



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-12  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII  
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE  
ENERGIA – GCQ**

### **ANÁLISE DE PROTOCOLOS DE MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA**

**Gustavo H.C. Oliveira \***  
PPGEPS / CCET / PUCPR  
Curitiba / PR

**Flávio Garcia**  
LACTEC  
Curitiba / PR

**Thiago P. Sanches**  
CCET / PUCPR  
Curitiba / PR

#### **RESUMO**

Este trabalho aborda o problema de qualidade de energia de sistemas elétricos de potência. Neste contexto, o estado da arte sobre medição de qualidade é apresentado e o impacto nos indicadores de protocolos de medição para a obtenção de janelas de curtíssima duração é discutido. Exemplos com dados coletados e processados em ambiente de software e hardware Matlab / Simulink / dSpace são utilizados.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Harmônicos, Protocolos, Séries de Fourier, Transformada de Fourier, Medição, Indicadores.

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Na área de sistemas elétricos de potência, o problema de qualidade de energia vem sendo discutido em todo o mundo. Neste sentido, grupos de trabalhos sobre qualidade apontam para a necessidade de indicadores confiáveis de qualidade de energia [1,2,3,4]. Os consumidores de energia elétrica, por sua vez, necessitam cada vez mais de um elevado grau de desempenho no fornecimento da energia elétrica por eles consumida devido à presença, cada vez maior, de cargas e equipamentos sensíveis à falta de qualidade de energia. Dentre os fenômenos normalmente relacionados com qualidade de energia estão o nível de harmônicos na rede, as variações momentâneas de tensão, desequilíbrios, etc [5]. A quantificação destes fenômenos permite determinar a qualidade da energia elétrica fornecida, fazendo com que ações preventivas ou mesmo corretivas possam ser tomadas para garantir uma operação adequada do sistema elétrico de potência. Para tanto, a medição e monitoração do sistema são necessárias e, neste contexto, oportunidades de aperfeiçoamento incluem a implantação das mais recentes tecnologias nas áreas

de instrumentação, supervisão e processamento de dados.

Dentro do âmbito da ANEEL/ONS as discussões relativas ao protocolo mínimo de medição a ser utilizado ainda estão em evidência tendo em vista a necessidade de se ter equipamentos diferentes apresentando, para uma dada medição, resultados iguais possíveis, portanto, de serem comparados aos padrões estabelecidos. Este trabalho, então, vem ao encontro à necessidade de se buscar um protocolo de medição mínimo, porém confiável.

Este artigo aborda o problema da qualidade de energia sob o ponto de vista de harmônicos na rede de distribuição elétrica. Para tanto, apresenta o estado da arte relativo ao problema de medição e obtenção de indicadores de qualidade. Um ambiente de medição e processamento digital de sinais foi desenvolvido em laboratório. O ambiente é formado por um hardware DSP da dSpace (<http://www.dspaceinc.com>) conectado à rede elétrica através de um transformador para condicionamento de sinais. As técnicas matemáticas utilizadas na análise de harmônicos são as Séries e as Transformadas em Tempo Discreto de Fourier [6]. Os protocolos de medição foram implementados baseado nas recomendações do grupo de qualidade de energia da ONS, basicamente, os relativos à obtenção de janelas de curtíssima duração [2].

Analisa-se a influência das características das técnicas de medição no índice final de qualidade de energia. Nesta última, 3 (três) metodologias de medição em nível de intervalos de medição curtíssima duração além de comparações realizadas entre Séries e Transformadas de Fourier são descritas.

Finalmente para avaliar as metodologias acima descritas na prática, foram utilizadas como cargas não-lineares para medição e, portanto, geradora de harmônicos, as lâmpadas econômicas compactas vendidas no mercado. Estas lâmpadas

\* Rua Imaculada Conceição, 1155 – Prado Velho - CEP 80215-901 - Curitiba - PR - BRASIL  
Tel.: (+41) 330-1330 - Fax: (+41) 330-1333 - E-MAIL: [gustavoc@rla01.pucpr.br](mailto:gustavoc@rla01.pucpr.br)

foram amplamente divulgadas no mercado e subsidiadas pelas concessionárias durante o período de radionamento pelo qual passou o sistema elétrico brasileiro. A análise da influência de cargas tipicamente associadas com residenciais e/ou escritórios no nível de harmônicos do sistema elétrico é também abordada em diversos trabalhos técnicos, por exemplo, [7], [8] e referências inclusas.

