

**ESCOLA POLITÉCNICA  
DA  
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ENERGIA E  
AUTOMAÇÃO ELÉTRICAS**



**PROJETO DE FORMATURA / 2008**

**ANÁLISE ESTATÍSTICA de QUALIDADE de  
ENERGIA e APLICAÇÃO de um NOVO INDICADOR de  
QUALIDADE**

ALUNOS: Paulo Franco Lippi de Abreu

Peng Chen Pin

ORIENTADOR: Nelson Kagan

COORDENADOR: Luiz Cláudio Ribeiro Galvão

## **Dedicatórias e Agradecimentos**

- ❖ Ao Prof. Dr. Nelson Kagan, por toda atenção e orientação que permitiu o desenvolvimento do trabalho;
- ❖ Ao Dr. Sílvio Xavier Duarte, por nos permitir basear em sua tese, e também toda abertura e auxílio prestado;
- ❖ Ao Tiago Poles de Souza, Fernando Rodrigo Rago e demais colegas, pela valiosa ajuda e apoio que sempre nos deram;
- ❖ Ao Enerq, pelo suporte e compreensão que permitiu a realização do trabalho;
- ❖ Aos familiares e amigos, por todo suporte e apoio que nos permitiu chegar tão longe.

## **Resumo**

Este projeto consiste como um trabalho ulterior à Tese de Doutorado: "Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de distorções harmônicas e Desequilíbrios sobre motores de indução", de Sílvio Xavier Duarte, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, defendida em 2006. A partir do indicador proposto, este trabalho combina os parâmetros de desequilíbrio e distorções harmônicas em um só, para criar uma aplicação consistente, a qual pode ser posteriormente refinada ou até mesmo incorporada a medidores de qualidade de energia elétrica para gerarem saídas que obedecem a essa linha de raciocínio. São discutidas as vantagens do uso desse indicador, justificando a criação de um programa de cálculo, com correspondentes algoritmos. Também é apresentado um estudo estatístico da rede de um certo período amostrado baseado nesta aplicação.

## **Abstract**

This project consists in na extension of the work developed in the Thesis: "Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de distorções harmônicas e Desequilíbrios sobre motores de indução", from Sílvio Xavier Duarte, presented to Escola Politécnica da Universidade de São Paulo in 2006. Considering this parameter, which combines parameters of voltage unbalance and harmonics distortions in one, this work creates a consistent application, which can be refined later or even incorporated to power quality meters, to generate outputs that obey this reasoning. It discusses the advantages of the use of this parameter, justifying the creation of a program that calculates the power quality index following specific algorithms. It also presents a statistical study of the power supply in a showed period based on this application.

# **ÍNDICE**

<b>1 - INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - Ponto de partida</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - Justificativa</b>	<b>2</b>
<b>2 - OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>3 - ANTECEDENTES E CONCEITOS</b>	<b>4</b>
<b>3.1 - Desequilíbrios</b>	<b>4</b>
<b>3.2 - Distorções Harmônicas</b>	<b>5</b>
<b>3.3 - Qualidade de Energia e Monitoração</b>	<b>5</b>
<b>3.4 - Limites Admissíveis de Tensão e Desequilíbrio</b>	<b>6</b>
<b>3.5 - Perda de Vida de Motores devido a Distúrbios na Tensão</b>	<b>7</b>
<b>3.6 - Sobre a tese</b>	<b>9</b>
<b>3.6.1 - O Indicador</b>	<b>10</b>
<b>3.6.2 - Eixos DQ</b>	<b>12</b>
<b>3.6.3 - Norma Euclidiana Instantânea (NEI)</b>	<b>12</b>
<b>3.7 - Algoritmo para cálculo dos parâmetros de qualidade</b>	<b>15</b>
<b>3.8 - Constantes de Ponderação (<math>k_1</math>) e (<math>k_h</math>)</b>	<b>18</b>
<b>4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DO INDICADOR</b>	<b>20</b>
<b>5 - PROPOSTA</b>	<b>25</b>
<b>5.1 - Análise Estatística</b>	<b>25</b>
<b>5.1.1 - Ensaio</b>	<b>25</b>
<b>5.1.2 - Exemplo de Análise dos Dados</b>	<b>26</b>
<b>5.1.3 - O Medidor</b>	<b>28</b>
<b>5.1.4 - Requisitos do Software</b>	<b>30</b>
<b>6 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO</b>	<b>31</b>
<b>6.1 - Preparativos</b>	<b>31</b>

<b>6.2 - Medições</b>	<b>32</b>
<b>6.2.1 - Local</b>	<b>32</b>
<b>6.2.2 - Dificuldades iniciais e soluções adotadas</b>	<b>32</b>
<b>6.3 - Medições em outros locais</b>	<b>34</b>
<b>6.3.1 - Dificuldades</b>	<b>34</b>
<b>6.4 - Software de captura e cálculo dos indicadores</b>	<b>35</b>
<b>6.4.1 - Dificuldades iniciais e soluções adotadas</b>	<b>35</b>
<b>6.4.2 - Sobre o software</b>	<b>36</b>
<b>6.4.3 - Estrutura do Software</b>	<b>36</b>
<b>6.4.3.1 - Reconstrução do Sinal Original</b>	<b>37</b>
<b>6.4.3.2 - Entradas, Saídas e Limitações</b>	<b>38</b>
<b>6.4.3.3 - Código Fonte e Exemplo de dados de entrada.</b>	<b>38</b>
<b>7 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIÇÕES</b>	<b>39</b>
<b>7.1 - Análise da qualidade durante o dia.</b>	<b>39</b>
<b>7.1.1 - Fator de Desequilíbrio FD<sub>U</sub>(%)</b>	<b>39</b>
<b>7.1.2 - Fator de Distorções Harmônicas FH<sub>U</sub>(%)</b>	<b>40</b>
<b>7.1.3 - Fator de Qualidade de Energia FQu(%)</b>	<b>41</b>
<b>7.2 - Análise de dias completos</b>	<b>42</b>
<b>7.3 - Análise estatística da qualidade global</b>	<b>44</b>
<b>7.3.1 - Análise de dias isolados – Segunda Feira</b>	<b>47</b>
<b>7.3.2 - Análise de Dias Isolados – Terça Feira</b>	<b>48</b>
<b>7.3.3 - Análise de dias Isolados – Quarta Feira</b>	<b>50</b>
<b>7.3.4 - Análise de dias Isolados – Quinta Feira</b>	<b>51</b>
<b>7.3.5 - Análise de dias Isolados – Sexta Feira</b>	<b>53</b>
<b>7.3.6 - Análise de Dias Isolados – Sábado</b>	<b>54</b>
<b>7.3.7 - Análise de Dias Isolados – Domingo</b>	<b>56</b>
<b>8 - Conclusão</b>	<b>58</b>
<b>9 - BIBLIOGRAFIA</b>	<b>60</b>

## **Índice das figuras**

<b>Figura 3-1: Diagrama de blocos (NEI)</b>	<b>15</b>
<b>Figura 3-2: Elevação de temperatura em função de FDu</b>	<b>18</b>
<b>Figura 3-3: Elevação de temperatura em função de FHu</b>	<b>19</b>
<b>Figura 4-1: Sinal Arbitrário de tensão</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4-2: Componente Fundamental do Sinal arbitrário</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4-3: Terceira Harmônica do Sinal Arbitrário</b>	<b>21</b>
<b>Figura 4-4: Quinta Harmônica do Sinal Arbitrário</b>	<b>22</b>
<b>Figura 4-5: NEI para o sinal completo.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4-6: NEI, levando em conta apenas a fundamental.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4-7: nei<sub>h</sub>, referente apenas à parcela das harmônicas</b>	<b>23</b>
<b>Figura 5-1: Histograma de Freqüências de FQu</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5-2: Histograma de Freqüências acumuladas de FQu</b>	<b>27</b>
<b>Figura 5-3: foto do medidor Arbiter</b>	<b>28</b>
<b>Figura 5-4: Janela Principal do PSCSV Software</b>	<b>29</b>
<b>Figura 5-5: Tela de Captação de Dados do PSCSV Software</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7-1 – Histograma diário de FDu(%)</b>	<b>39</b>
<b>Figura 7-2 – Histograma de FHu(%)</b>	<b>40</b>
<b>Figura 7-3 – Histograma do fator que qualidade (FQu)</b>	<b>41</b>
<b>Figura 7-4 – Histograma do FDu diário</b>	<b>42</b>
<b>Figura 7-5 – Histograma do FHu diário</b>	<b>43</b>
<b>Figura 7-6 – Histograma do FQu diário</b>	<b>43</b>
<b>Figura 7-7 – Valores médios Diários dos indicadores</b>	<b>44</b>
<b>Figura 7-8 – Histograma de Freqüências de FQu</b>	<b>45</b>
<b>Figura 7-9 – Histograma de freqüências acumuladas de FQu</b>	<b>46</b>

<b>Figura 7-10 - Histograma de freqüência de FQu (2<sup>a</sup> feira)</b>	<b>47</b>
<b>Figura 7-11 Histograma de freqüências acumuladas (2<sup>a</sup> feira)</b>	<b>48</b>
<b>Figura 7-12 – Histograma de freqüências de FQu (3<sup>a</sup> feira)</b>	<b>49</b>
<b>Figura 7-13 – Histograma de Freqüências acumuladas (3<sup>a</sup> feira)</b>	<b>49</b>
<b>Figura 7-14 – Histograma de Freqüências de FQu (4<sup>a</sup> feira)</b>	<b>50</b>
<b>Figura 7-15 – Histograma de freqüências acumuladas (4<sup>a</sup> feira)</b>	<b>51</b>
<b>Figura 7-16 – Histograma de freqüências de FQu (5<sup>a</sup> feira)</b>	<b>52</b>
<b>Figura 7-17 – Histograma de freqüências acumuladas (5<sup>a</sup> feira)</b>	<b>52</b>
<b>Figura 7-18 – Histograma de freqüências de FQu (6<sup>a</sup> feira)</b>	<b>53</b>
<b>Figura 7-19 – Histograma de freqüências acumuladas (6<sup>a</sup> feira)</b>	<b>53</b>
<b>Figura 7-20 – Histograma de freqüências de FQu (sábado)</b>	<b>54</b>
<b>Figura 7-21 – Histograma de freqüências acumuladas (sábado)</b>	<b>55</b>
<b>Figura 7-22 – Histograma de freqüências de FQu (domingo)</b>	<b>56</b>
<b>Figura 7-23 – Histograma de freqüências acumuladas (domingo)</b>	<b>57</b>

# **1 - INTRODUÇÃO**

## **1.1 - Ponto de partida**

Partindo da tese de Doutorado: “Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de distorções harmônicas e Desequilíbrios sobre motores de indução” de Silvio Xavier Duarte [1], que propôs um novo indicador capaz de medir o impacto total gerado pela distorção harmônica e desequilíbrios de tensão num dado sistema, este trabalho possibilita uma visão facilitada do sistema, podendo observar o impacto em qualidade de energia num único indicador, oferecendo um melhor critério para análise dos fenômenos considerados.

Nos últimos anos, tem-se observado no Brasil e no mundo um aumento expressivo do interesse de órgãos reguladores, concessionárias e consumidores pelo conhecimento da qualidade da energia elétrica, tanto no aspecto de serviço (continuidade e confiabilidade) quanto no produto (distorções, desequilíbrios, etc.). Após a criação da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), juntamente com os órgãos reguladores estaduais, foi intensificada a busca por procedimentos e medidas que ajudem a garantir os direitos do consumidor através da melhoria da qualidade do serviço e produto além de auxiliar na preservação dos sistemas elétricos e de fornecimento de energia.

## **1.2 - Justificativa**

A Qualidade de energia elétrica é muito importante para a vida útil dos aparelhos. Em certos casos, uma tensão desequilibrada poderia reduzir sensivelmente o tempo que uma máquina seria capaz de operar.

Quando as tensões são desequilibradas, pode-se realizar uma decomposição em parcelas de seqüência direta, seqüência inversa e seqüência zero, mas apenas a tensão de seqüência direta realmente aciona o motor, a seqüência inversa contribui para a geração de calor que aumenta a temperatura da máquina como um todo, podendo reduzir consideravelmente sua vida útil.

Quanto às distorções harmônicas, presentes, por exemplo, na tensão de alimentação de um motor de indução, podem provocar alterações em seu torque eletromagnético e na sua corrente de alimentação, afetando seu comportamento elétrico. Alguns exemplos seriam variações no seu escorregamento e no seu fator de potência.

Uma análise estatística da qualidade de energia de um dado local poderia ajudar a dimensionar corretamente as máquinas que ali operam. E para isto é necessário obter uma metodologia correta e que leve em conta os indicadores e métodos adequados.

## **2 - OBJETIVOS**

O projeto visa gerar uma base confiável de dados de qualidade de energia elétrica na Escola Politécnica, bem como a confecção de um software capaz de calcular com precisão o indicador desenvolvido na tese da referência [1].

Assim, através de algumas tomadas de medições da rede, juntamente com o programa finalizado, será efetuada uma análise estatística sobre os comportamentos da rede ao longo do período amostrado.

### **3 - ANTECEDENTES E CONCEITOS**

Pode-se definir que uma rede tem qualidade máxima quando não ocorre nenhuma interrupção ao longo do tempo e os sinais são perfeitamente senoidais e de mesma amplitude e freqüência, porém, defasados de 120º entre fases.

Os fenômenos estudados neste trabalho têm relação principalmente com distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão na rede. Os fenômenos estudados possuem relação, principalmente, com a qualidade do produto e não do serviço, ou seja, o estudo da continuidade do fornecimento sai do escopo do projeto que será mais atento à forma de onda dos sinais observados.

#### **3.1 - Desequilíbrios**

Desequilíbrio de tensão é presente quando dá diferença entre a magnitude das tensões de fase de circuitos polifásicos bem como das diferenças existentes entre as defasagens entre as tensões. Na rede de distribuição podem ocorrer desequilíbrios de naturezas distintas:

- A assimetria da rede, gerada pelos tipos de transformadores de distribuição utilizados. Assim, mesmo que a carga seja perfeitamente equilibrada (desequilíbrio de corrente nulo), serão detectados níveis de desequilíbrio de tensão.

- A natureza da carga, da forma como os consumidores estão conectados nas fases e neutro da rede de distribuição e com os diferentes níveis de corrente que absorvem em cada instante de tempo da curva de carga diária.

### **3.2 - Distorções Harmônicas**

As distorções harmônicas são geralmente provenientes de cargas não lineares (injeção de correntes distorcidas) que, diferentemente dos transitórios de corrente e tensão, estão presentes de forma contínua, associadas ao crescente número de acionamentos estáticos (inversores de freqüência, variadores de velocidade, etc.), fontes chaveadas, e outros dispositivos eletrônicos de acionamento (lâmpadas eletrônicas, por exemplo).

As injeções de correntes por cargas não lineares provocam quedas de tensões sobre as impedâncias da rede nas diferentes freqüências harmônicas, provocando portanto distorções nas tensões de fornecimento.

### **3.3 - Qualidade de Energia e Monitoração**

No Brasil, a criação de índices de qualidades de energia adequados não é mais uma questão didática simples. Um forte exemplo disso é a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e das agências reguladoras estaduais. Trata-se de esforços para definir medidas e estabelecer procedimentos que

visam garantir os direitos dos consumidores, melhorando a qualidade do serviço e do produto, além de preservar os sistemas elétricos de fornecimento de energia.

Não é uma tarefa fácil, mas esses esforços são muito importantes, e há um aumento expressivo de interesses direcionados a eles, dos órgãos reguladores, das concessionárias de energia, dos centros de pesquisa e, principalmente, dos consumidores de energia elétrica.

Assim, a exigência de índices adequados de qualidade, por parte dos órgãos reguladores, cria condições para preservar e melhorar a qualidade do serviço e a qualidade do produto, e também do atendimento aos clientes.

### **3.4 - Limites Admissíveis de Tensão e Desequilíbrio**

A ANEEL já regulamentou alguns procedimentos para apuração de indicadores de continuidade de serviço e também quanto à amplitude da tensão eficaz de fornecimento. Para as variações de tensão de longa duração, a Agência reguladora estabeleceu, através da resolução 505/2001, os procedimentos e limites admissíveis para valores eficazes dos níveis de tensão.

Foram definidos limites que estabelecem faixas de valores nas quais as tensões das fases são consideradas como: adequadas, precárias e críticas, em valores inferiores e superiores. No nível de baixa tensão, os valores eficazes das tensões nas fases são

considerados adequados se estiverem dentro da faixa limite entre +5% e -8,5% da tensão nominal de referência. Essa é uma faixa bastante ampla (13,5%) de valores admissíveis das tensões nas fases.

Essa faixa tão ampla pode levar a situações inaceitáveis considerando a diferença de amplitude de tensão que pode ocorrer entre as tensões das fases de um sistema trifásico, ou seja, provocando desequilíbrios de tensão. Essas possíveis diferenças de amplitudes que podem ocorrer causam outro problema que é considerado sério, os desequilíbrios de correntes em cargas como motores trifásicos (entre outras cargas trifásicas sensíveis) que podem levá-los a danos irreversíveis [6].

Considerando os aspectos ressaltados anteriormente, justifica-se a necessidade de monitorar, além dos níveis de tensão das fases, os valores dos desequilíbrios de tensão ou desvios entre os valores das tensões das fases.

