

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WEVERSON DOS SANTOS CIRINO**

**APLICAÇÃO DE FILTRO HARMÔNICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE BAIXA  
TENSÃO UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY***

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**BELÉM - PA**

**2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**APLICAÇÃO DE FILTRO HARMÔNICO EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE BAIXA  
TENSÃO UTILIZANDO LÓGICA *FUZZY***

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Processos Industriais.

**WEVERSON DOS SANTOS CIRINO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS TAVARES DA COSTA JUNIOR**

**BELÉM - PA  
2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**WEVERSON DOS SANTOS CIRINO**

**TÍTULO: Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão  
utilizando Lógica *Fuzzy*.**

**DEFESA DO MESTRADO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Concentração em Processos Industriais do Programa de Pós-graduação Strictu Sensu em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará – ITEC – UFPA.**

Belém – PA, 02 de Setembro de 2010.

---

Prof. Dr. José Antônio de Souza Silva – UFPA  
Coordenador do CMPPI

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Júnior  
Orientador – UFPA

---

Eng. Jandecy Cabral Leite  
ITEGAM

---

Prof. Dr. Francisco Beraldo Herrera  
Fernandez  
UEA

---

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira  
UFPA

## **DEDICATÓRIA**

À minha querida esposa Cláudia e as minhas  
filhas Larissa e Letícia, por terem sido  
pacientes e compreensivas nos momentos  
mais difíceis dessa minha jornada. Há vocês,  
ofereço o labor de meu trabalho científico aqui  
apresentado.

## **AGRADECIMENTOS**

Á Deus, o Pai, por ter me concedido a vida,  
inteligência e iluminação na direção dessa  
dissertação.

Á todos os meus amigos do curso de Pós-  
graduação em Engenharia Elétrica, com ênfase  
em Automação e Controle de Processos que  
me ajudaram cada qual do seu jeito e  
possibilidade para a concretização desse  
sonho.

Agradeço de maneira especial ao meu  
orientador e professor Doutor Carlos Tavares  
da Costa Júnior e ao Amigo Doutorando e Co-  
orientador Mestre Jandecy Cabral Leite, pelos  
seus aconselhamentos, orientações e  
incentivos nas horas difíceis às quais eu  
passei.

*Epígrafe:*

*“O futuro pertence àqueles que acreditam na  
beleza de seus sonhos.”*

*Eleanor Roosevelt (1884 - 1962)*

## RESUMO

CIRINO, W. S. **Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão utilizando Lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado – Instituto de Tecnologia – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. 80 p.

Em um sistema elétrico existem vários circuitos e equipamentos industriais que se comportam como dispositivos não-lineares. Esse comportamento gera sinais que causam distorções dentro desse sistema. Essas distorções são chamadas de Harmônicas, que calculada de forma ampla nos fornece o valor do THD (do inglês *Total Harmonic Distortion* ou Distorção Harmônica Total). Este trabalho apresenta uma das várias soluções para minimizar esse indicador através da detecção por um algoritmo computacional instalado no medidor de THD apropriado e pela utilização de filtros harmônicos passivos. Este algoritmo computacional detecta e calcula em quais frequências o valor do THD está elevado em comparação a um índice normativo definido utilizando para isso a Lógica *Fuzzy*. Uma vez definido a necessidade da aplicação do filtro harmônico esse será projetado pelo algoritmo computacional. O filtro harmônico entregue neste trabalho será o filtro passivo devido a sua fácil instalação e ao seu baixo custo. Dessa forma, o algoritmo computacional proposto funciona no início da medição do THD, no equipamento medidor, indicando uma faixa classificatória de THD medido, utilizando para isso a Lógica *Fuzzy*, identifica a necessidade ou não da instalação do filtro harmônico passivo e seu projeto, e finaliza efetuando um novo cálculo de THD.

**Palavras-chave:** Harmônicas. Filtro Harmônico. Filtro Passivo. Lógica *Fuzzy*.

## ABSTRACT

CIRINO, W. S. **Application of Harmonic Filter in Electric Systems of Low Tension using *Fuzzy Logic***. Master dedree Dissertation. Institute of Technology – Federal University of Pará, Belém, 2010. 80 p.

In an electric system several circuits and industrial equipments that behave as no-lineal devices exist. That behavior generates distortions in the electric system. Those distortions are called of Harmonic. This article introduces one of the several solutions to minimize that problem through the use of passive harmonic filters. The application of that filter will feel through a tool of computer generated to analyze and to detect which harmonic are present in the entrance sign and they harm the quality of the supply service, as well as, in projecting the passive filter. The Algorithm is divided in two phases, one for analysis and detection and the other based on *Fuzzy Logic* for the definition of the state of the supply service - QEE (Quality of the Electric power).