O artigo está organizado como apresentado a seguir. Na seção 2, o estado da arte do problema é apresentado. Na seção 3, o setup experimental de software e hardware é descrito. Nas seções 4 e 5, as análises dos protocolos com séries e transformadas de Fourier, respectivamente, são apresentadas e, finalmente, na seção 6, o artigo é concluído.

## 2.0 - ESTADO DA ARTE

No âmbito da ANEEL/ONS diversos trabalhos foram desenvolvidos nos últimos anos pelo Grupo de Qualidade de Energia (GQE), visando definir as linhas mestras dos indicadores de qualidade de energia a serem monitorados e controlados pelos diversos agentes do sistema elétrico brasileiro da rede básica (230 kV e acima). Neste trabalho estarão sendo contemplados os indicadores de qualidade referente aos harmônicos.

### 2.1 – Definições e Conceitos:

No contexto desse documento, são utilizados as seguintes definições e conceitos básicos:

- Tensão ou corrente fundamental ( $V_1$  ou  $I_1$ ) – valor eficaz do componente senoidal de 60 Hz da onda distorcida de tensão ou corrente;
- Tensão ou corrente harmônica de ordem h ( $V_h$  ou  $I_h$ ) – valor eficaz do componente senoidal de frequência (60.h)Hz da onda distorcida de tensão ou corrente;
- Distorção harmônica total (DHT) – consiste na raiz quadrada do somatório quadrático das tensões e correntes harmônicas de ordens 2 a 50, sendo o resultado dividido pela tensão fundamental medida e multiplicado por para ser expresso em porcentagem. Esse conceito procura quantificar o teor de poluição harmônica total existente em um determinado ponto do sistema;
- Níveis de compatibilidade – valores de tensões harmônicas e distorção harmônica total, especificadas para o sistema e que asseguram a operação correta para a maioria dos dispositivos ou equipamentos existentes na rede elétrica, promovendo a coordenação entre os equipamentos causadores e aqueles susceptíveis às distorções harmônicas.

Nas tensões mais baixas, os níveis de compatibilidade estão relacionados diretamente com a sensibilidade dos equipamentos. Para as tensões mais altas, esses limites não estão, em geral, associados diretamente à susceptibilidade dos equipamentos, servindo principalmente como um meio de coordenação entre os diferentes níveis de tensão do sistema, de modo a garantir o atendimento aos limites de distorções na baixa tensão;

- Pontos de entrega – ponto de conexão entre o sistema elétrico da concessionária e as

instalações de utilização de energia do consumidor;

- Limites globais – valores máximos estabelecidos para as tensões harmônicas e distorção harmônica total em qualquer barra do sistema elétrico, causadas pela operação conjunta de todos os consumidores e equipamentos da própria concessionária. Servem como uma garantia da qualidade da tensão fornecida aos consumidores.

Os limites globais devem ser entendidos como os níveis de compatibilidade do sistema e devem servir para orientar não apenas o relacionamento entre concessionárias e usuários, mas também os fabricantes de equipamentos elétricos em geral, no sentido de produzirem equipamentos com sensibilidade compatível com esses níveis.

- Níveis de saturação – valores convencionados de tensões harmônicas e distorção harmônica total, expressos em porcentagem dos limites globais. Representam as distorções pré-existentes em determinada barra e incorporam uma folga para permitir a evolução do sistema com a instalação de novas cargas especiais;
- Limites por consumidor – uma avaliação exata dos níveis globais de distorções harmônicas a serem atingidos após a entrada de uma nova carga especial exige o conhecimento das contribuições das demais cargas não-lineares existentes no sistema.

De modo a simplificar e viabilizar essa avaliação estabeleceu-se o conceito de limites por consumidor como sendo os valores máximos admissíveis para as tensões harmônicas e distorção harmônica total, provocadas no sistema elétrico da concessionária por um único consumidor. Esses limites por consumidor são derivados dos limites globais, considerando-se um nível de saturação existente na barra de ligação da nova carga especial.

### 2.2 - Responsabilidades:

O controle das distorções harmônicas nos sistemas elétricos é de interesse de todas as partes envolvidas. Para permitir uma convivência entre equipamentos causadores e equipamentos susceptíveis às distorções harmônicas é necessário que seja convencionado um nível de compatibilidade, com base na experiência adquirida, e que sejam bem definidas, a partir daí, as responsabilidades das partes envolvidas.