### **3.5 - Perda de Vida de Motores devido a Distúrbios na Tensão**

A vida útil de motores, transformadores, entre outros equipamentos, com certeza é uma das questões mais importantes a ser considerada. Diversos livros textos de máquinas elétricas [3], [6] e [8], as ressaltam. Conseqüentemente uma das mais importantes restrições é saber qual a máxima potência que pode ser entregue pelo equipamento. A elevação de temperatura de uma máquina depende das perdas desenvolvidas e da capacidade de dissipação

dessas perdas. Então qualquer distúrbio que aumente as perdas causa uma redução da potência de saída admissível da máquina considerada, a fim de que seja preservada sua vida útil.

Através de estudos e testes feitos na tese [1] foi concluído que a curva de elevação de temperatura obtida (motor mantida a plena carga) para os motores classe A aproxima-se de uma reta com coeficiente angular de 1,25 °C para cada aumento de 1% no grau de desequilíbrio de tensão. Já para os motores classe F esse coeficiente foi de 1,54 °C para cada aumento de 1% no valor do grau do desequilíbrio, sem mencionar sobre o aumento das perdas causadas pelas distorções harmônicas.

Assim, a análise das conclusões e a observação dos resultados obtidos pelos estudos [1] e [9], demonstrados na tese, se confirmam, e justificam a realização desse trabalho que propõe um algoritmo para avaliação do parâmetro de qualidade de tensão que refletia os efeitos térmicos sobre motores de indução devido à presença de distúrbios como desequilíbrios e distorções harmônicas na tensão agindo simultaneamente. Isso porque, na realidade, os motores estão sujeitos a condições de desequilíbrios e harmônicas, simultaneamente.

A partir dessas considerações, pode-se concluir que há necessidade desse trabalho de investigar melhor as condições de padrão de fornecimento de energia, ou seja, de se estabelecer e monitorar os padrões de qualidade de energia em relação aos desequilíbrios de tensão em condições distorcidas. Assim, a

proposta de um estudo e acompanhamento estatístico, apesar de ser apenas um primeiro passo, é justificável.

### **3.6 - Sobre a tese**

A Tese [1] apresenta uma “Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de Distorções Harmônicas e Desequilíbrios sobre Motores de Indução”. Como o próprio título sugere, a idéia desta Tese de Doutorado é definir um Indicador único, que possibilita analisar a Qualidade de Energia de certo ponto, a partir de ensaios sobre Motores de Indução e inúmeros estudos aplicados.

Novamente, este projeto de formatura visa aplicar esses indicadores, para levantar-se um estudo estatístico. A tese em si discute a necessidade de monitorar, além das tensões eficazes, os desequilíbrios de freqüência fundamental e as distorções harmônicas de tensão.

Como contribuição principal, o trabalho propõe obter um parâmetro de qualidade que combina os parâmetros de desequilíbrio e de distorção harmônica. A representatividade dos parâmetros de qualidade é analisada a partir de resultados de elevações de temperatura dos enrolamentos de um motor de indução obtidas de 60 horas de testes. Assim é apresentada uma forma alternativa para obter os parâmetros de desequilíbrios de freqüência fundamental e as distorções harmônicas a partir da

representação de valores instantâneos no sistema de eixos (DQ) e norma Euclidiana instantânea (NEI).

Discute-se também que uma das vantagens de obter esse parâmetro de qualidade de tensão é reduzir o número de parâmetros que devem ser monitorados, simplificando o processo de fiscalização que os órgãos reguladores procuram implantar. Além disso, o trabalho mostra análises sobre como os distúrbios na tensão afetam um motor de indução e prejudicam sua vida útil e mostra que há outras formas para se obter parâmetros de qualidade de tensão em relação aos métodos convencionais.

### 3.6.1 - O Indicador

Como bem observado na tese analisada, nota-se que as distorções harmônicas e os desequilíbrios de tensão causam aumento de temperatura nos motores e causam sua consequente degradação. Assim foi desenvolvido um indicador que é capaz de unir as contribuições das distorções harmônicas com a dos desequilíbrios de tensão fundamental. Este novo parâmetro, que mede as contribuições em conjunto foi chamado de FQu, calculado da seguinte forma:

$$FQu = k_1 FDu + k_h FHu \quad (3.1)$$

Onde:

-FQu é o parâmetro da qualidade de tensão obtido a partir da combinação dos parâmetros de qualidade de desequilíbrio de freqüência fundamental e de distorção harmônica total.

- $k_1$  é uma constante de ponderação que atribui o peso com que o desequilíbrio de tensão na freqüência fundamental deve ter na formação do parâmetro FQu

- $k_h$  é uma constante de ponderação que atribui o peso com que as distorções harmônicas devem contribuir na formação do parâmetro FQu.

-FDu é o parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão.

-FHu é o parâmetro que mede a distorção harmônica total.

Na tese proposta em [1] foram apresentados dois métodos para o cálculo dos indicadores: a partir dos eixos DQ e da NEI (Norma Euclidiana Instantânea). No seu trabalho, o autor demonstrou que os resultados de ambos eram equivalentes.

Será comentado brevemente o cálculo sobre os eixos DQ. Porém, para este trabalho a preferência é do algoritmo que faz uso da Norma Euclidiana Instantânea para realizar os cálculos, por um simples motivo: maior facilidade de implementação e, portanto, maior velocidade de processamento para aplicações futuras.

### **3.6.2 - Eixos DQ**

Trata-se de um sistema de representação das variáveis tomadas como uma combinação linear de dois vetores unitários defasados de 90° entre si, e que giram no sentido positivo de medição de ângulos (anti-horário), a uma freqüência igual a da rede, onde será exigido um circuito de sincronismo entre a freqüência de rotação do sistema de representação e a freqüência dos sinais da rede.

Há também a necessidade de se avaliar apenas duas variáveis para se obter uma análise das grandezas de um sistema trifásico de fornecimento, o que torna esse sistema de representação bastante simples.

Para maiores detalhes, na dissertação [11] há relatos sobre o assunto, e detalhamento de como se obter os valores no eixo DQ. Para outras informações, na própria tese [1] tem-se o cálculo muito bem explicado e referenciado.

### **3.6.3 - Norma Euclidiana Instantânea (NEI)**

Apresentado por S. M. Deckmann e E. F. Mafarão em [7], a NEI é uma forma de representação matemática que permite identificar diferentes parcelas de potência em quaisquer condições de desequilíbrios ou distorções na rede.

A grande vantagem deste método em relação ao método de decomposição em eixos DQ é a não necessidade de realizar qualquer decomposição do sinal e, além disso, há a possibilidade de obter o valor da NEI para qualquer número de fases.

Partindo dos resultados obtidos na tese [1], observa-se que com os dois métodos que foram obtidos resultados muito próximos. Por razão de simplicidade e velocidade de cálculo opta-se por utilizar a NEI.

A NEI pode ser definida para uma função genérica  $g(t)$  num instante  $t$  qualquer como:

$$\| [g] \| \stackrel{\Delta}{=} \sqrt{[g][g]} = \sqrt{g_1^2 + g_2^2 + \dots + g_n^2} \quad (3.2)$$

Ou, para uma função contínua:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [g(t)]^2 dt = \| [g(t_k)] \| ^2 = \| [g] \| ^2. \quad (3.3)$$

Deste modo, a Norma Instantânea pode ser descrita com:

$$\| [g] \| = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_k}^{t_k + \Delta t} [g(t)]^2 dt} = \| [g(t_k)] \| \quad (3.4)$$

A partir da aplicação de (3.4), nota-se que para um sinal trifásico perfeitamente equilibrado a NEI será uma constante. E

conforme distorções e desequilíbrios de tensão, a NEI transforma-se numa função periódica de amplitude e freqüência dependentes de valores de distorções observadas no sinal.

Mais adiante serão mostrados exemplos de cálculos para a NEI e os indicadores.

Utilizaremos, neste projeto, o algoritmo que faz uso da Norma Euclidiana Instantânea para realizar os cálculos, algoritmo este, apresentado a seguir:

### 3.7 - Algoritmo para cálculo dos parâmetros de qualidade

Os blocos do diagrama da Figura 3-1 ilustram o algoritmo:

1. filtro passa baixa (FPB) a fim de enquadrar os sinais ao critério de Nyquist,
2. filtro refeita faixa (FRF) sintonizado na freqüência fundamental,
3. comparador, usado para separar as componentes de freqüência fundamental das componentes harmônicas,
4. cálculo da NEI dos sinais de freqüência fundamental e de harmônicas,
5. cálculo dos parâmetros de qualidade de freqüência fundamental e de freqüências harmônicas,
6. cálculo do parâmetro de qualidade devido aos distúrbios combinados.

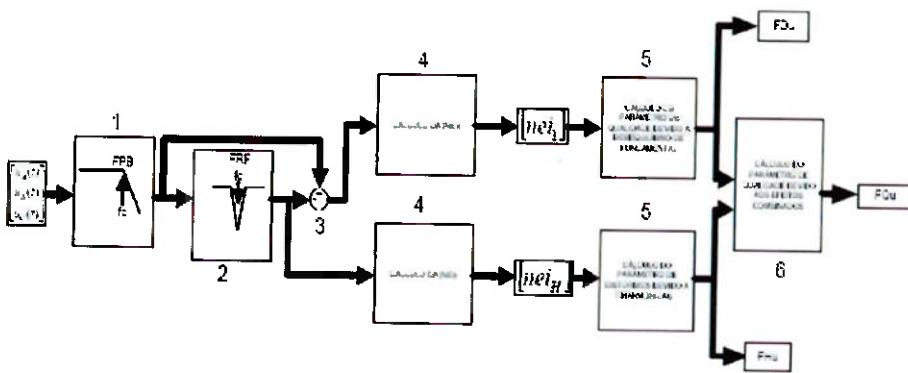


Figura 3-1: Diagrama de blocos (NEI)

A partir deste diagrama será obtido parâmetro de qualidade de desequilíbrio de tensão de freqüência fundamental, de freqüências harmônicas e parâmetro combinado a partir da NEI.

Do tratamento de sinais apresentado na figura 3-1, obtêm-se os sinais referentes à freqüência fundamental e os referentes às harmônicas. Para ambos, foi calculada a NEI.

As equações para obtenção de FD<sub>U</sub> e FH<sub>U</sub> são dadas a seguir:

Obtida a NEI da componente fundamental ( $nei_1$ ), sabe-se que para um ciclo de sinal de freqüência fundamental, a razão entre amplitude de modulação ( $nei_1$ ) e o seu valor médio corresponde ao parâmetro de desequilíbrio de freqüência fundamental (FD<sub>U</sub>)

$$FD_U(\%) = \frac{\max(nei_1) - \min(nei_1)}{\text{méd}(nei_1)} \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Onde:

-FD<sub>U</sub>(%) é o parâmetro de qualidade que indica o fator de desequilíbrio de tensão de freqüência fundamental obtido a partir da ( $nei_1$ )

- $\max(nei_1)$  é o valor máximo da amplitude da ( $nei_1$ ) obtida num período do sinal de freqüência fundamental.

- $\min(nei_1)$  é o valor mínimo da amplitude ( $nei_1$ ) obtida num período do sinal de freqüência fundamental.

- $\text{med}(nei_1)$  é o valor médio da amplitude da componente da ( $nei_1$ ) obtida num período do sinal de freqüência fundamental

Para a NEI obtida das componentes de freqüências harmônicas ( $nei_h$ ), pode-se obter um parâmetro que corresponde à distorção harmônica total do sinal ( $FHu$ ).

$$FHu(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(nei_{hi})^2}}{\frac{\text{med}(nei_h)}{\sqrt{2}}} \cdot 100\% \quad (3.3)$$

Onde:

- $FHu(\%)$  é o parâmetro de qualidade que indica o fator de distorção harmônica total a partir da ( $nei_h$ )

- $(nei_{hi})$  são os valores instantâneos do sinal da ( $nei_h$ ) correspondentes às tensões harmônicas.

### 3.8 - Constantes de Ponderação ( $k_1$ ) e ( $k_h$ )

Durante a elaboração da tese [1], foram realizadas mais de 60 horas de testes nos quais foram registrados temperaturas e valores instantâneos de tensões aplicadas e correntes absorvidas pelo motor.

A partir de todos os valores registrados, foram calculados os parâmetros de qualidade para todos os testes, e para cada um, os parâmetros ( $FD_u$  e  $FH_u$ ) foram relacionados com uma variação de temperatura. A partir destes pontos foi feita uma regressão linear, que resultou em retas cujos coeficientes angulares correspondem aos fatores de ponderação utilizados.

Os resultados obtidos podem ser observados nos gráficos a seguir:

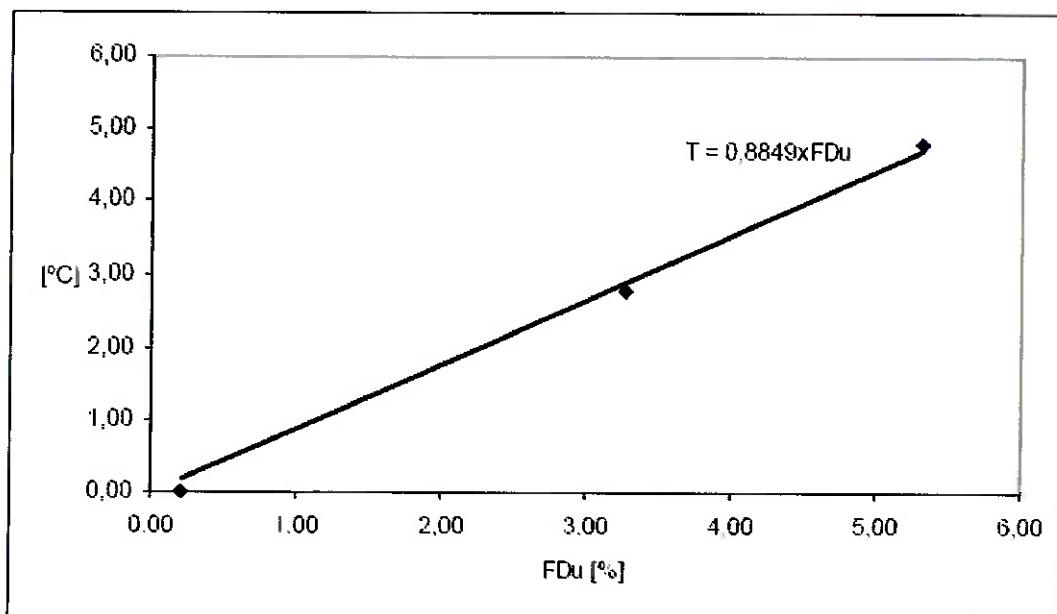


Figura 3-2: Elevação de temperatura em função de  $FD_u$

A Figura 3-2 apresenta a variação de temperatura em função do parâmetro FDu. Observa-se que a constante de ponderação vale aproximadamente  $k_1 = 90\%$ .

Para os valores obtidos em função do FHu, obteve-se a Figura 3-3.

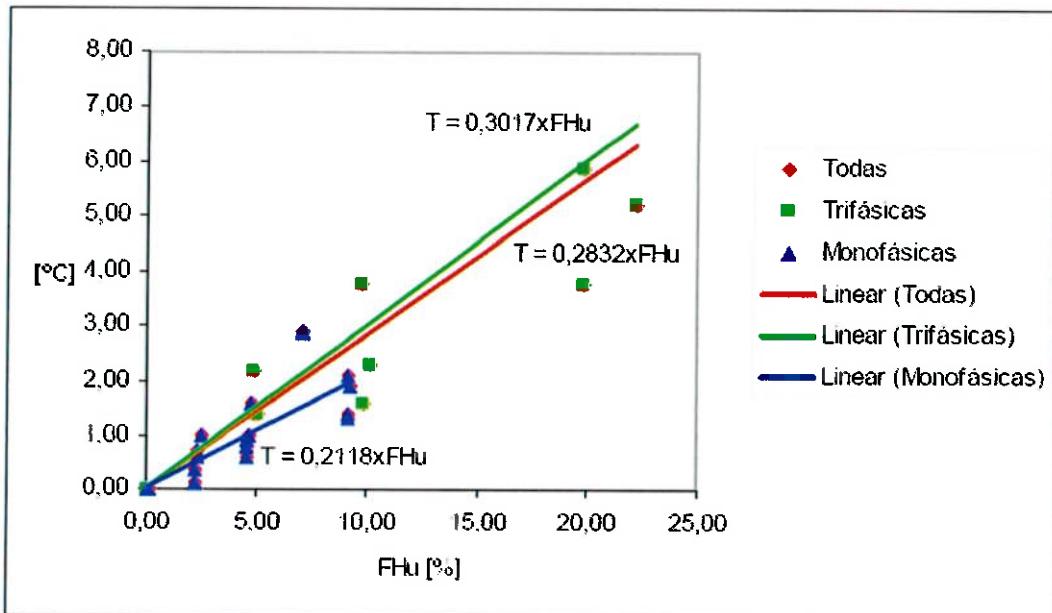


Figura 3-3: Elevação de temperatura em função de FHu

Na Figura 3-3 foram obtidos valores distintos de regressão em função dos pontos utilizados, se pontos correspondentes a harmônicas equilibradas (trifásicas), desequilibradas (monofásicas) e ao conjunto de todos os pontos. Sendo mais relevante o dado relativo à regressão por todos os pontos, será considerado  $k_h = 28\%$ .

Vale ressaltar que todos os dados obtidos em [1] são referentes a um motor de 1cv e não há garantia que eles sejam os

mesmo para motores de diferentes potências. Inicialmente, trabalha-se com a hipótese que estes dados são coerentes e realiza-se os testes de acordo com eles, mas um método para cálculo das constantes para motores com outras potências, ainda está em estudo.

#### **4 - EXEMPLO DE CÁLCULO DO INDICADOR**

Partindo de uma forma de onda arbitrária e gerada computacionalmente, será demonstrado passo a passo o método utilizado para o cálculo dos indicadores.

