assim a velocidade e a corrente. Com o analisador de energia *Power Platform 4300* foram medidas as grandezas de interesse para comparação com o instrumento desenvolvido neste trabalho. Obtendo-se os resultados apresentados na Tabela I.

Tabela I. – Comparação dos resultados obtidos

Grandeza medida	Dranetz PP 4300	Instrumento desenvolvido
U_{RMS}	196,49 V	196,13 V
I_{RMS}	5,44 A	5,46 A
THD da tensão	2,64%	2,69 %
THD da corrente	15,07%	14,90 %
Potência	380 W	369,63 W
Factor de potência	0,36	0,345

Na Figura 8 apresentam-se as formas de onda da tensão e corrente registadas pelo instrumento desenvolvido, enquanto a Figura 9 apresenta os espectros harmónicos correspondentes.

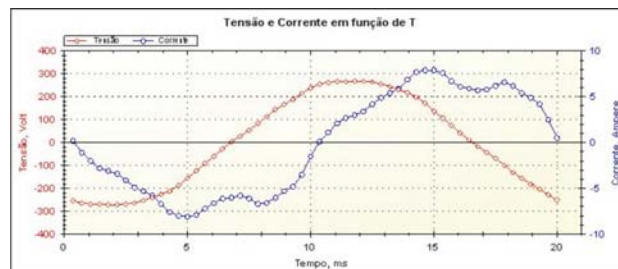


Fig. 8. Formas de onda registadas no ensaio do motor de indução em vazio.

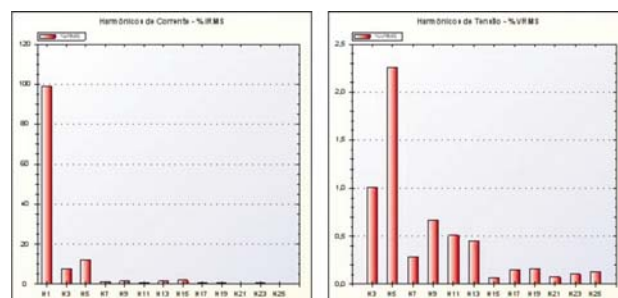


Fig. 9 Espectros harmónicos da tensão e corrente obtidos para o motor de indução em vazio.

Da análise feita aos resultados obtidos pelo instrumento desenvolvido pode concluir-se que estes são muito próximos dos registados pelo equipamento que serviu de termo de comparação, que se encontra devidamente calibrado e certificado para o efeito.

6. Conclusões

Acredita-se que este trabalho tenha contribuído para demonstrar que é possível implementar um sistema de monitorização de alguns parâmetros da qualidade da energia a um preço muito reduzido, comparativamente com os produtos idênticos disponíveis no mercado.

Apesar do reduzido número de ensaios realizados, pode-se concluir que este trabalho culminou num instrumento de boa precisão, como ficou demonstrado nos resultados apresentados e em outros ensaios que foram realizados ao longo da execução do trabalho.

Dois factores são considerados inovadores neste projecto comparativamente com outros do género, desenvolvidos no meio académico. São eles a ligação USB entre o Hardware de aquisição e o computador, o que torna a transferência de dados muito mais rápida, e a aplicação informática no computador, desenvolvida através do Visual Basic .Net o que torna o instrumento mais versátil, potenciando a introdução de novas funcionalidades através de uma ferramenta muito conhecida dos programadores.

Em termos de utilidade do instrumento, salienta-se a possibilidade que este oferece na obtenção de dados em tempo real do circuito em análise, dados esses que poderão ser utilizados no estudo da influência das harmónicas nas instalações eléctricas, potenciando a aplicação informática HarmoSim[®]. O instrumento permite ainda substituir em laboratório quatro instrumentos de medida, são eles o Amperímetro,

Voltímetro, Wattímetro e o medidor de factor de potência (fasímetro), neste caso com a vantagem de introduzir na medição do factor de potência a componente de distorção do sinal.

Referências

- [1] Baptista, José, “ Análise Harmónica em Instalações Eléctricas BT - HarmoSim - Uma ferramenta eficiente de simulação “, Tese de Doutoramento, Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, (2007).
- [2] Paiva, José, “Redes de Energia Eléctrica: uma análise sistémica”, IST Press, 2005
- [3] EN50160, Características da tensão fornecida pelas redes de distribuição pública de energia eléctrica." CENELEC, (1995).
- [4] Mohan, Undelan and Robbins, “Power Electronics”, John Wiley & Sons, 2003
- [5] Helfrick and Cooper, “Modern Electronic Instrumentation and Measurement Techniques”, Prentice Hall, 1990
- [6] Hayt, Kemmerly and Durbin, “Engineering Circuit Analysis”, McGraw-Hill, 2002
- [7] IEEE Std 519 “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems." Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, (1991).