A limitação das distorções harmônicas é necessária tanto do ponto de vista das concessionárias como dos consumidores. A concessionária deve impor limites de forma a proteger os consumidores (tanto os causadores de distorções como os demais) contra danos ou perdas adicionais em seus equipamentos. Por outro lado, ela não pode garantir uma tensão de fornecimento completamente livre de distorções. Desse modo, os consumidores com cargas especiais devem manter as distorções causadas por seus equipamentos dentro dos limites estabelecidos e, ao mesmo tempo, compatibilizar os seus equipamentos susceptíveis com os limites globais de distorção.

### 2.3 - Formulações:

A proposta de indicadores de qualidade de energia quanto ao fenômeno de harmônicos definida no âmbito do grupo de QEE da ANEEL/ONS se refere apenas às tensões. As correntes harmônicas injetadas deverão ser tratadas caso a caso. A quantificação da presença de harmônicos numa rede elétrica será feita então com base na formulação a seguir:

- Dist. Harmônica Individual de Tensão:  $\frac{V_h}{V_1} \square 10\%$
- Dist. Harmônica Total de Tensão:  $\sqrt{\sum_{h=2}^{hm\acute{a}x} V_h^2} \square 10\%$

**2.4 – Proposta de Limites para Harmônicos:**

Os seguintes limites (ver Tabelas 1 e 2 [3,4]) de distorção de tensão, individual e total, estão sugeridos para os indicadores de harmônicos nos procedimentos de rede da ANEEL/ONS:

Tabela 1 – Limites globais de tensões harmônicas (expressos em porcentagem da tensão fundamental)

| V < 69KV       |   |       |   |
|----------------|---|-------|---|
| Ímpares        |   | Pares |   |
| Ordem          | % | Ordem | % |
| 3 a 7          | 5 | 2 a 6 | 2 |
| 9 a 13         | 3 | > 6   | 1 |
| 15 a 25        | 2 | -     | - |
| >25            | 1 | -     | - |
| DHT total = 6% |   |       |   |

Tabela 2 – Limites Individuais de tensões harmônicas por consumidor (expressos em porcentagem da tensão fundamental).

| V < 69KV       |     |       |     |
|----------------|-----|-------|-----|
| Ímpares        |     | Pares |     |
| Ordem          | %   | Ordem | %   |
| 3 a 25         | 1.5 | todas | 0.6 |
| > 25           | 0.7 |       |     |
| DHT total = 3% |     |       |     |

**2.5 – Protocolo Mínimo de Medição de Harmônicos sugerido:**

Mostra-se a seguir o protocolo mínimo sugerido para medição de tensões harmônicas nos barramentos da Rede Básica (ANEEL/ONS).

**2.5.1 – Definições:**

Seguindo as orientações de todas as normas/recomendações, sugere-se que a grandeza a ser monitorada seja a tensão. Em se tratando de sistemas trifásicos, que as medições sejam feitas na forma de tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para os demais. Quanto a componente harmônica máxima a ser considerada, recomenda-se a adoção da 50ª ordem (3000 Hz).

O instrumento de medição de harmônicos pode apresentar janelas de amostragem contínuas ou com intervalos sem medidas entre duas janelas de amostragem consecutivas. As janelas de amostragem deverão ser sincronizadas.

As estratégias deverão contemplar sinais elétricos de natureza quase-estacionária, fato este que permite o emprego de técnicas de amostragem com períodos de observação e períodos efetivos de medição distintos.

O modo de obtenção das tensões harmônicas de ordem **h** e da distorção harmônica total deve ser contínuo, podendo haver intervalos sem medidas entre janelas de amostragens consecutivas de amostragem. O intervalo sem medidas entre as janelas de amostragem não deve superar 60 segundos.

Deve ser adotado um período de observação mínimo de 1 semana completa (7 dias consecutivos). Neste sentido, conceituam-se os seguintes intervalos de medição:

- Tj (Tw) - Intervalo de janela ou janela de medição
- Tc (Tsh) - Intervalo de curta duração
- Td - Intervalo diário
- Ts (Twk) - Intervalo semanal

A Figura 1 [2] sintetiza graficamente os intervalos e correspondentes durações supramencionados. Nesta ilustração deve ser desconsiderado o intervalo de curtíssima duração (Tvs).