Foi escolhido o seguinte sinal:

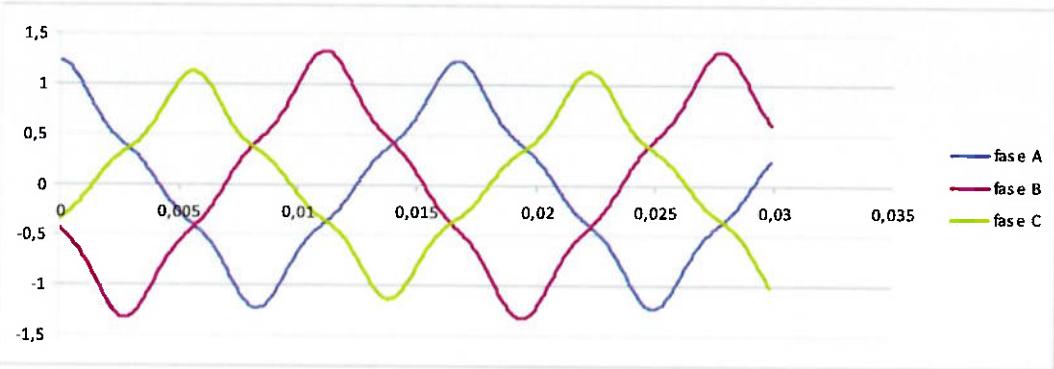
Trifásico, 1 pu, 60Hz, com desequilíbrio de magnitude nas fases:

$$V_a = 1,00 \text{ pu, fase } 0^\circ$$

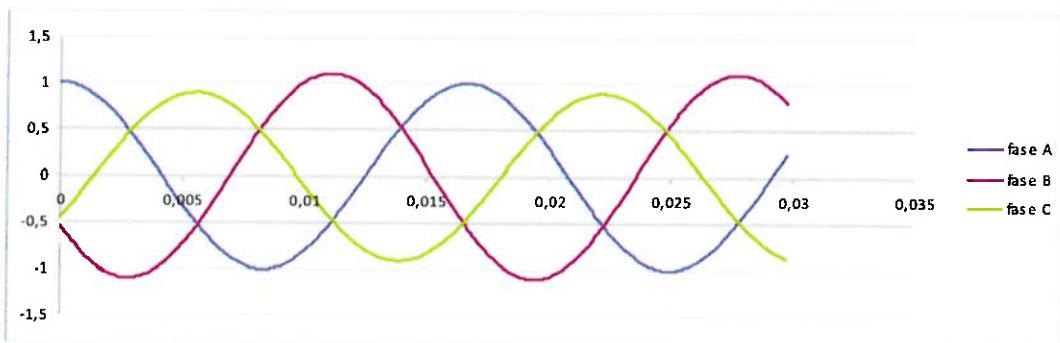
$$V_b = 1,10 \text{ pu, fase } +120^\circ$$

$$V_c = 0,9 \text{ pu, fase } -120^\circ$$

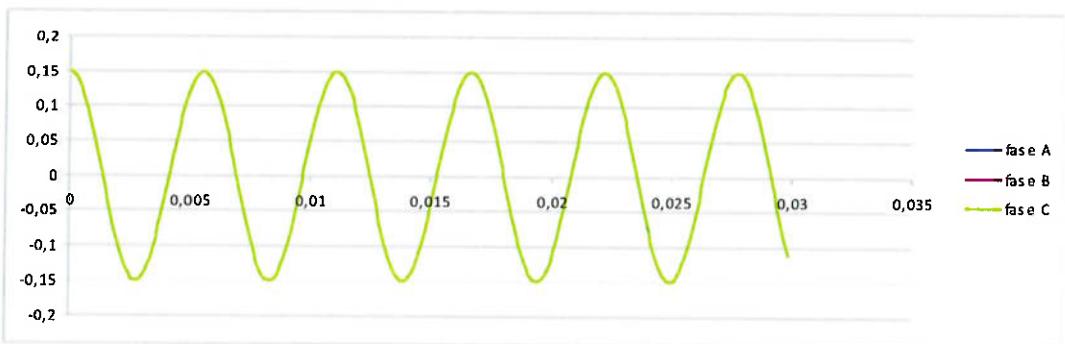
E com componentes de terceira e quinta harmônicas equilibradas, respectivamente em 0,15 pu e 0,08 pu representados nos gráficos das Figuras 4-1, 4-2, 4-3 e 4-4.



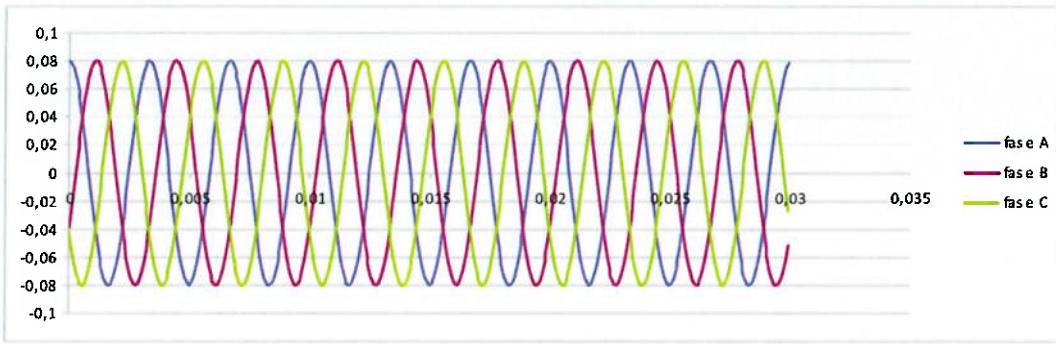
**Figura 4-1: Sinal Arbitrário de tensão**



**Figura 4-2: Componente Fundamental do Sinal arbitrário**



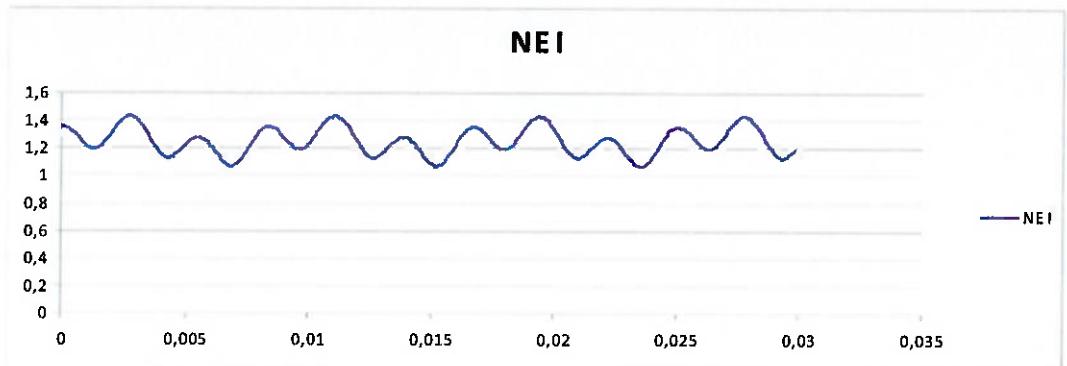
**Figura 4-3: Terceira Harmônica do Sinal Arbitrário**



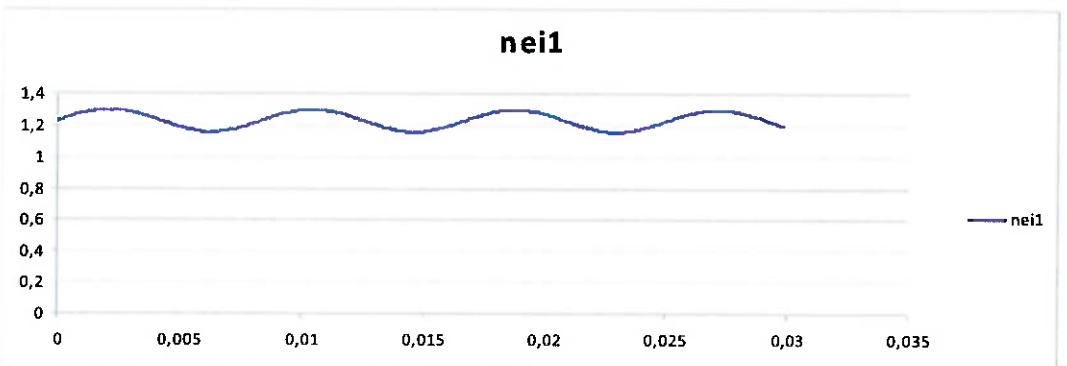
**Figura 4-4: Quinta Harmônica do Sinal Arbitrário**

Pode-se observar, da figura 4-3, que a terceira harmônica possui seqüência nula, ou seja, com as 3 tensões em fase. Da figura 4-4, observa-se que a quinta harmônica possui seqüência negativa, ou seja, com seqüência de fases contrária à seqüência da fundamental, a composição dos 3 últimos gráficos gera o primeiro.

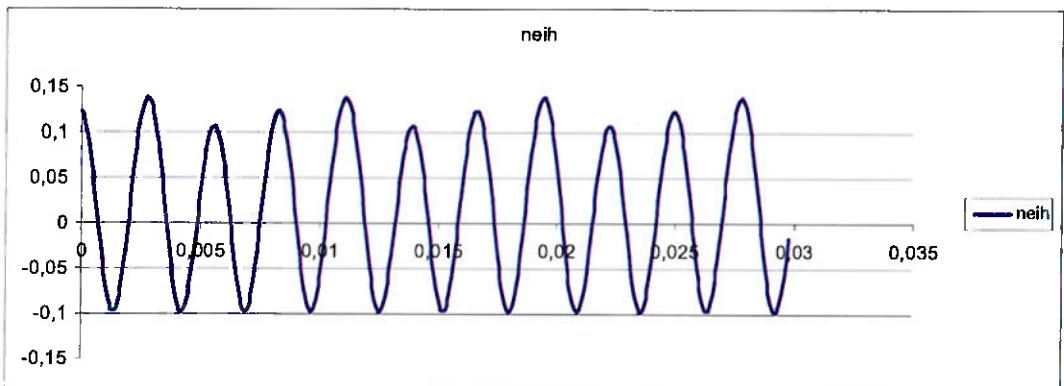
Tendo o sinal a ser estudado e os pontos amostrados já obtidos, pode-se utilizar a equação (3.2) para obter a NEI ponto a ponto para o sinal completo, para a fundamental e para as harmônicas, obtendo assim os valores de NEI,  $nei_1$ , e  $nei_h$ . Valores instantâneos podem ser plotados em gráficos, gerando as figuras 4-5, 4-6 e 4-7.



**Figura 4-5: NEI para o sinal completo.**



**Figura 4-6: NEI, levando em conta apenas a fundamental.**



**Figura 4-7:  $nei_h$  referente apenas à parcela das harmônicas**

onde  $NEI_h$  foi calculado como  $NEI_{total} - NEI_1$

De posse de todos os valores dos pontos a partir dos pontos amostrados inicialmente, pode-se aplicar finalmente as equações (3.5) e (3.6) para obter os valores de FD<sub>U</sub> e FH<sub>U</sub>.

Da aplicação de (3.5) tem-se FD<sub>U</sub> = 5,72%

Da aplicação de (3.6) tem-se FH<sub>U</sub> = 9,10%

Finalmente, utilizando os valores k<sub>1</sub> = 90% e k<sub>h</sub> = 28% pode-se aplicar a equação (4.1) e obter o valor de F<sub>Qu</sub>.

Da aplicação de (4.1) sai F<sub>Qu</sub> = 7,70%

## **5 - PROPOSTA**

### **5.1 - Análise Estatística**

O ponto principal do projeto tratou da aplicação do indicador FQu e seu estudo em pontos de carga adotando-se os coeficientes  $k_1$  e  $k_h$  para o motor de 1 cv.

#### **5.1.1 - Ensaio**

Para este estudo foi utilizado o medidor Arbiter Systems, modelo 1133A Power Sentinel [4]. Detalha-se mais sobre medidor a seguir.

Assim, foram efetuadas medições na entrada de energia do Enerq e do prédio da engenharia elétrica da USP. Estes ensaios visam obter o parâmetro FQu na entrada dos locais e obter um histograma de freqüências com dados de sua variação no tempo. A partir destes valores foi obtido o valor de FQu 95% em cada um destes locais, que é o valor de qualidade de energia que se tem garantido durante 95% do tempo.

Os ensaios duraram alguns dias (de 3 dias a uma semana) cada um, e os valores serão registrados a cada 10 minutos.

### 5.1.2 - Exemplo de Análise dos Dados

De posse dos dados do indicador FQu a cada 10 minutos, pode-se construir um histograma, conforme a distribuição de valores de FQu(%), apresentada na figura 5-1:

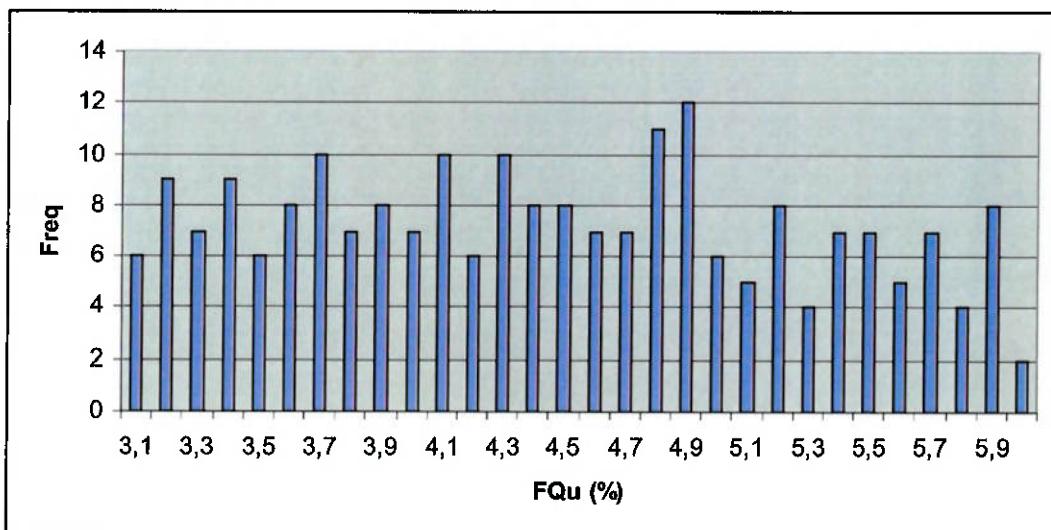


Figura 5-1: Histograma de Freqüências de FQu

O histograma mostra a quantidade de vezes (freqüência) que o valor de FQu calculado se encontra em intervalos de 0,1%; por exemplo 12 medições de FQu estavam entre 4,8% e 4,9%.

A partir do histograma obtido, pode-se calcular e obter o histograma de freqüências acumuladas conforme figura 5-2 que é um artifício importante no cálculo do FQu, este histograma mostra quantos são os dados que estão abaixo de um determinado valor.

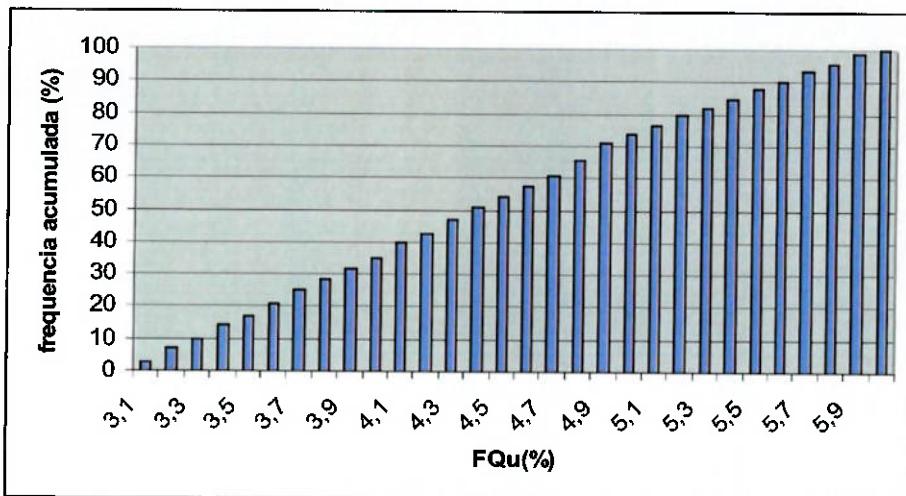


Figura 5-2: Histograma de Freqüências acumuladas de FQu

Deste histograma, obtém-se o valor de FQu garantido para 95% do tempo, o chamado FQu95% que no caso hipotético apresentado vale: FQu95% = 5,8%.

Este valor é muito importante na análise da qualidade de energia de um certo local, e é o número que deve ser monitorado e controlado de maneira a garantir melhor funcionamento de máquinas e outros aparelhos elétricos.

### **5.1.3 - O Medidor**

O medidor utilizado foi o Modelo 1133A Power Sentinel fabricado pela Arbiter Systems [4]. Segue uma foto do aparelho retirado do site do fabricante:



**Figura 5-3: foto do medidor Arbiter**

Trata-se de um medidor multifuncional, capaz de monitorar qualidade de energia, sincronizar através do sistema embutido de GPS (Global Positioning System), controle e monitoria do sistema e armazenar os logs dos dados e eventos obtidos.

Segundo o manual do fabricante, o medidor é capaz de armazenar dados instantâneos amostrados, fasores, valores RMS etc., e pode exportá-los como arquivos de computador que podem ser convertidos em arquivos de texto ou Excel.

Para isso, o fabricante disponibiliza um software próprio para o modelo mencionado, chamado PSCSV Software. “É necessário um programa próprio, pois os dados obtidos possuem uma extensa base de dados, no formato ”.1133d” (próprio da empresa), para tratar e analisar as informações obtidas. E somente através dessa, é possível transformar os resultados num formato mais amigável,

como por exemplo “.csv”, para trabalhar em diversos outros programas.