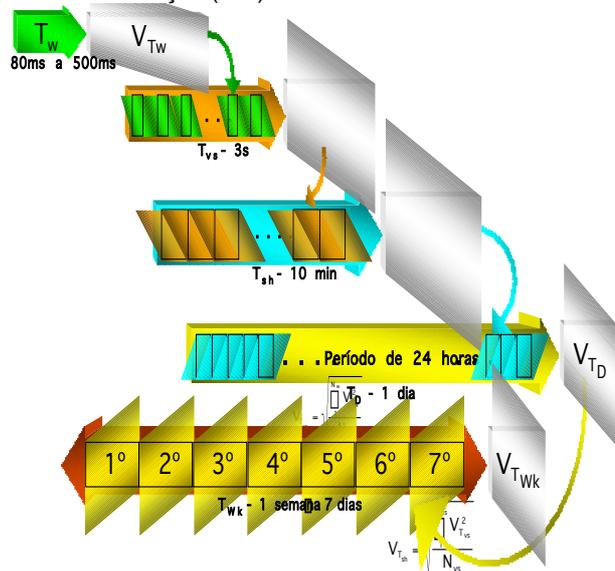


Figura 1 - Sistematização gráfica de um protocolo de medições

A definição de um protocolo mínimo de medição para harmônicos conduzir a estratégias de medição que proporcionem:

- A utilização de instrumentos de medição comercialmente disponíveis, com custos acessíveis e outras características desejáveis;
- A otimização dos recursos de armazenamento dos dados coletados;
- A bancos de dados compatíveis e representativos das mais diversas condições operacionais dos sistemas elétricos.

A Tabela 3 a seguir mostra o protocolo mínimo sugerido para medição/monitoramento de harmônicos.

Tabela 3 – Protocolo Mínimo de Medição:

| Parâmetro                            | Descrição                                | Valor  |
|--------------------------------------|--|--|
| 2.1 Taxa de amostragem               | Mínimo de 100 amostras por ciclo         |  |
| Largura da janela de amostragem (Tj) | Entre 100 e 500 ms (6 a 30 ciclos)       | Vh(Tj) - Valores harmônicos individuais no intervalo Tj.<br>DHT(Tj) – Distorção de Tensão Harmônica Total no intervalo Tj. |
| Intervalo de curta                   | Máximo de 10 minutos, com pelo menos 100 | Vh(Tcd) – Média quadrática dos valores Vh(Tcd) no  |

|  |   |  |
|--|---|--|
| <b>duração (Tc)</b>                              | amostras (Tcd).   | intervalo Tc.<br>DTHT(Tc) - Média quadrática dos valores DTHT(Tcd) no intervalo Tc.  |
| <b>Intervalo diário (Td)</b>                     | Um dia, compreendendo o período entre 00:00 e 24:00. Caso o valor de Tcd igual a 10 minutos serão 144 amostras. | Vh(Td)95% – valor que foi superado em apenas 5% das amostras Vh(Tcd).<br>DTHT(Td)95% - valor que foi superado em apenas 5% das amostras DTHT(Tcd).     |
| <b>Intervalo total de medição - semanal (Ts)</b> | Pelo menos de 1 semana.   | O maior valor de Vh(Td)95% e DTHT(Td)95% obtido no intervalo total de medição não poderá ultrapassar os limites globais estabelecidos no submódulo 2.2 |

### 3.0 - SETUP EXPERIMENTAL DE HARDWARE E SOFTWARE

O ambiente de teste e análise de sinais elétricos utilizados está baseado nas plataformas de hardware dSpace e software Matlab / Simulink, brevemente descritas a seguir.

#### 3.1 Matlab / Simulink:

O Matlab (<http://www.mathworks.com>) consiste de um ambiente computacional de programação numérica para resolução de problemas de engenharia que requeriram resolução de equações diferenciais, cálculo polinomial, visualização gráfica, otimização, entre outros. Além das bibliotecas já disponíveis, sua estrutura de programação flexível permite a expansão do ambiente com a criação de novas bibliotecas para atender às necessidades do usuário. O Simulink é uma interface gráfica de apoio ao Matlab usuário que permite rodar rotinas através de uma programação visual baseada em blocos conectados entre si. Os dois ambientes são amplamente utilizados no meio acadêmico e, cada vez mais, vem apresentando penetração no meio empresarial relacionado com engenharia. No contexto de empresas relacionadas com sistemas de potência, como concessionárias de energia, a biblioteca Matlab / Simulink "Power Systems" desenvolvida no Canadá surgiu como um ambiente de programação e análise complementar ao já consagrado ATP e pretende auxiliar na resolução problemas que envolvam simulação de sistemas de energia.