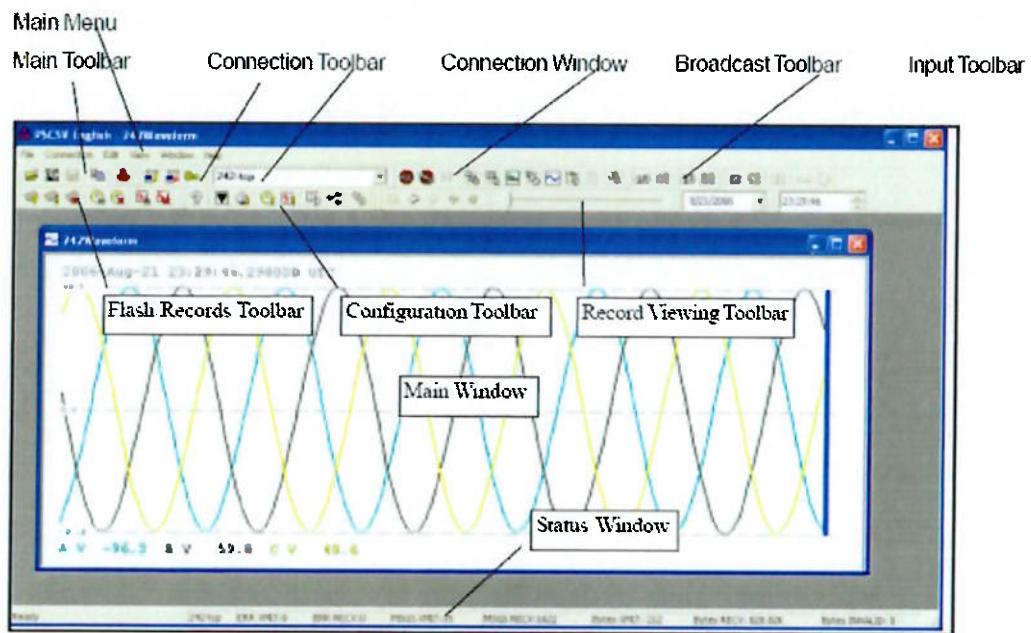


Figura 5-4: Janela Principal do PSCSV Software

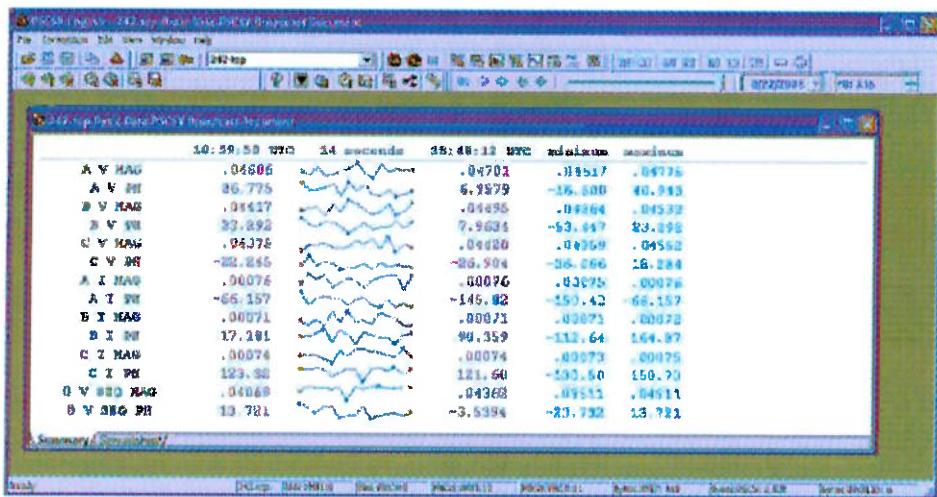


Figura 5-5: Tela de Captação de Dados do PSCSV Software

#### **5.1.4 - Requisitos do Software**

O software a ser desenvolvido deve ser capaz de calcular o valor de FQu para cada ponto relevante a partir dos dados fornecidos pelo medidor Arbiter e gravá-los de modo a gerar o histograma para o estudo estatístico em cada local.

Esta deverá usar um dos algoritmos apresentados, nesse caso a NEI, e gerar algum tipo de saída para poder fazer toda a análise estatística proposta.

## **6 - DESENVOLVIMENTO DO PROJETO**

Uma vez com a parte teórica estudada e finalizada, foi executada a segunda etapa do projeto, a parte prática. Para isso houve uma etapa de medições e uma da construção e programação do software.

### **6.1 - Preparativos**

Conforme já citado, o medidor utilizado foi o Modelo 1133A Power Sentinel fabricado pela Arbiter Systems [4]. O aparelho foi cedido gentilmente pelo Enerq, assim como o primeiro local para as medições: as instalações do próprio centro de estudos.

Em paralelo, com uma amostra genérica da saída do medidor, previamente obtida, foi iniciado outro pilar muito importante do projeto: o software. Este é capaz de ler as medições obtidas e calcular automaticamente os indicadores trabalhados nesse projeto.

Também houve a necessidade de uma definição do período a ser amostrado. Como se trata de um estudo estatístico do comportamento da rede, e dos reflexos das cargas, definiu-se amostrar o comportamento em uma semana, devido às variações nos horários e nos dias.

## **6.2 - Medições**

### **6.2.1 - Local**

A unidade do Enerq, Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia, localizado junto à Escola Politécnica da USP, é uma instalação com ótimo potencial para esse estudo estatístico. Esta possui computadores, aparelhos eletrodomésticos – inclusive os de cozinha – iluminações variadas, etc, todas ligando e desligando em horários não fixos.

### **6.2.2 - Dificuldades iniciais e soluções adotadas**

Uma das primeiras dificuldades encontradas foi a definição do ponto de coleta dos dados. Vale lembrar que seria necessário reservar um espaço para deixar o medidor por uma semana inteira (o prazo proposto para o estudo), além do fato de que esse ponto possa refletir o uso da rede da instalação como todo.

Assim, outro benefício proporcionado por ser um centro de estudos foi a facilidade de acesso a pontos que atendem a necessidade proposta. Uma vez definido o local, iniciou-se o processo de instalação e preparação do medidor.

Ao se configurar o medidor, foi optado capturar os valores dos fasores, e não instantâneos, devido ao simples fato do medidor não ter memória suficiente para armazenar tantos pontos em uma

semana. Outro problema que foi percebido somente apenas quando foi iniciada a medição, é o fato do medidor ler apenas em intervalos de 15 em 15 minutos para a leitura por evento, que é necessária neste caso pois é imperativo que os valores das fases dos sinais sejam guardados, mas com uma janela tão grande entre medições, muitas perturbações significativas poderiam ser deixadas de lado, reduzindo consideravelmente a precisão das medidas.

Assim, para se obter intervalos menores, seria necessário algum dispositivo para gerar disparos com uma freqüência maior, como por exemplo, um gerador de funções.

O gerador cedido pelo próprio Enerq contornaria o último quadro, porém foi encontrada outra dificuldade. A saída do gerador atinge no máximo uma escala de 10V (lembrando que trata-se de tensão CC), mas para o medidor reconhecer o sinal, deveria estar na faixa de, no mínimo, 20V.

Então, com o auxílio de uma placa também cedida pelo Enerq, que é capaz de operar como elevadora de tensão CC, foi possível obter o nível mínimo de 20V de pulso necessário para disparar o Trigger do medidor e finalmente as medições puderam ser iniciadas propriamente.

## **6.3 - Medições em outros locais**

Houve um instante em que foi cogitado se obter as medições em algum outro ponto ou instalação. Mas devido a dificuldades não houve nenhuma definição de um outro local. A idéia era conseguir através de uma medição extra para se comprovar os valores obtidos no primeiro instante, validando o algoritmo do software. Isso poderá ser considerado em trabalhos ulteriores.

### **6.3.1 - Dificuldades**

Uma das principais dificuldades de uma medição externa ao laboratório é o transporte e o espaço físico para todo o material como os medidores, o gerador de funções, o computador, etc, além de o local possuir certa privacidade e segurança. Assim, uma sugestão seria em algum lugar particular, como residências ou salas próprias.

Uma outra solução seria conseguir as medições a partir do mesmo local, através de uma outra metodologia. Na primeira, foram medidas em fasores. Nesse segundo instante, poderiam ser utilizado valores instantâneos.

## **6.4 - Software de captura e cálculo dos indicadores**

A idéia do programa surgiu devido à necessidade de automatizar e agilizar o processo para um estudo estatístico mais aprofundado.

### **6.4.1 - Dificuldades iniciais e soluções adotadas**

Com certeza, a primeira dificuldade foi na tomada de decisão sobre qual a linguagem a ser utilizada. Outro fator agravante era em relação aos dados de entrada, uma vez que o Arbiter gera um arquivo de saída próprio, no formato “.1133d”.

Assim, foi preciso utilizar um software próprio chamado PSCSV Software, conforme já comentado. Através deste, consegue-se gerar outros tipos de arquivos de saída, na qual foi escolhida “.csv” (*comma separated values*). O motivo é simples: trata-se de um arquivo texto, ou seja, tamanho reduzido comparado com demais extensões, onde tem-se todas as informações e que também é facilmente trabalhado por diversas linguagens e programas.

Outro fator que precisou de uma tomada de decisão foi a escolha entre os dois métodos apresentados na tese [1]. Apesar da metodologia dos eixos DQ ser mais popular e conhecida, optou-se usar a NEI pela simplicidade que será apresentada no software.

Como já mostrado anteriormente, usando os fasores da saída da medição é suficiente para atender a esse método.

#### **6.4.2 - Sobre o software**

A construção do programa foi baseado na linguagem C# (CSharp) da Microsoft. C# é uma linguagem de programação orientada a objetos e faz parte da plataforma .Net. Essa linguagem é baseada nas linguagens C++ e Java. [10]

O motivo principal dessa escolha foi o simples fato que é a linguagem mais conhecida pelos desenvolvedores deste trabalho. Entre outras características e vantagens, pode-se citar: é uma linguagem muito robusta; é fácil de trabalhar; mais seguro que o C++ por exemplo [10]; entre outros.

#### **6.4.3 - Estrutura do Software**

Optou-se por utilizar um arquivo de entrada no formato “.csv” com resultados de medição no formato de espectro. A principal vantagem de tal formato sobre a forma de onda amostrada normalmente é a diminuição do tamanho dos arquivos de entrada, bem como a redução do espaço de memória RAM alocada durante a execução do software. Como o próprio medidor é capaz de disponibilizar muitos valores fasoriais de harmônicas, é possível reconstruir facilmente o sinal original com uma aproximação satisfatória e a partir deste sinal reconstruído, calcular a NEI, como explicado anteriormente.

#### **6.4.3.1 - Reconstrução do Sinal Original**

A partir de um fasor com módulo e fase, sabe-se que o valor do sinal original é dado por:

$$V = [\text{Módulo}].\cos([\text{ordem}].60.t + \text{fase}) \quad (6.1)$$

Onde:

[Módulo] é o módulo da medição do Arbiter;

[ordem] é a ordem da harmônica considerada, sob a forma de  $(2\pi f h t + \text{fase})$ .

E pelo teorema da superposição, sabe-se que um sinal é construído pela somatória de suas componentes harmônica.

Utilizam-se então 21 harmônicas na obtenção de valores, e pelo critério de Nyquist, sabe-se que o período de amostragem tem que ser no mínimo igual à metade do período do sinal amostrado. Como o período é dado pelo inverso da freqüência, e a freqüência da harmônica de 21<sup>a</sup> ordem vale 1260Hz e consequentemente, seu período vale 0,000794s. Então, para garantir o cumprimento do critério de Nyquist é necessário usar um período de amostragem inferior a 0,000397s. Arbitrariamente, utilizou-se um período de 0,0001s, substituindo t por k.T na expressão (6.1) onde T = 0,0001s.

#### **6.4.3.2 - Entradas, Saídas e Limitações**

Atualmente, o Software é capaz de ler um arquivo “.csv” gerado pelo Arbiter com medidas de módulo e fase, de fasores, portanto, no modo de “medição de eventos”.

O código é funcional para qualquer número de amostras e harmônicas consideradas, pois sua alocação de memória e espaço é dinâmica. Na versão atual, o período de reconstrução do sinal está fixado em 0,1ms e o número de amostras geradas em 300.

Atualmente, o arquivo de saída é um “.csv” com 4 colunas, uma com data e hora local da medição, uma segunda com o valor calculado de FD<sub>u</sub> (%), a terceira com o valor calculado de FH<sub>u</sub>(%) e uma quarta coluna com os valores de FQu(%) para cada instante amostrado.

#### **6.4.3.3 - Código Fonte e Exemplo de dados de entrada.**

Arquivos podem ser encontrados em anexo ao final deste trabalho.

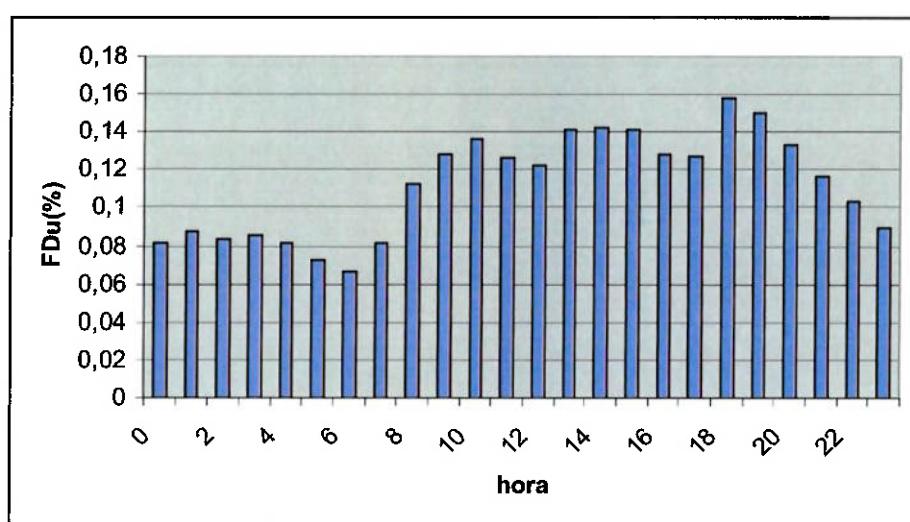
## **7 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS MEDIÇÕES**

A partir dos resultados obtidos pelo Software, geram-se duas análises, uma mostrando a variação dos indicadores de qualidade ao longo do dia e outra, mostrando a quantidade de vezes que um certo valor para cada indicador se repetiu (dentro de uma precisão pré-definida).

### **7.1 - Análise da qualidade durante o dia.**

A partir dos dados obtidos de 10 em 10 minutos, foi feita uma média por hora dos valores. Foram obtidos os gráficos das figuras abaixo:

#### **7.1.1 - Fator de Desequilíbrio FDu(%)**



**Figura 7-1– Histograma diário de FDu(%)**

O gráfico da figura 7-1 ilustra os valores médios para a semana toda, de hora em hora do valor de FDu.

Pelo gráfico da figura 7-1, pode-se notar que o desequilíbrio aumenta a partir das 9 horas da manhã, quando ocorre o início do horário comercial e a conseqüente ligação de uma maior quantidade de cargas, o que é coerente. A partir das 20 horas ocorre queda nos desequilíbrios, pois o horário de trabalho termina e gradualmente os últimos ensaios vão terminando, até atingir novamente o nível de desequilíbrio mínimo da rede.

### 7.1.2 - Fator de Distorções Harmônicas FHu(%)

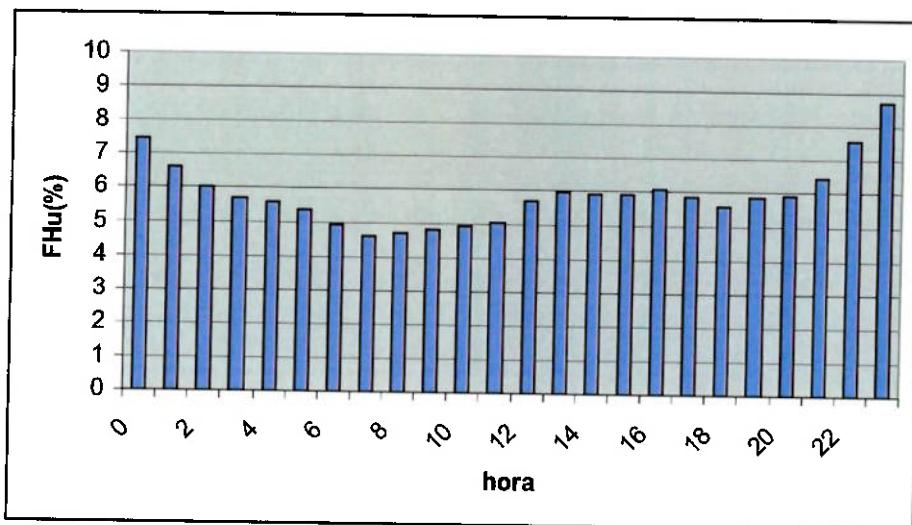


Figura 7-2 – Histograma de FHu(%)

O gráfico da figura 7-2 ilustra os valores médios para a semana toda, de hora em hora do valor de FHu.

O gráfico da figura 7-2 mostra que a distorção harmônica é mais presente no horário próximo da meia noite, isto pode ocorrer por alguns fatores, tais como a redução de cargas resistivas na rede o que reduz o amortecimento do circuito como um todo. Com a redução deste amortecimento cria um cenário propício para a propagação das distorções harmônicas.

Como foi observado no arquivo de entrada, durante boa parte do tempo, os valores eficazes de tensão são superiores aos 127V nominais. Tendo isto em vista, os próprios transformadores da rede podem acabar gerando estes harmônicos adicionais que são mais facilmente observados quando o amortecimento do circuito é reduzido.

### 7.1.3 - Fator de Qualidade de Energia FQu(%)

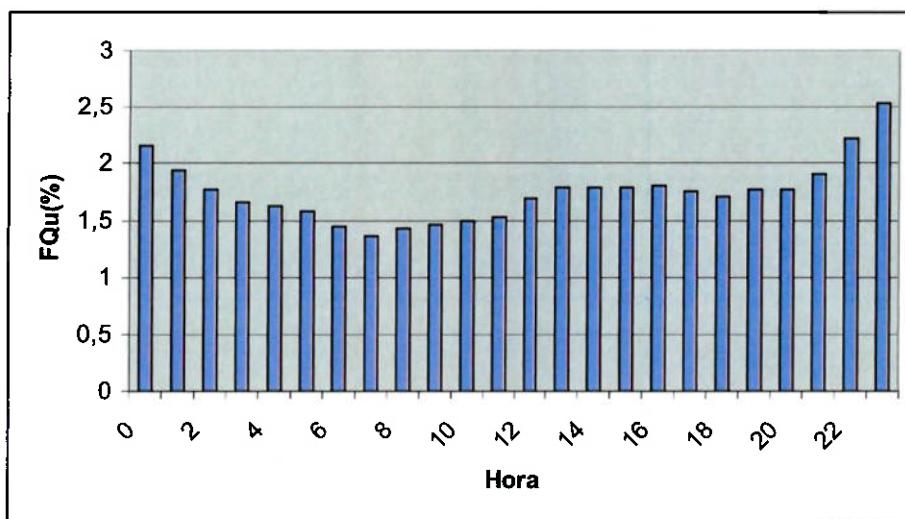


Figura 7-3 – Histograma do fator que qualidade (FQu)

O gráfico da figura 7-3 é uma combinação dos 2 anteriores e se comporta de forma semelhante ao gráfico das harmônicas, que mesmo tendo uma constante de ponderação menor para seu cálculo, é mais importante pois seu valor absoluto é muito mais elevado.

## 7.2 - Análise de dias completos

Foi feita também a análise comparando os indicadores dia após dia durante a semana das medições. Os resultados são apresentados nas figuras 7-4, 7-5 e 7-6.

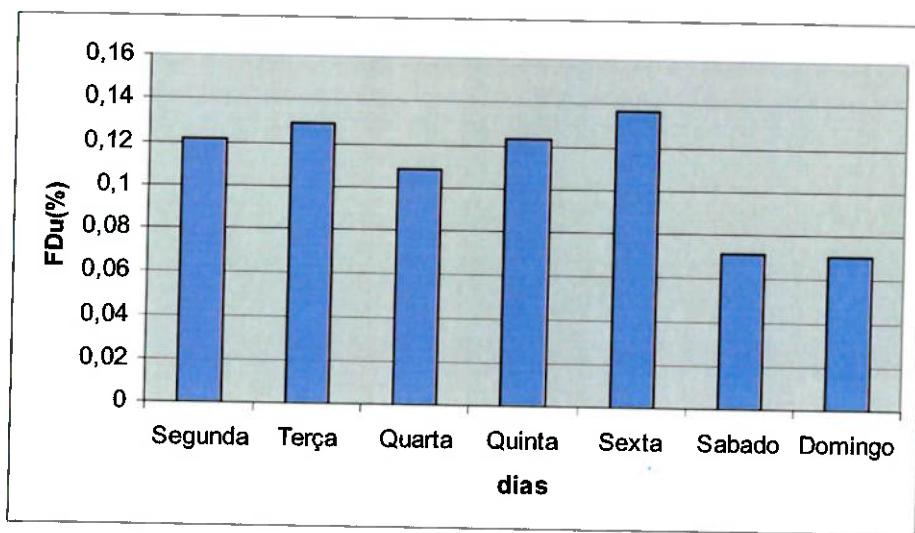


Figura 7-4 – Histograma do FDu diário

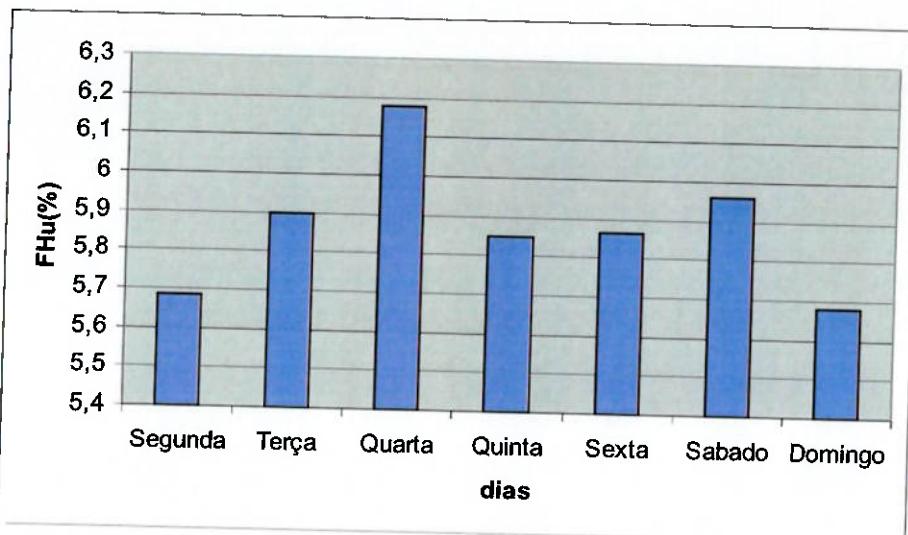


Figura 7-5 – Histograma do FHu diário

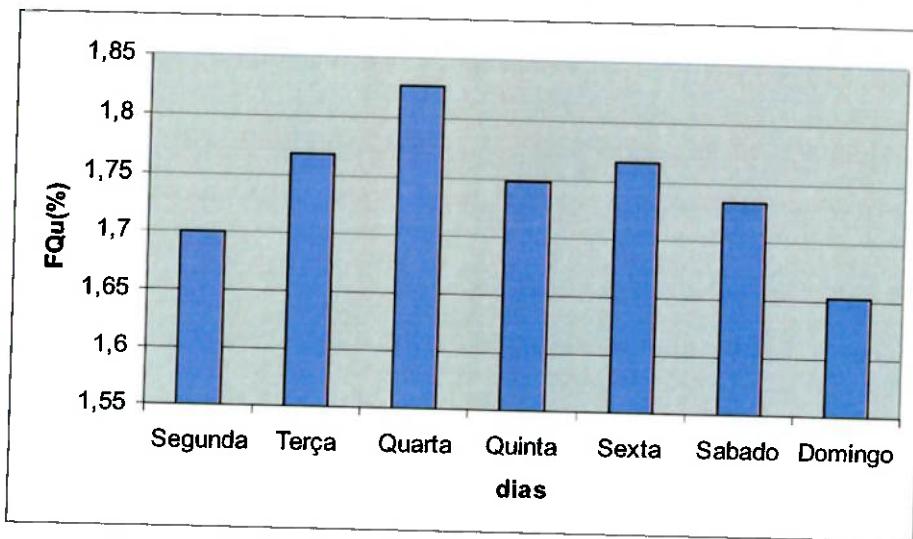


Figura 7-6 – Histograma do FQu diário

Nestes gráficos pode-se perceber que um menor número de cargas ligadas durante o fim de semana fez o nível de desequilíbrios cair.

Na quarta feira, ensaios de motores trifásicos contribuíram para o aumento dos harmônicos ao mesmo tempo em que ocorreu uma diminuição dos desequilíbrios relativamente aos outros dias.

Na tabela da figura 7-7, encontram-se os valores médios diários para cada indicador, como mostrados nos gráficos anteriores.

Indicador	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Dom
FDu	0,121223	0,129304	0,108411	0,122922	0,136493	0,071277	0,070439
FHu	5,684558	5,896825	6,176935	5,85046	5,866827	5,962798	5,678888
FQu	1,700777	1,767484	1,827112	1,748759	1,765555	1,733733	1,653484

Figura 7-7 – Valores médios Diários dos indicadores

### 7.3 - Análise estatística da qualidade global

Com os dados obtidos, observa-se que os valores de FQu, FDu e FHu variaram da seguinte forma:

$$\text{FDu mín} = 0,0013\% \quad \text{FDu Max} = 0,32\%$$

$$\text{FHu mín} = 2,06\% \quad \text{FHu Max} = 11,49\%$$

$$\text{FQu mín} = 0,68\% \quad \text{FQu Max} = 3,33\%$$

A partir disso, obteve-se também histogramas de freqüências para níveis de valores de FQu. Como os valores variam entre aproximadamente 0,68 e 3,33, foram utilizados os fundos de escala entre 0 e 3,5 com limites de variação 0,1, obtendo o histograma da figura 7-8.

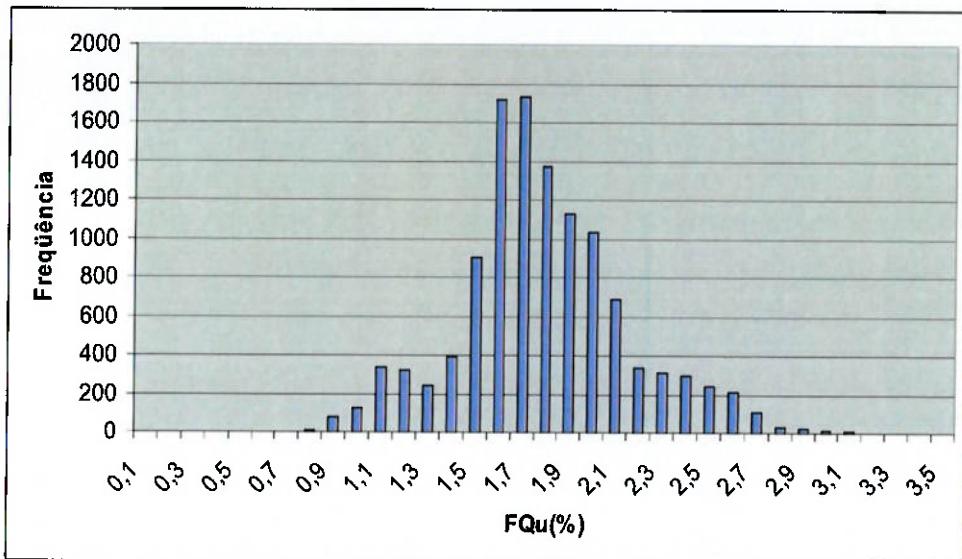
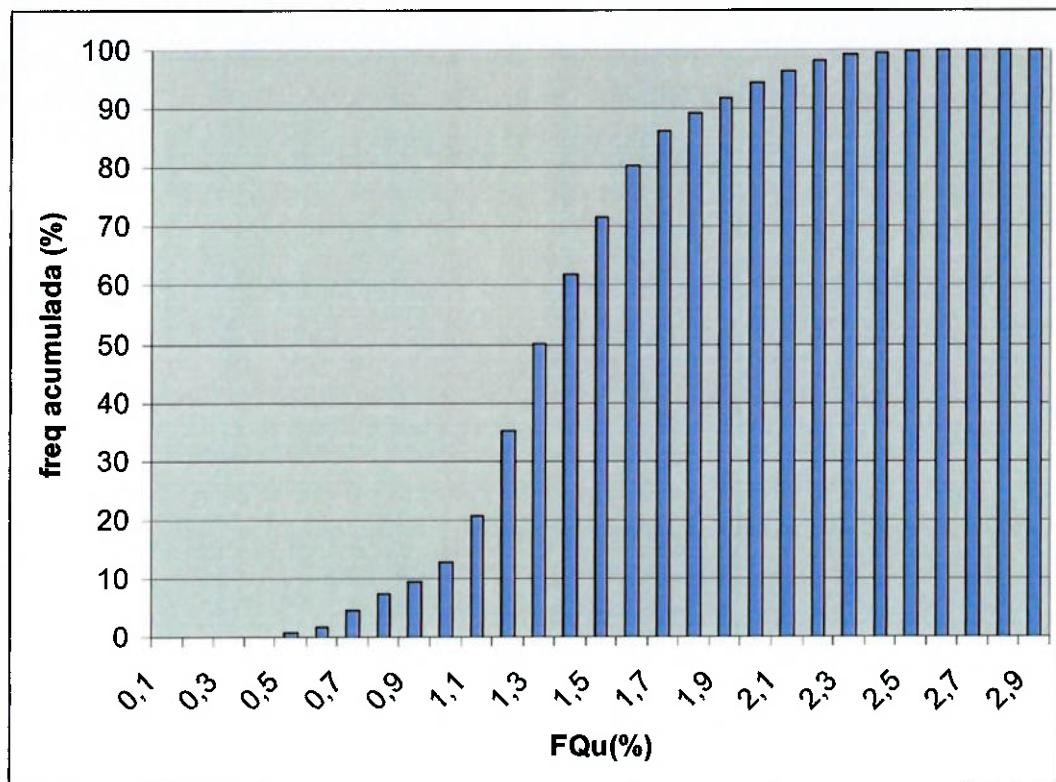


Figura 7-8 – Histograma de Freqüências de FQu

Para obter o valor de FQu 95%, que corresponde ao valor confiável de Qualidade de um sistema, ou seja, o valor de qualidade que é mantido por 95% do tempo, obteve-se um histograma de freqüências acumuladas, como visto na figura 7-9.



**Figura 7-9 – Histograma de freqüências acumuladas de FQu**

Do histograma em questão, observa-se o valor de FQu(%) que corresponde à freqüência 95%, este é o valor de FQu 95%.

A partir dos dados de saída organizados (em anexo) encontra-se o valor de FQu 95% = 2,43%.

Além do levantamento global dos dados foram feitas também análises levando em conta cada um dos dias, como visto nos itens à seguir.

### 7.3.1 - Análise de dias isolados – Segunda Feira

Levando em conta apenas a segunda feira, de maneira semelhante ao explicado anteriormente, obtém-se o histograma:

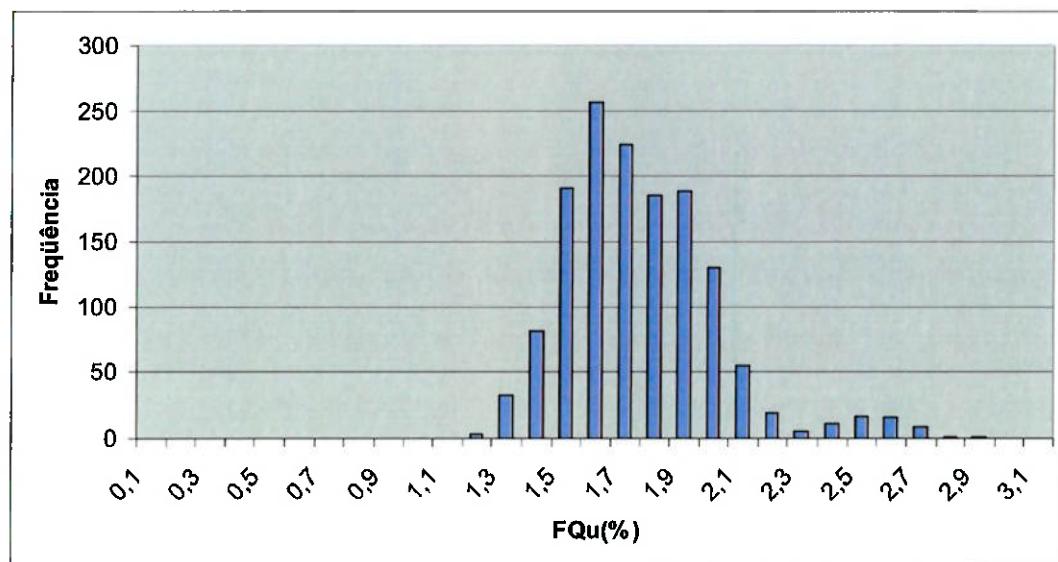


Figura 7-10 - Histograma de freqüência de FQu (2<sup>a</sup> feira)

Observa-se no gráfico da figura 7-10 uma distribuição bastante próxima da normal durante o período, mostrando uma aparente homogeneidade de cargas.

Obtendo o histograma de freqüências acumuladas apenas para a segunda feira, obtém-se o gráfico da figura 7-11.