#### 3.2 Ambiente dSpace:

O ambiente de processamento digital de sinais e instrumentação virtual está baseado no hardware dSpace (<http://www.dspaceinc.com>). As bibliotecas e drivers presentes no sistema dSpace permitem a interface do meio externo com o ambiente Matlab, tornando mais fácil à concepção de protótipos e a realização de testes. Assim, um projeto realizado em ambiente Simulink pode comunicar com o meio externo, enviando e recebendo dados em tempo real a uma taxa de amostragem especificada via software.

Uma biblioteca de programas e drivers permite que os sinais relevantes do sistema possam ser monitorados (instrumentação virtual) e armazenados em arquivos tipo '.mat' (formato compatível com a plataforma Matlab).

## 4.0 ANÁLISE USANDO SÉRIES DE FOURIER EM TEMPO DISCRETO

Inicialmente, a série de Fourier em tempo discreto é utilizada para a análise de harmônicos do sinal de tensão do sistema quando conectado a cargas não-lineares no contexto de janelas de curtíssima duração. Na seqüência, obtém-se um valor representativo da distorção harmônica total (DHT) a cada 3 segundos do sinal (intervalo de curtíssima duração).

A seleção do período de amostragem do sinal deve obedecer a um compromisso entre a capacidade de processamento (e armazenamento) do sistema de aquisição e a representatividade do sinal. Estes fatores geram, respectivamente, limites inferiores e superiores para o período de amostragem. Neste trabalho, o valor utilizado para o período de amostragem foi de 0.26 ms (equivalente a 64 amostras por ciclo) sendo, portanto, possível detectar harmônicos até a ordem de 30. Este limite foi considerado suficiente devido à ausência de ruídos ou interferências de alta frequência no sinal.

O caso sob análise é a medição da tensão na rede de distribuição elétrica na presença de cargas não-lineares, em particular, as lâmpadas compactas "econômicas" da marca Osram do Brasil (tipo Energy Saver Osram Dulux EL, 15W). Esta lâmpada possui o selo de qualidade do Inmetro. As medições foram feitas na rede estabilizada do Parque Tecnológico da PUCPR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná) e a carga era, portanto, representada por com 8 lâmpadas conectadas ao mesmo terminal. A Figura 2 contém o sinal de tensão do terminal da rede com carga.

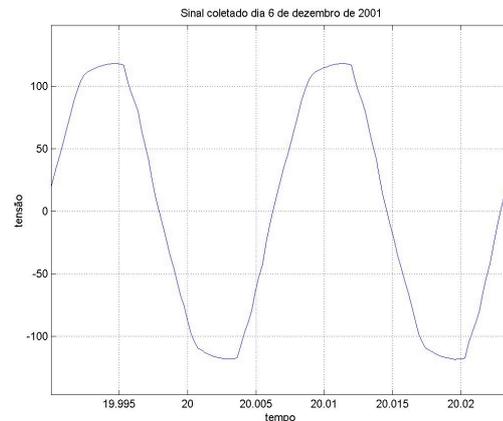


Figura 2 – Gráfico do sinal analisado (Volts)

O efeito da carga não linear na rede é ilustrado a seguir. A Figura 3 ilustra o nível de DHT (veja sessão 2.3) para o sinal de tensão com / sem carga. As duas medições foram feitas no mesmo dia, com um intervalo de 20 minutos entre si. Nota-se que a carga causou um aumento de aproximadamente 1% no índice DHT naquele ponto da rede. Nas duas situações, isto é, com/sem carga, o limite de consumidor individual de 3% (Tabela 1) é ultrapassado e, com carga, o limite global de 6% (Tabela 2) é quase atingido, isto devido a um único consumidor.

A Figura 4 ilustra a variação do índice DHT no momento exato em que a carga foi desconectada do terminal. Quando se compara as Figuras 3 e 4, nota-se que os níveis de DHT com / sem carga são diferentes. Isto é devido ao fato das medições terem sido feitas em dias diferentes (10 dias de diferença). Portanto,

efeitos relativos a outras cargas do sistema influenciaram nos valores absolutos dos resultados. Neste caso, a influência da carga está melhor caracterizada em aproximadamente 0.5%. A Figura 5 contém o espectro de harmônicos do sinal de tensão no terminal do sistema com carga (referente ao sinal cujo DHT foi ilustrado pela Figura 3). A distorção harmônica individual da 3ª e 5ª harmônicas foi de 4.17% e 3.03%, respectivamente. Estes valores estão fora das recomendações apresentadas na Tabela 2, que são de 1.5% para harmônicas ímpares. Através dos resultados ilustrados nas Figuras 3, 4 e 5, conclui-se que o efeito produzido pela inclusão de lâmpadas econômicas na rede é pequeno devido à sua pouca potência, entretanto estes resultados indicam o potencial de geração de harmônicos deste tipo de lâmpada quando utilizada em grande escala.

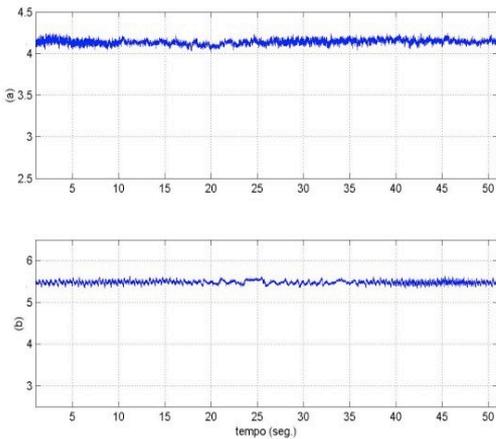


Figura 3 – DHT do sistema com carga (gráfico inferior) e sem carga (gráfico superior)

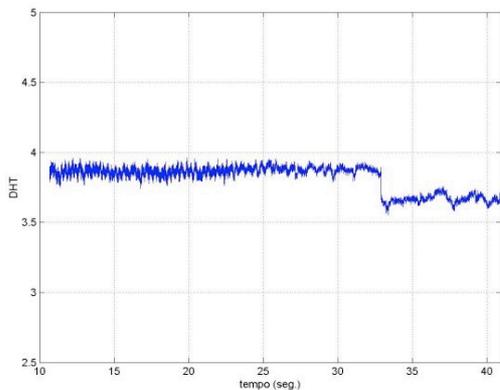


Figura 4 – DHT do sistema no momento em que a carga foi desconectada

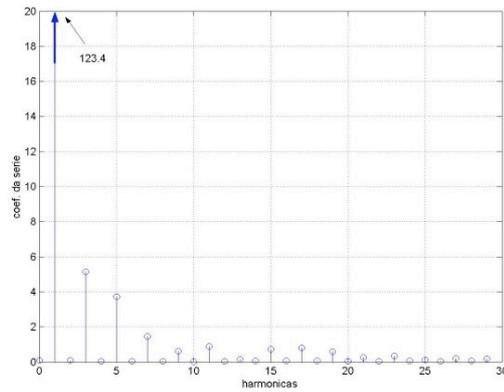


Figura 5 – Espectro de harmônicos do sinal de tensão com carga

Os resultados citados apresentam um valor para o DHT da rede a cada instante de amostragem. Este procedimento requer muita capacidade de armazenamento e a prática indica necessidade de se obter um valor do DHT representativo ao final de cada 3 segundos de medição, isto é, o intervalo de curtíssima duração, calculado em função da medição do DHT no contexto de janelas medição, conforme descrito na seção 2.5 e em [2].

Para se analisar o efeito da caracterização das janelas na medição da qualidade em nível de intervalos de curtíssima duração, a seguir, utiliza-se três métodos diferentes de medição do DHT, a saber: i) janela deslizante, ii) janela fixa e iii) janela única ao final de 3 segundos. As janelas consideradas são de 1/60 segs., isto é, 1 ciclo ou 1 período, que é o espaço de tempo necessário para o cálculo dos coeficientes da série de Fourier.