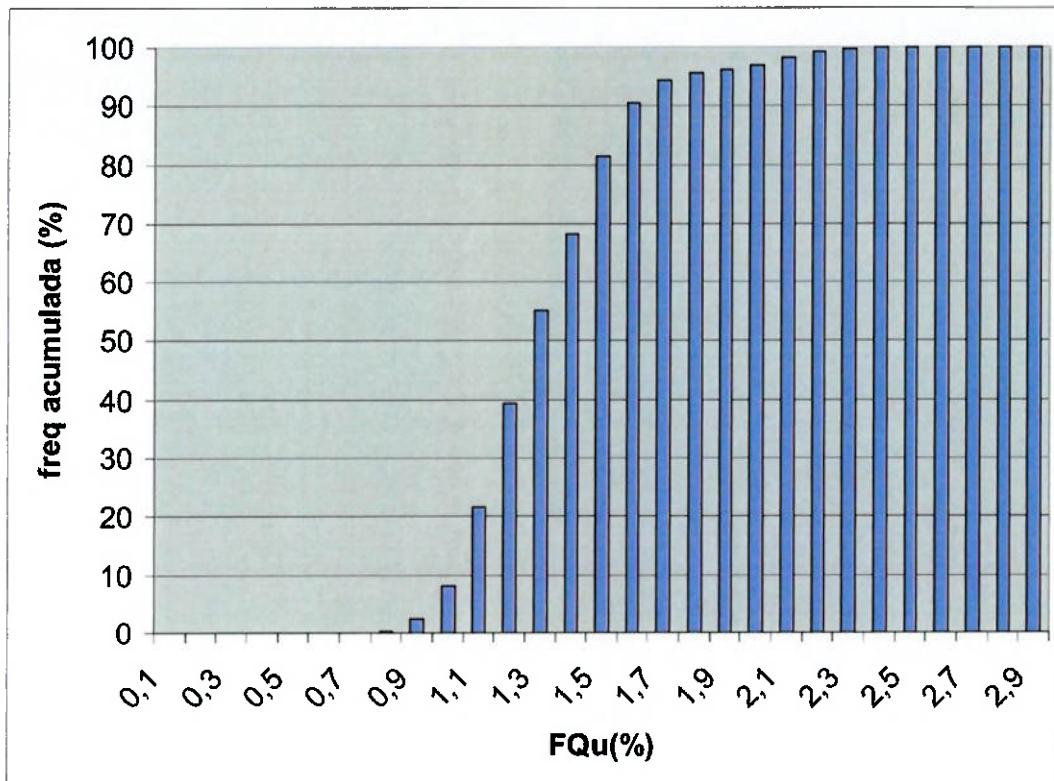


Figura 7-11 Histograma de freqüências acumuladas (2<sup>a</sup> feira)

A partir do gráfico, obtém-se então o valor da confiabilidade do sistema em relação à qualidade de energia no período, o valor de  $FQu95\% = 2,11\%$ , mostrando que durante a segunda feira, com menor variação de cargas, a qualidade de energia, em média, foi melhor do que no período completo analisado.

### 7.3.2 - Análise de Dias Isolados – Terça Feira

Da mesma forma que foi feita com a segunda feira, obtivemos dos dados do software os valores para o cálculo do histograma da terça feira, conforme a figura 7-12:

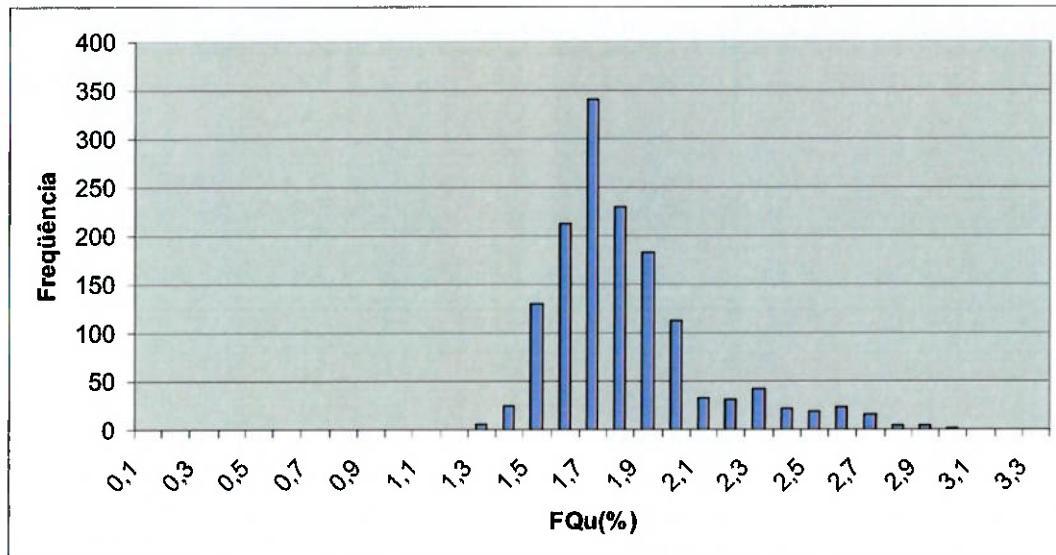


Figura 7-12 – Histograma de freqüências de FQu (3<sup>a</sup> feira)

No gráfico 7-12, percebe-se grande uniformidade de qualidade neste dia, indicando que houve poucas modificações de cargas importantes durante o período no circuito estudado.

E o histograma de freqüências acumuladas:

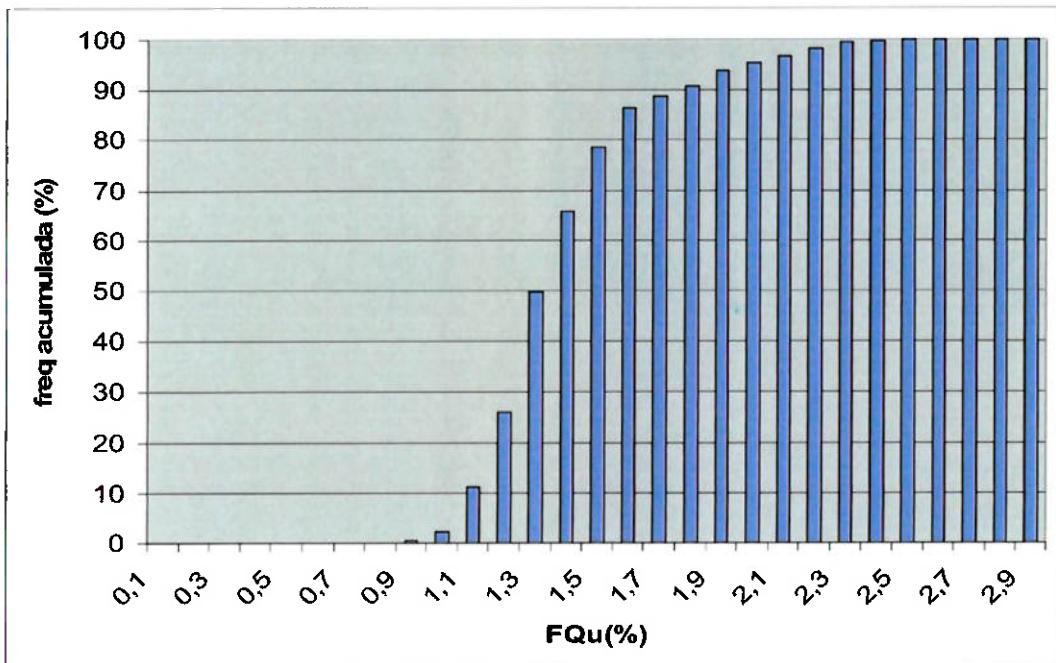


Figura 7-13 – Histograma de Freqüências acumuladas (3<sup>a</sup> feira)

No gráfico da figura 7-13, observa-se o valor de FQu95% = 2,38%, onde também é um pouco melhor do que o valor global de FQu95% , mais uma vez refletindo uma pequena variação de cargas durante o período.

### 7.3.3 - Análise de dias Isolados – Quarta Feira

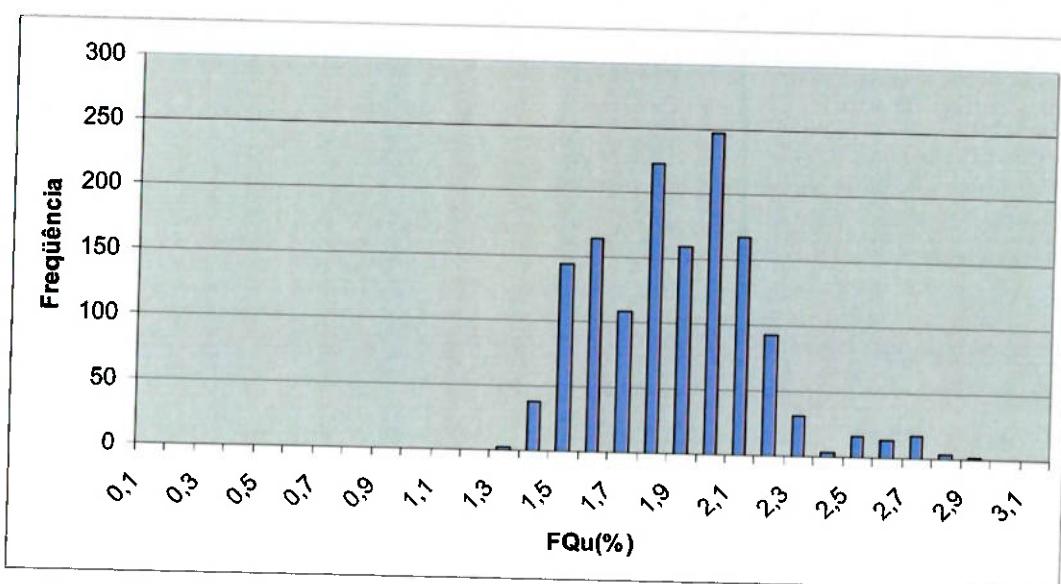


Figura 7-14 – Histograma de Freqüências de FQu (4<sup>a</sup> feira)

Observa-se agora uma variação um pouco maior do indicador, uma maior quantidade de valores foi encontrada, indicando que houve maior atividade na rede no que se refere a mudanças de cargas no circuito, com ensaios mais importantes e número flutuante de computadores e outras cargas ligadas.

De maneira semelhante ao feito para dias anteriores, foi obtido o gráfico de freqüências acumuladas para se encontrar a confiabilidade da qualidade em 95%, o FQu95% como pode ser visto na figura 7-15:

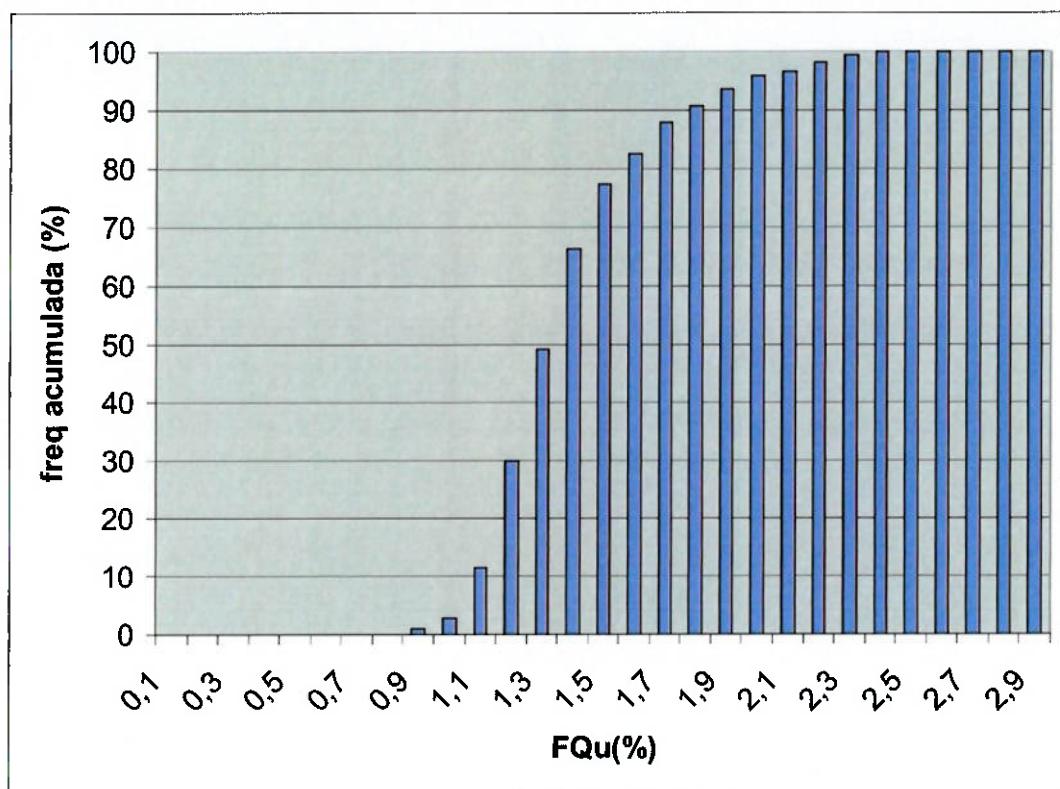


Figura 7-15 – Histograma de freqüências acumuladas (4<sup>a</sup> feira)

$$FQu95\% = 2,36\%$$

Este valor é bastante próximo do valor global, apesar de ser ainda um pouco melhor, o que nos leva a crer que as cargas utilizadas neste dia eram cargas que absorvem uma boa quantidade de reativos e não geram harmônicos extras.

#### 7.3.4 - Análise de dias Isolados – Quinta Feira

O histograma obtido para as freqüências de FQu na quinta feira é como se segue na figura 7-16:

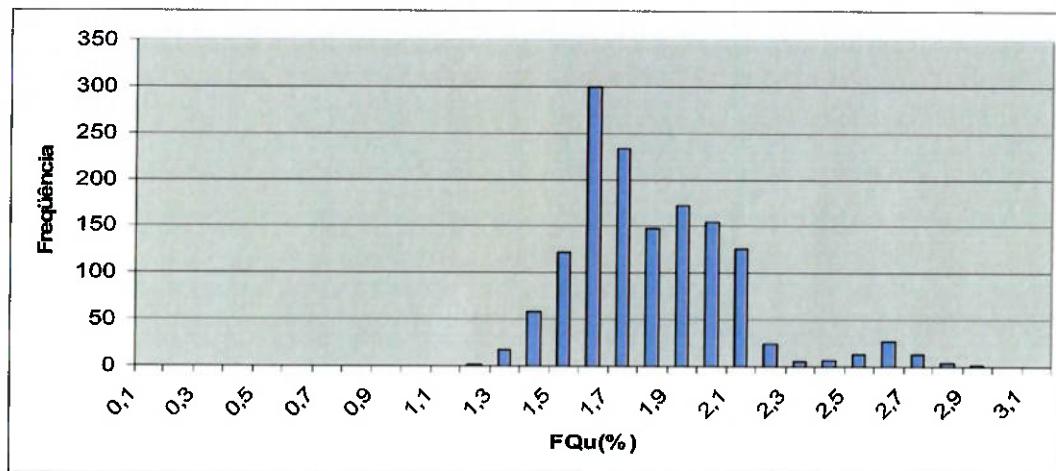


Figura 7-16 – Histograma de freqüências de FQu (5ª feira)

Observa-se uma grande quantidade de valores bastante baixos de FQu registrados neste dia, o que indica que há um ensaio duradouro de uma carga importante e que não injeta muitos harmônicos na rede, obtendo uma qualidade geral de energia bastante boa neste dia, como espera-se comprovar pelo gráfico a seguir, das freqüências acumuladas.

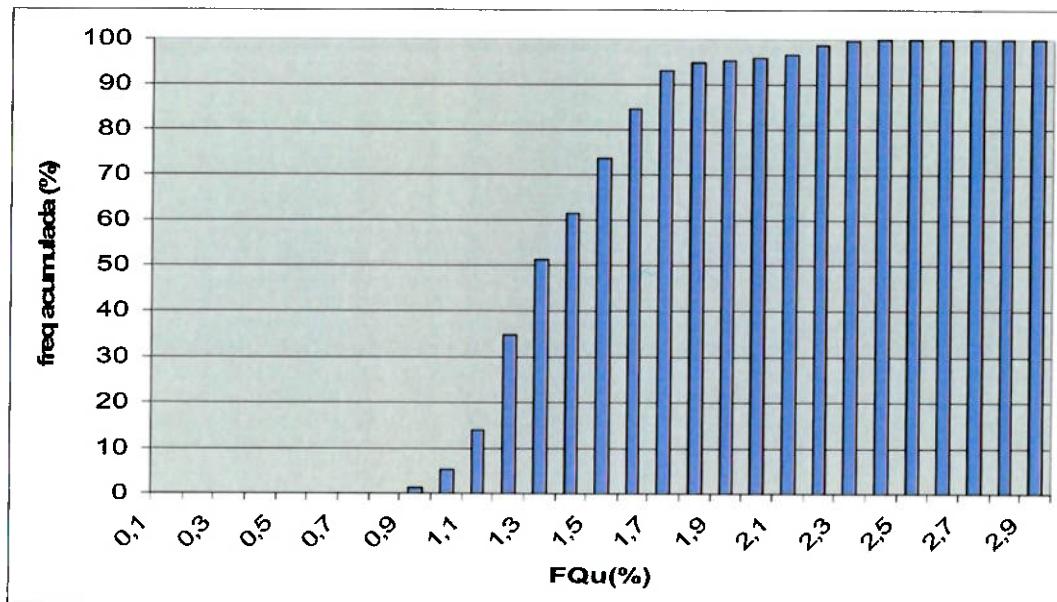


Figura 7-17 – Histograma de freqüências acumuladas (5ª feira)

$FQu95\% = 2,19\%$  que é significativamente melhor do que qualquer um dos outros dias, comprovando a sensação que o gráfico 7-16 trouxe.

### 7.3.5 - Análise de dias Isolados – Sexta Feira

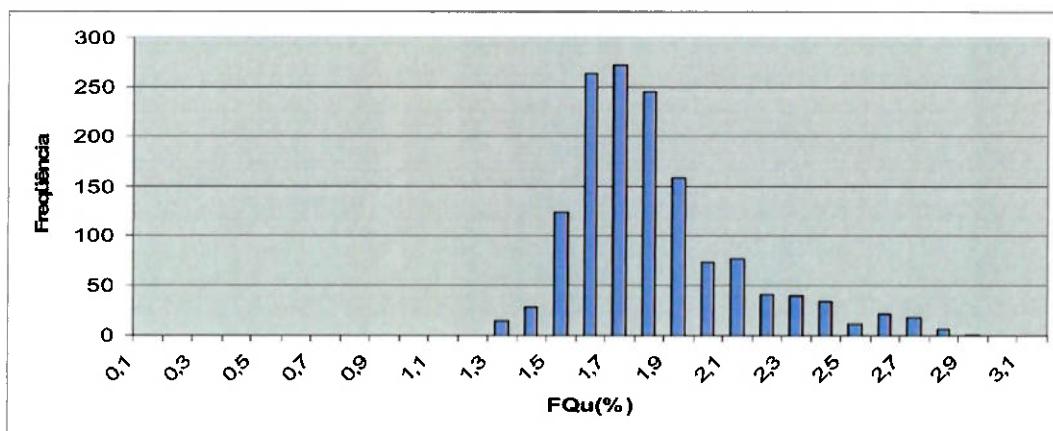


Figura 7-18 – Histograma de freqüências de FQu (6<sup>a</sup> feira)

Gráfico obtido bastante semelhante aos de segunda e terça, com distribuição bastante constante de cargas.

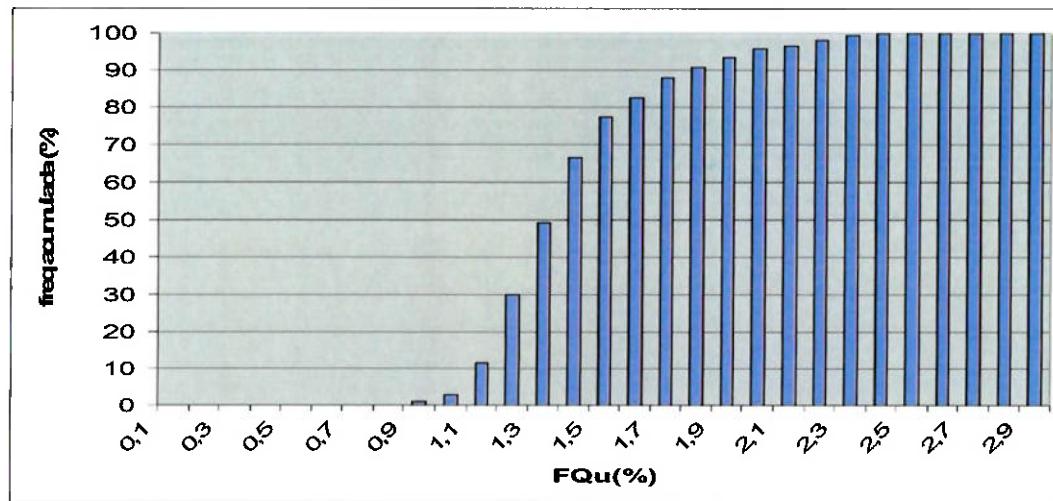


Figura 7-19 – Histograma de freqüências acumuladas (6<sup>a</sup> feira)

$FQu95\% = 2,36\%$ , um valor bastante próximo do encontrado nos outros dias, indicando um dia normal, sem medições importantes ou alguma diferença relevante na rotina.

### 7.3.6 - Análise de Dias Isolados – Sábado

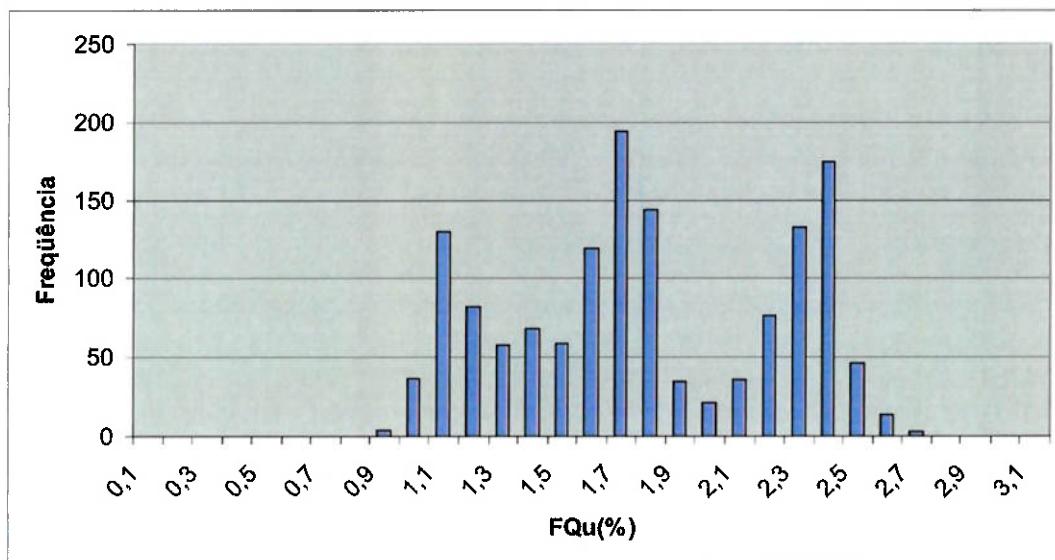


Figura 7-20 – Histograma de freqüências de FQu (sábado)

No sábado, a maioria das cargas do Enerq e da cidade universitária fica desligada, e o circuito fica livre, ficando mais suscetível à interferência de outros circuitos próximos, estas cargas passam a ser sentidas pela rede no Enerq conforme entram e saem dos diversos circuitos próximos, e o resultado pode ser visto no gráfico da figura 7-20 que mostra que há vários valores diferentes de FQu se repetindo durante o dia.

Gerando o gráfico de Freqüências Acumuladas, obtém-se a figura 7-21.

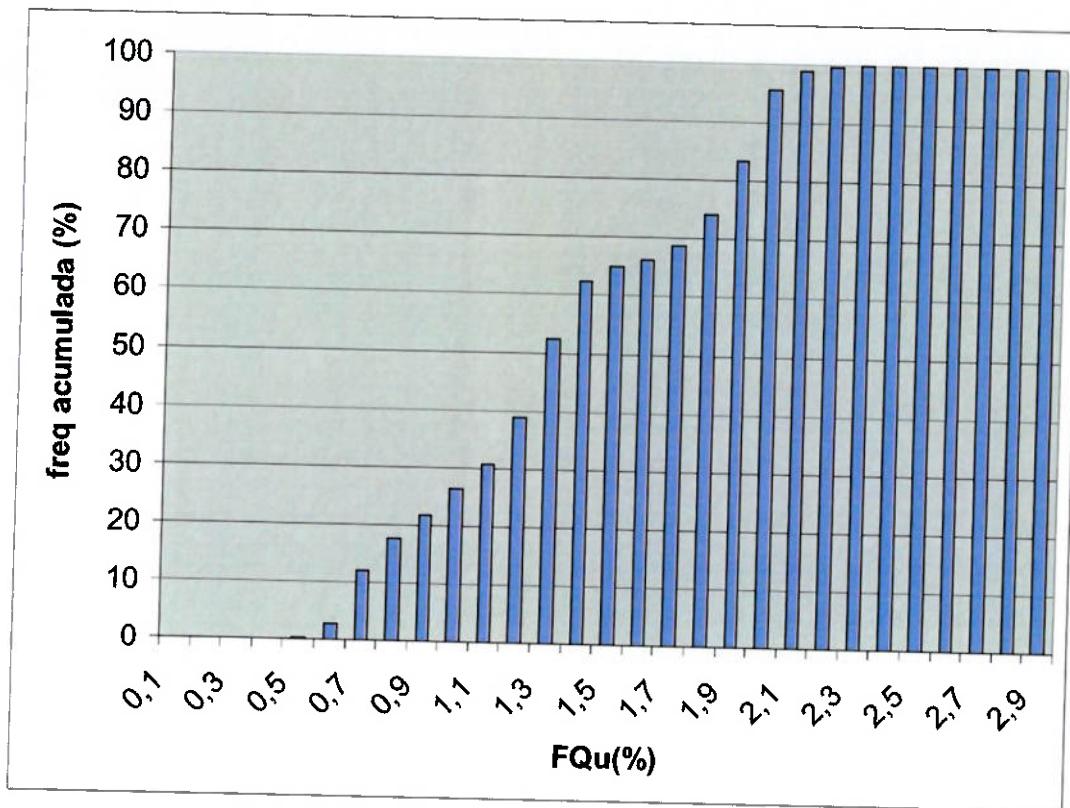


Figura 7-21 – Histograma de freqüências acumuladas (sábado)

Observa-se neste gráfico que a distribuição de valores de FQu é mais uniforme, isto se deve à maior variação de cargas sentida pelo circuito num dia em que as cargas mais próximas e que normalmente são sentidas estão desligadas.

$FQu95\% = 2,39\%$  que é bastante próximo do valor global e dos valores dos outros dias, mas neste caso, é uma feliz coincidência.

### 7.3.7 - Análise de Dias Isolados – Domingo

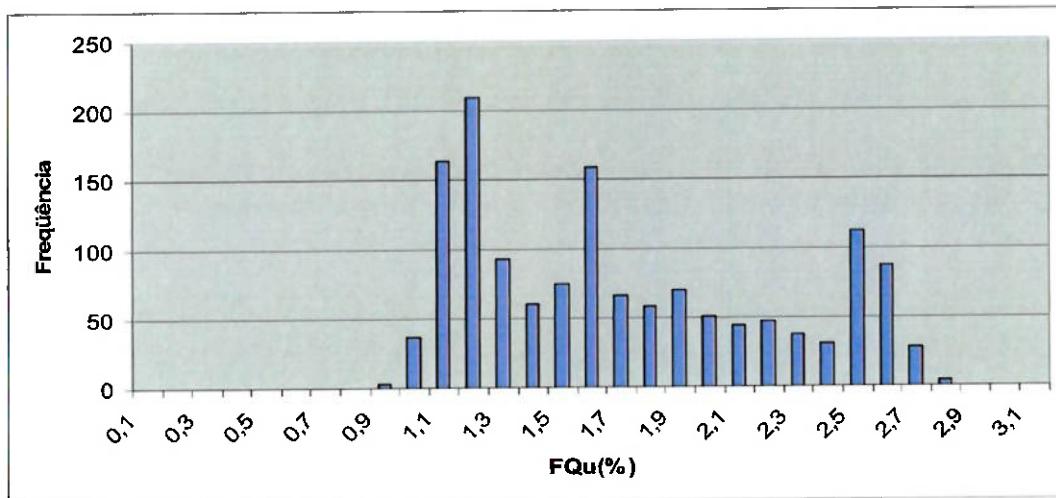


Figura 7-22 – Histograma de freqüências de FQu (domingo)

De maneira semelhante ao que houve no sábado, domingo também teve uma gama maior de valores de FQu se repetindo muitas vezes, e pode-se observar o gráfico de freqüências acumuladas:

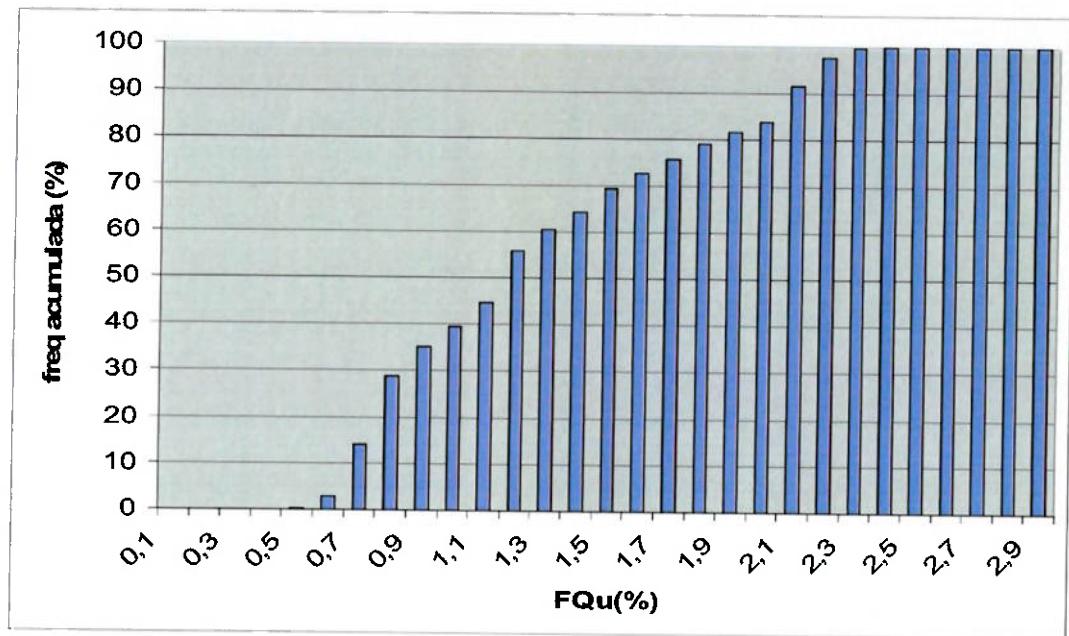


Figura 7-23 – Histograma de freqüências acumuladas (domingo)

$FQu95\% = 2,54\%$  o que mostra a pior confiabilidade no que diz respeito à qualidade do produto durante toda a semana.

Isto ocorre, como explicado, ao fato que as cargas são mais flutuantes durante o fim de semana, pois as cargas mais próximas e significativas estão desligadas.

## **8 - Conclusão**

Este trabalho desenvolvido teve como um dos objetivos complementar a tese de Doutorado: “Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de distorções harmônicas e Desequilíbrios sobre motores de indução” [1], mostrando como pode ser realizada uma campanha de medições dos sinais de tensões mais comuns presentes nos sistemas de fornecimento de energia, servindo de subsídio à definição de fatores usados para o cálculo do indicador de qualidade de tensão proposto na tese [1].

A principal contribuição proposta e apresentada corresponde à aplicação desse novo indicador de qualidade para um uso mais amplo, que, no caso, foi um estudo estatístico do comportamento da rede, estudando e analisando desequilíbrios das tensões e distorções harmônicas, refletidos adequadamente.

Para tanto, o projeto precisou contar com uma série de medições e testes. Outro pilar muito importante foi o desenvolvimento do software criado com o intuito de aperfeiçoar as análises, e que, com trabalhos ulteriores, poderá ser embutido em medidores ou em softwares mais robustos para estudos através desse indicador.

Observando os valores obtidos, percebe-se que o Indicador FQu pode se tornar um indicador bastante robusto, os resultados são coerentes com a realidade e refletem bem variações tanto de desequilíbrios, quanto de distorções harmônicas, tendo um

comportamento mais próximo do fenômeno preponderante no local de medição.

O algoritmo desenvolvido se provou bastante eficiente nos cálculos do indicador Mesmo sem estar em tempo real (pois necessita de um arquivo de entrada), o software é bastante simples e rápido, retornando dados facilmente manipuláveis.

Em trabalhos futuros, pode-se fazer implementações de melhorias no software, de modo que ele realize automaticamente os gráficos e determine todos os valores relevantes.

Além disso, seria interessante ensaiar outras máquinas para obter valores mais consistentes para as constantes de ponderação que transformam os indicadores FHu e FDu no indicador global, FQu.

## **9 - BIBLIOGRAFIA**

- [1] Duarte, S. X., Tese de Doutorado - Proposta de Indicador de Qualidade de Tensão a partir do Impacto de distorções harmônicas e Desequilíbrios sobre motores de indução, E. P., São Paulo, 2006.
- [2] Kagan, N., Barioni, C. C. O., Robba, E. J., Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, 1<sup>a</sup> ed, Edgard Blucher, 2005.
- [3] Kosow, I., Máquinas Elétricas e Transformadores, 14<sup>a</sup> ed, São Paulo, Globo.
- [4] Operation Manual: Model 1133<sup>a</sup> Power Sentinel – GPS Synchronized Power Quality / Revenue Standard, de Arbiter Systems
- [5] Canadian Electricity Association Technologies Inc. Publications, Reports and Researches.  
[\(http://www.canelect.ca\)](http://www.canelect.ca)
- [6] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Kusko, A. Jr., Máquinas Elétricas – Conversão Eletromecânica da Energia Processos, Dispositivos e Sistemas, McGraw-Hill do Brasil, 1975.

- [7] Mafarão, F. P., Deckmann, S. Paiva, E.P., Instantaneous Evaluation of Power Quality Indexes, 5º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência (COBEP'99) 1,1999, p.117-122.
- [8] Jordão, R. G., Transformadores, 1ª ed, São Paulo, Edgard Blucher, 2002.
- [9] Brancato, Emanuel L., Life expectancy of Motors, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 7, nº 6, Nov/Dec 1991  
[\(www.ieee.org\)](http://www.ieee.org)
- [10] Microsoft - MSDN  
[\(http://www.microsoft.com/brasil/msdn/csharp/Default.mspx\)](http://www.microsoft.com/brasil/msdn/csharp/Default.mspx)
- [11] Cutri, Rodrigo, Compensação de Desequilíbrios de Carga Empregando Conversor Estático Operando em Modulação em Largura de Pulso, Dissertação, USP, São Paulo, 2004.