Por janela deslizante, entende-se que a cada instante de amostragem calcula-se um espectro de harmônicos referente à janela de tempo (1 ciclo) imediatamente anterior. A janela é deslocada ponto a ponto, que então “desliza”, abandonando a última amostra e incorporando à janela uma nova amostra. Por janela fixa, entende-se que a cada intervalo de tempo de uma janela calcula-se um espectro de harmônicos, ou seja, a janela é deslocada ciclo a ciclo. Por janela única, entende-se que, a cada 3 segs, calcula-se os coeficientes de Fourier referente à janela de tempo imediatamente anterior.

Há um decréscimo do esforço computacional e de armazenamento quando se substitui a janela deslizante por fixa ou fixa por única. A cada intervalo de 3 segundos, a rotina que calcula os coeficientes da série de Fourier é acionada 11520, 180 e 1 vez(es) para as janelas deslizantes, fixa e única, respectivamente (considerando 64 amostras por ciclo).

Aplicando cada um destes métodos no sinal da rede com carga e calculando-se a média quadrática durante a janela curta (de 3 segundos) obtêm-se os resultados ilustrados na Figura 6 (com carga) e 7 (sem carga). Nestas Figuras, nota-se que o valor do DHT ao final de 3 segundos varia em até 0.07% de acordo com o método utilizado no tratamento da janela de medição. Nota-se também que o valor do DHT total (janela deslizante) e o DHT total (janela fixa) estão próximos entre si, enquanto que o DHT total (janela única) apresenta resultados mais discrepantes.

## 5.0 ANÁLISE USANDO TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Nesta seção, a transformada rápida de Fourier (FFT) em tempo discreto é utilizada para a análise de harmônicos do sinal de tensão do sistema quando conectado a cargas não-lineares no contexto de janelas de curtíssima duração. Na seqüência, obtém-se um valor representativo da distorção harmônica total (DHT) no intervalo de curtíssima duração.

A metodologia de análise, incluindo o período de amostragem, é igual à descrita na seção anterior, com: i) janela deslizante, ii) janela fixa e iii) janela única ao final de 3 segundos. A janela utilizada aqui é, entretanto, maior que a considerada na seção anterior e é igual a 466.7 ms uma vez que a FFT não requer janelas de 1 período como a série de Fourier.

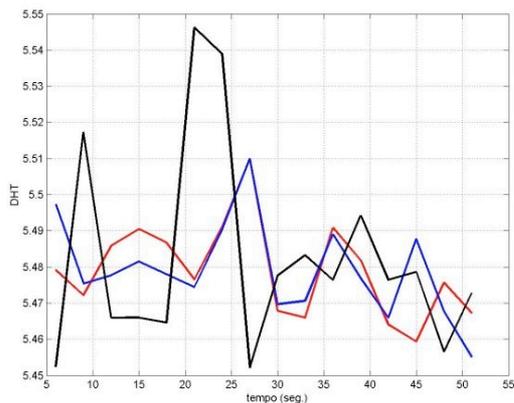


Figura 6 - DHT usando Série de Fourier (terminal com carga)

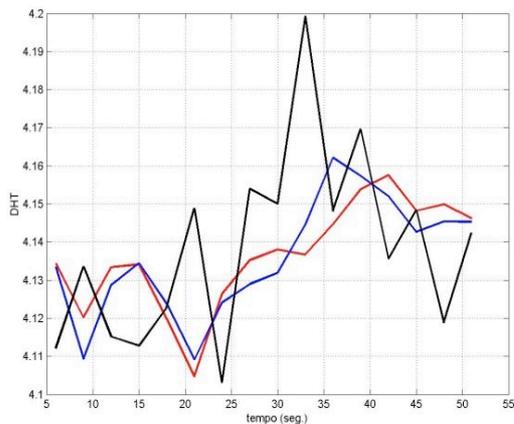


Figura 7 - DHT usando Série de Fourier (terminal sem carga).

Em preto, janela única; em azul, janela fixa; em vermelho, janela deslizante.

Aplicando cada um destes métodos no sinal da rede e calculando-se o DHT ao final de 3 segundos obtém-se os resultados ilustrados na Figura 8 (com carga) e 9 (sem carga). Nesta Figuras, nota-se que as diferenças entre os índices DHT em função da janela utilizada são menores que no caso da Série de Fourier.

O espectro de harmônicos análogo ao apresentado na Figura 5 também foi analisado usando a Transformada de Fourier. A distorção harmônica individual da 3a e 5a harmônicas foi de 4.16% e 2.96%, respectivamente, próximas, portanto, das obtidas usando séries de Fourier para o mesmo sinal.