## **Anexo 1 – Código Fonte**

### **Classe MainWindow()**

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Text;
using System.Windows.Forms;

namespace TfPaulo
{
    public partial class MainWindow : Form
    {
        public MainWindow()
        {
            InitializeComponent();
        }
        /// <summary>
```

```

/// Botão Que executa os comandos do software, força a leitura dos dados do arquivo,
reconstrói a onda, calcula todos os indicadores no período e os grava no arquivo de saída.
/// </summary>
/// <param name="sender"></param>
/// <param name="e"></param>

private void btnVai_Click(object sender, EventArgs e)
{
    btnVai.Enabled = false;
    ReconstroiOnda objReconstroi;
    Double[][] objOndaReconstruida;
    CalculaNei objNei;
    double[] FHU, FDU, FQU;
    int IndexA;
    String NomeDoArquivo = txtNomeDoArquivo.Text;
    String NomeSaida = txtArquivoSaida.Text;
    LerArquivo objLerArquivo = new LerArquivo(NomeDoArquivo, NomeSaida);
    FHU = new double[objLerArquivo.GetQtdLinhas() + 1];
    FDU = new double[objLerArquivo.GetQtdLinhas() + 1];
    FQU = new double[objLerArquivo.GetQtdLinhas() + 1];

    for (IndexA = 1; IndexA < objLerArquivo.GetQtdLinhas(); IndexA++)
    {
        objReconstroi = new ReconstroiOnda(objLerArquivo.GetLinha(0),
objLerArquivo.GetLinha(IndexA));
        objOndaReconstruida = objReconstroi.ObtemOndaReconstruida();
        objNei = new CalculaNei(objOndaReconstruida,
(int)objReconstroi.GetQtdHarmonicas());
        FHU[IndexA] = objNei.GetFHU();
        FDU[IndexA] = objNei.GetFDU();
        FQU[IndexA] = objNei.GetFQU();

        objReconstroi = null;
        objOndaReconstruida = null;
        objNei = null;
    }
    objLerArquivo.ExportaValor(FQU, FDU, FHU);
    btnVai.Enabled = true;
}
}
}

```

## Classe LerArquivo

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;
using System.IO;

/// <summary>
/// Classe de leitura do arquivo de entrada e que determina o arquivo de saída.
/// </summary>
class LerArquivo
{
    private String NomeDoArquivo;
    private String NomeSaida;
    private String[][] Buffer;
    private int NumeroDeLinhas;
    private String[] Datas;

    #region Instâncias da Classe
    /// <summary>
    /// Instâncias de entrada na classe, fornece os nomes dos arquivos de entrada e saída
    /// </summary>
    /// <param name="inNomeDoArquivo"></param>
    /// <param name="inNomeSaida"></param>
    public LerArquivo(String inNomeDoArquivo, String inNomeSaida)
    {
        NomeDoArquivo = inNomeDoArquivo;
        NomeSaida = inNomeSaida;
        InicializaArquivo();
    }
    #endregion
}
```

```

/// <summary>
/// Função pública que permite a saída do número de linhas do arquivo para ser usado fora
da classe.
/// </summary>
/// <returns>Retorna a quantidade de linhas do arquivo de entrada</returns>
public int GetQtdLinhas()
{
    return NumeroDeLinhas;
}
/// <summary>
/// Função que retorna o valor de uma linha / coluna específica da tabela para ser usada fora
da classe
/// </summary>
/// <param name="Linha"></param>
/// <param name="Coluna"></param>
/// <returns>Retorna o valor requerido</returns>
public String GetValor(int Linha, int Coluna)
{
    if (Buffer != null)
    {
        return Buffer[Linha][Coluna];
    }
    else
    {
        return "";
    }
}
public void GetDatas(int QtdLinhas)
{
    int index;
    for (index = 0; index < QtdLinhas; index++)
    {
        Datas[index] = Buffer[index][1];
    }
}
/// <summary>
/// Obtem o valor de uma linha inteira para ser usado fora da classe.
/// </summary>
/// <param name="Linha"></param>
/// <returns></returns>
public String[] GetLinha(int Linha)
{
    return Buffer[Linha];
}

```

```

/// <summary>
/// Função que lê o arquivo de entrada e aloca os dados do mesmo na memória para serem
tratados.
/// a função também conta o número de linhas do arquivo e formata corretamente os dados
para o modo esperado.
/// </summary>
/// <returns></returns>
private bool InicializaArquivo()
{
    StreamReader Arquivo;
    String Laranja;
    int auxLinha;
    try
    {Arquivo = new StreamReader(NomeDoArquivo);}
    catch
    {return false;}
    auxLinha = 0;
    while (!Arquivo.EndOfStream)
    {
        Laranja = Arquivo.ReadLine();
        auxLinha++;
    }
    NumeroDeLinhas = auxLinha;
    Buffer = new String[auxLinha];
    Arquivo.Close();
    Arquivo.Dispose();
    Arquivo = null;

    Arquivo = new StreamReader(NomeDoArquivo);
    for(auxLinha=0; !Arquivo.EndOfStream ; auxLinha++)
    {
        Laranja = Arquivo.ReadLine();
        Laranja = TratarLinha(Laranja);
        Buffer[auxLinha] = Laranja.Split(new char[]{','});
    }
    return true;
}
/// <summary>
/// Função que formata cada linha para o modo esperado.
/// </summary>
/// <param name="Linha"></param>
/// <returns> Retorna uma linha retirando a palavra "Fundamental" do título da harmônica e
colocando o algarismo 1 de modo que ela fique como as outras harmônicas.</returns>
private String TratarLinha(String Linha)
{
    Linha = Linha.Replace("Fundamental A V", "A V 1");
    Linha = Linha.Replace("Fundamental B V", "B V 1");
    Linha = Linha.Replace("Fundamental C V", "C V 1");
    return Linha;
}

```

```

/// <summary>
/// Função que exporta os dados dos indicadores para um arquivo .csv
/// </summary>
/// <param name="FQU">Vetor com todos os valores calculados de FQU</param>
/// <param name="FDU">Vetor com todos os valores calculados de FDU</param>
/// <param name="FHU">Vetor com todos os valores calculados de FHU</param>
/// <returns> retorna verdadeiro se tudo deu certo ou falso caso o arquivo não tenha sido
criado com sucesso.</returns>
public bool ExportaValor(double []FQU, double []FDU, double []FHU)
{
    int index;
    StreamWriter Arquivo;
    try
    { Arquivo = new StreamWriter(NomeSaida); }
    catch
    { return false; }
    Arquivo.WriteLine("Data/Hora; FDU; FHU; FQU" + Arquivo.NewLine);
    for (index = 1; index < NumeroDeLinhas; index++)
    {
        Arquivo.WriteLine(GetValor(index,1) + ";" + FDU[index] + ";" + FHU[index] + ";" + FQU[index]
+ Arquivo.NewLine);
    }
    return true;
}
}

```

## Classe CalculaNei

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;

/// <summary>
/// Classe que Calcula a forma de onda completa e determina as Normas Euclidianas Instantâneas dos valores.
/// </summary>
class CalculaNei
{
    private Double[][] OndaReconstruida;
    private Double[][] TotalDeFases;
    private Double[] Nei1, NeiTTotal, NeiH;
    private double FHU, FDU, FQU;
    int QtdHarmonicas;

    /// <summary>
    /// Função que chama as funções de cálculo de NEI e indicadores
    /// </summary>
    /// <param name="inOndaReconstruida">Valores das ondas reconstruídas pelo software</param>
    /// <param name="inQtdHarmonicas">Número de harmônicas considerado na reconstrução</param>
    public CalculaNei(Double[][] inOndaReconstruida, int inQtdHarmonicas)
    {
        OndaReconstruida = inOndaReconstruida;
        QtdHarmonicas = inQtdHarmonicas;
        CalculaTotalDeFases();
        CalculaNeis();
        CalculaFHU();
        CalculaFDU();
        CalculaFQU();
    }

    /// <summary>
    /// Função que exporta o vetor FHU para ser utilizado fora da classe.
    /// </summary>
    /// <returns></returns>
    public double GetFHU()
    {
        return FHU;
    }

    /// <summary>
    /// Função que exporta o vetor FDU para ser utilizado fora da classe.
    /// </summary>
    /// <returns></returns>
    public double GetFDU()
    {
        return FDU;
    }
}
```

```

/// <summary>
/// Função que exporta o vetor FQU para ser utilizado fora da classe.
/// </summary>
/// <returns></returns>
public double GetFQU()
{
    return FQU;
}
/// <summary>
/// Função que reconstrói a onda principal com a soma de todas as harmônicas
/// </summary>
private void CalculaTotalDeFases()
{
    int IndexA, IndexB, IndexC;
    TotalDeFases = new double[300][];
    for (IndexA = 0; IndexA < 300; IndexA++)
    {
        TotalDeFases[IndexA] = new double[3];
        for (IndexB = 0; IndexB < 3; IndexB++)
        {
            TotalDeFases[IndexA][IndexB] = 0.0;
            for (IndexC = 1; IndexC <= QtdHarmonicas; IndexC++)
            {
                TotalDeFases[IndexA][IndexB] += OndaReconstruida[IndexA][IndexC] + IndexB *
                QtdHarmonicas;
            }
        }
    }
    return;
}
/// <summary>
/// Função que calcula a NEI total, a NEI da harmônica fundamental e a NEI correspondente
às outras harmônicas.
/// </summary>
private void CalculaNeis()
{
    int IndexA;
    Nei1 = new double[300];
    NeiT = new double[300];
    NeiH = new double[300];
    for (IndexA = 0; IndexA < 300; IndexA++)
    {
        Nei1[IndexA] = Math.Sqrt(Q(OndaReconstruida[IndexA][1]) +
        Q(OndaReconstruida[IndexA][1 + QtdHarmonicas]) + Q(OndaReconstruida[IndexA][1 + 2 *
        QtdHarmonicas]));
        NeiT[IndexA] = Math.Sqrt(Q(TotalDeFases[IndexA][0]) +
        Q(TotalDeFases[IndexA][1]) + Q(TotalDeFases[IndexA][2]));
        NeiH[IndexA] = NeiT[IndexA] - Nei1[IndexA];
    }
    return;
}

```

```

/// <summary>
/// Função que calcula FHU a partir dos valores de NEI calculados
/// </summary>
private void CalculaFHU()
{
    int IndexA;
    int AmostragemDeUmCiclo = 166;
    FHU = 0.0;
    for (IndexA = 0; IndexA < AmostragemDeUmCiclo; IndexA++)
    {
        FHU += Q(NEI[IndexA]);
    }
    FHU = 100 * (FHU * Math.Sqrt(2)) / (Media(NEI) * AmostragemDeUmCiclo);
    return;
}
/// <summary>
/// Função que calcula FDU a partir dos valores de NEI obtidos
/// </summary>
private void CalculaFDU()
{
    FDU = 100*(Maximo(NEI) - Minimo(NEI)) / (2 * Media(NEI));
    return;
}
/// <summary>
/// Função que calcula FQU a partir de FDU e FHU
/// </summary>
private void CalculaFQU()
{
    FQU = 0.9*FDU + 0.28*FHU;
    return;
}
/// <summary>
/// Função que eleva um número ao quadrado
/// </summary>
/// <param name="Número">entrada</param>
/// <returns>Retorna entrada ao quadrado</returns>
private double Q(double Número)
{
    return Math.Pow(Número, 2);
}
/// <summary>
/// Função que calcula a média aritmética de todos os valores num vetor.
/// </summary>
/// <param name="Numeros">Vetor de números</param>
/// <returns>Média dos valores</returns>
private double Media(double[] Numeros)
{
    double Macaco;
    int IndexA;
    Macaco = 0.0;
    for (IndexA = 0; IndexA < Numeros.GetUpperBound(0); IndexA++)
    {
        Macaco += Numeros[IndexA];
    }
    return Macaco / (Numeros.GetUpperBound(0) + 1);
}

```

```

/// <summary>
/// Função que encontra o valor máximo dentre os valores de um vetor.
/// </summary>
/// <param name="Numeros">vetor de entrada</param>
/// <returns>Valor máximo</returns>
private double Maximo(double[] Numeros)
{
    double Bolt;
    int IndexA;
    Bolt = Numeros[0];
    for (IndexA = 1; IndexA < Numeros.GetUpperBound(0); IndexA++)
    {
        Bolt = Math.Max(Bolt, Numeros[IndexA]);
    }
    return Bolt;
}
/// <summary>
/// Função que retorna o valor mínimo dentre os números de um vetor.
/// </summary>
/// <param name="Numeros">vetor de entrada</param>
/// <returns>Valor mínimo</returns>
private double Minimo(double[] Numeros)
{
    double Tchururururu;
    int IndexA;
    Tchururururu = Numeros[0];
    for (IndexA = 1; IndexA < Numeros.GetUpperBound(0); IndexA++)
    {
        Tchururururu = Math.Min(Tchururururu, Numeros[IndexA]);
    }
    return Tchururururu;
}

```

## Classe ReconstróiOnda

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Text;

/// <summary>
/// Classe que reconstrói as ondas amostradas a partir dos fasores gerados pelo medidor.
/// </summary>
class ReconstróiOnda
{
    String[] Header, Dados;
    Double[][] OndasReconstruidas;
    public ReconstróiOnda(String[] inHeader, String[] inDados)
    {
        Header = inHeader;
        Dados = inDados;
    }
    /// <summary>
    /// função que obtém o número de harmônicas a ser considerado
    /// </summary>
    /// <returns>Quantidade de harmônicas existente no arquivo de entrada</returns>
    public double GetQtdHarmonicas()
    {
        return ((ObtemOrdem(Header[Header.GetUpperBound(0)])+1)/2);
    }
    /// <summary>
    /// Recria a forma de onda original a partir dos fasores utilizando um período de amostragem
    de 0,1ms
    /// </summary>
    /// <returns>Matriz com todos os valores das 3 fases para a onda reconstruída</returns>
    public Double[][] ObtemOndaReconstruída()
    {
        int IndexA, IndexB;
        double Ordem;
        OndasReconstruidas = new Double[300][];
        for (IndexA = 0; IndexA < 300; IndexA++)
        {
            OndasReconstruidas[IndexA] = new Double[(Dados.GetUpperBound(0) + 1)/2];
            for (IndexB = 2; IndexB <= Dados.GetUpperBound(0); IndexB = IndexB + 2)
            {
                Ordem = ObtemOrdem(Header[IndexB]);
                OndasReconstruidas[IndexA][IndexB / 2] = TD(Dados[IndexB].Replace(".", ",")) *
Math.Cos(120 * Math.PI * Ordem * (IndexA+1) * 10e-4 + (Math.PI * (TD(Dados[IndexB +
1].Replace(".", ","))) / 180));
            }
        }
        return OndasReconstruidas;
    }
}
```

```
/// <summary>
/// Função que converte o texto do arquivo de entrada para um número no formato "double"
/// </summary>
/// <param name="Numero">Número no formato texto</param>
/// <returns>Número</returns>
private double TD(String Numero)
{
    return Convert.ToDouble(Numero);
}
/// <summary>
/// Função que lê o cabeçalho do arquivo de entrada e obtém a ordem da harmônica a ser
considerada nos cálculos.
/// </summary>
/// <param name="Titulo"></param>
/// <returns></returns>
private double ObtemOrdem(String Titulo)
{
    return TD(Titulo.Replace("A      ","").Replace("B      ","").Replace("C      ","").Replace("V
","").Replace(" mag","").Replace(" ph",""));
}
```

## Anexo 2 – Exemplo de Saída do Software

Data/Hora	FDU	FHU	FQU
2008-May-05 10:34:42	0,13609	5,585375	1,686386
2008-May-05 10:35:42	0,153319	5,478085	1,671851
2008-May-05 10:36:42	0,152301	5,456286	1,664831
2008-May-05 10:37:42	0,149212	5,170164	1,581937
2008-May-05 10:38:42	0,143498	5,388236	1,637855
2008-May-05 10:39:42	0,130248	5,571844	1,67734
2008-May-05 10:40:42	0,151122	5,506302	1,677775
2008-May-05 10:41:42	0,144661	5,436653	1,652458
2008-May-05 10:42:42	0,139656	5,280001	1,60409
2008-May-05 10:43:42	0,1303	5,206487	1,575086
2008-May-05 10:44:42	0,092938	5,36375	1,585494
2008-May-05 10:45:42	0,097727	5,375023	1,592961
2008-May-05 10:46:42	0,125968	5,471134	1,645288
2008-May-05 10:47:42	0,127435	5,574695	1,675606
2008-May-05 10:48:42	0,133518	5,488008	1,656809
2008-May-05 10:49:42	0,126023	5,55514	1,66886
2008-May-05 10:50:42	0,109079	5,534269	1,647767
2008-May-05 10:51:42	0,102715	5,140768	1,531859
2008-May-05 10:52:42	0,091899	5,51885	1,627987
2008-May-05 10:53:42	0,102499	5,225671	1,555437
2008-May-05 10:54:42	0,111705	5,582627	1,66367
2008-May-05 10:55:42	0,107074	5,563211	1,654066
2008-May-05 10:56:42	0,14839	5,548751	1,687201
2008-May-05 10:57:42	0,135893	5,166952	1,56905
2008-May-05 10:58:42	0,09763	5,136564	1,526105
2008-May-05 10:59:42	0,098114	5,422119	1,606496
2008-May-05 11:00:42	0,107344	5,549803	1,650554
2008-May-05 11:01:42	0,120059	5,439808	1,631199
2008-May-05 11:02:42	0,125273	5,438994	1,635664
2008-May-05 11:03:42	0,120839	5,531713	1,657635
2008-May-05 11:04:42	0,11282	5,570201	1,661194
2008-May-05 11:05:42	0,094749	5,564922	1,643452
2008-May-05 11:06:42	0,099883	5,51181	1,633202
2008-May-05 11:07:42	0,078655	5,356612	1,570641
2008-May-05 11:08:42	0,112788	5,724168	1,704277
2008-May-05 11:09:42	0,119877	5,597852	1,675288
2008-May-05 11:10:42	0,115567	5,585647	1,667992
2008-May-05 11:11:42	0,129869	5,704872	1,714247
2008-May-05 11:12:41	0,128247	5,676566	1,70486
2008-May-05 11:13:42	0,116565	5,87299	1,749346
2008-May-05 11:14:41	0,12692	5,596568	1,681267
2008-May-05 11:15:42	0,103903	5,69755	1,688827
2008-May-05 11:16:41	0,112593	5,848021	1,73878
2008-May-05 11:17:41	0,103205	5,777292	1,710526
2008-May-05 11:18:41	0,114056	5,722274	1,704888