## 6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho descreveu-se, em uma primeira parte, os principais aspectos referentes à análise de qualidade de energia de sistemas de energia elétrica. Em uma segunda parte, apresentou-se um ambiente de medição e processamento digital de sinais desenvolvido em laboratório. Usando Séries e Transformadas em Tempo Discreto de Fourier, analisou-se as características de 3 (três) metodologias de medição em nível de intervalos de curtíssima duração no índice final de qualidade de energia. Finalmente para avaliar as metodologias acima descritas, foram utilizadas lâmpadas econômicas compactas como cargas não-lineares para medição. Notou-se uma diferença de até 0.1% de acordo com o método utilizado. Como trabalhos futuros, a comparação entre as metodologias apresentadas

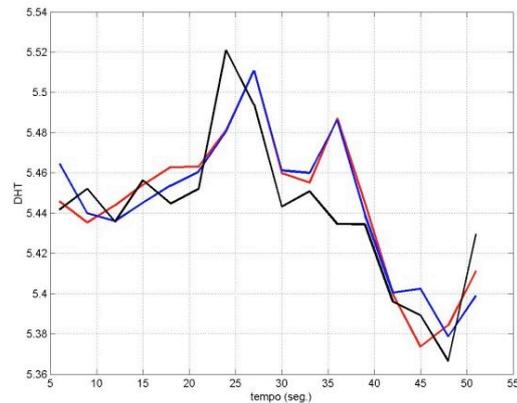


Figura 8 - DHT usando Transf de Fourier (terminal com carga)

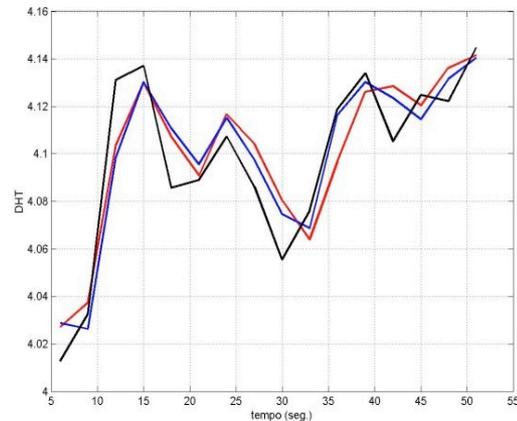


Figura 9 - DHT usando Transf de Fourier (terminal sem carga)

deverá ser estendida com a escolha de outros pontos de análise do sistema e/ou utilização de cargas não-lineares com geração aleatória de harmônicos como, por exemplo, máquinas de solda.

## 7.0 - REFERÊNCIAS

- (1) *Harmônicos e Desequilíbrios Nas Redes Elétricas: Relatório Parcial 2: O Estado da Arte.* Universidade Federal de Uberlândia / ANNEL / ONS – QEE
- (2) *Harmônicos e Desequilíbrios Nas Redes Elétricas: Relatório Parcial 3: Protocolos de Medição.* Universidade Federal de Uberlândia/ANNEL/ONS – QEE

- (3) Padrões de Desempenho da Rede Básica. Submódulo 2.2; Procedimento de Rede-ONS-2002
- (4) Requisitos Técnicos de Conexão à Rede Básica. Submódulo 3.8; Procedimento de Rede-ONS 2002.
- (5) HEYDT, T., *Electric Power Quality: A Tutorial Introduction*. IEEE Computer Applications in Power, Jan. 1998.
- (6) OPPENHEIM, A. V.; Schafer, R. W.; Discrete-Time Signal Processing, Ed. Prentice Hall, 1989.
- (7) TEXEIRA, M. D.; OLIVEIRA, J. C.; MEDEIROS, C. A. G., OLIVEIRA, TEXEIRA, G. S. *Uma reflexão sobre os impactos de diferentes dispositivos para iluminação fluorescente na qualidade da energia elétrica*. XIV CBA, Setembro, 2002, pp 1725-1730.
- (8) SANTOS, E. B., ALVES, A. C. B., JÚNIOR, G. M. M., MEDEIROS, C. A. G. *Harmônicas provocadas por cargas de instalações elétricas residenciais em sistemas e distribuição de energética*. XIV CBA, setembro, 2002, pp 323-328.