**Key Words:** Harmonic. Harmonic Filter. Passive Filter. *Fuzzy Logic*.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 -</b>	Perturbações que acontecem ao longo da geração e distribuição da energia elétrica até ao cliente final.	23
<b>Figura 2 -</b>	Fatores que prejudicam o fornecimento de energia elétrica na rede.	27
<b>Figura 3 -</b>	Onda Fundamental com a sua 5ª Harmônica.	29
<b>Figura 4 -</b>	Onda resultante da soma da fundamental e a 5ª Harmônica.	29
<b>Figura 5 -</b>	Comportamento Tensão versus Corrente de um Dispositivo Não-Linear.	30
<b>Figura 6 -</b>	Decomposição de uma forma de Onda por meio da Série de Fourier.	31
<b>Figura 7 -</b>	Geração de harmônicos por Fonte Chaveada.	31
<b>Figura 8 -</b>	Geração de harmônicos por No-Break.	32
<b>Figura 9 -</b>	Relação entre as perdas e o fator de potência.	34
<b>Figura 10 -</b>	Tipos de Filtros Passivos.	40
<b>Figura 11 -</b>	Organização básica de um Sistema <i>Fuzzy</i> .	41
<b>Figura 12 -</b>	Função de Pertinência.	44
<b>Figura 13 -</b>	Universo de discurso da variável lingüística Temperatura.	45
<b>Figura 14 -</b>	Fluxograma Funcional do Algoritmo Computacional proposto.	55
<b>Figura 15 -</b>	Valores Típicos dos Capacitores.	57
<b>Figura 16 -</b>	Gráfico Contorno de Impedância Constante.	58
<b>Figura 17 -</b>	Tela Principal do sistema de inferência do Algoritmo <i>Fuzzy</i> do Filtro.	60
<b>Figura 18 -</b>	Variável THD3 Tensão com suas relações: Normal Baixo (NB), Normal Dentro (ND) e F (Fora).	60

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- QEE - Qualidade de Energia Elétrica.
- IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos).
- MIT - Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnologia de Massachusetts).
- NIST - National Institute of Standards and Technology (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia).
- THD - Total Harmonic distortion (Distorção Harmônica Total).
- IEC - International Electrotechnical Commission (Comissão Internacional de Eletrotécnica).
  
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- FFT - Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier Fast Fourier Transform).

## SUMÁRIO

### LISTA DE FIGURAS

### LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

### RESUMO

### ABSTRACT

### CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 – CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 – JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA DO ESTUDO	14
1.3 – OBJETIVOS	16
1.3.1 – Objetivo Geral	16
1.3.2 – Objetivos Específicos	16
1.4 – CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA	16
1.5 – DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	18
1.6 – METODOLOGIA APLICADA À PESQUISA	18
1.7 – ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS	20

### CAPÍTULO 2: QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - QEE

2.1 – INTRODUÇÃO	22
2.2 – QEE: NORMATIZAÇÃO DA MEDIÇÃO	25
2.3 – NORMA PARA EMISSÃO DE HARMÔNICAS NA REDE	26
2.4 – FATORES QUE PREJUDICAM NA QEE	27
2.4.1 – Harmônicos	28
2.4.2 – Indicadores de Harmônicos	32
2.4.3 – Distorção Harmônica Total	33
2.4.4 – Fator de Potência	34
2.4.5 – Problemas causados pelas Harmônicas	35
2.5 – FILTROS HARMÔNICOS	36
2.5.1 – Filtros Passivos	39

### CAPÍTULO 3: LÓGICA *FUZZY*

3.1 – APLICAÇÃO DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	45
3.2 – BASE DE REGRAS	47
3.3 – FUZZIFICAÇÃO	48
3.4 – MÁQUINA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	50
3.5 – DEFUZZIFICAÇÃO	51

### CAPÍTULO 4: ALGORITMO PROPOSTO

4.1 – INTRODUÇÃO	53
------------------	----

### CAPÍTULO 5: ESTUDO DE CASO

5.1 – INTRODUÇÃO	56
------------------	----

<b>CAPÍTULO 6: CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES</b>	
6.1 – Trabalhos futuros	62
6.2 – Publicação oriunda desse Trabalho	62
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	63
<b>ANEXOS</b>	
Anexo 1 - Estrutura do arquivo de texto gerado pelo Medidor de THD para a Simulação	69
<b>APÊNDICES</b>	
A1 - Algoritmo Computacional do Filtro (1ª Parte: identificação e projeto)	70
A2 - Estrutura do Algoritmo do Filtro (2ª Parte: Lógica <i>Fuzzy</i> )	76
B1 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 01 coeficiente harmônico fora do limite especificado na frequência de 420 Hz.	78
B2 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 02 coeficientes harmônicos fora do limite especificado nas frequências de 300 Hz e 2.7 KHz.	79
B3 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 03 coeficientes harmônicos fora do limite especificado nas frequências de 180 Hz, 1.26 KHz e 2.82 KHz.	80

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1 - CONTEXTUALIZAÇÃO

Durante os últimos 10 anos, as empresas, comércios e residências em todo o Brasil vêm aumentando o número de equipamentos elétrico-eletrônicos ligados à rede elétrica de alimentação. Este aumento é proveniente do avanço tecnológico provocado pela globalização e pelo aumento do poder aquisitivo da sociedade.

Esses equipamentos são fabricados cada vez mais com componentes variados e de forma muito mais compactas, como por exemplo: microcomputadores e motores de corrente contínua. O problema é que dentro desses equipamentos existem circuitos não-lineares que, uma vez alimentados, provocam o surgimento de distorções, interferências e espúrios (que são chamadas de Harmônicas) que, em grande quantidade, podem provocar danos as redes do sistema elétrico. Harmônicos presentes nessas redes são definidos como tensão e correntes senoidais em frequências que são múltiplos inteiros da principal gerado (ou fundamental) de frequência (ARRILLAGA E WATSON, 2003).

Para agravar ainda mais este problema, foi constatado que o crescimento na instalação de equipamentos no sistema elétrico para diminuir os efeitos de tais harmônicas não ocorreu de forma satisfatória. Dessa forma, podemos dizer que a tensão que está sendo disponibilizada para o usuário não é um sinal senoidal puro e sim, um sinal distorcido. Este problema da má Qualidade de Energia Elétrica - QEE é um assunto atual e importante.

O impacto dessas harmônicas no sistema elétrico é bastante prejudicial para os equipamentos de potência, podendo causar aquecimento excessivo em transformadores e geradores, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, danos a dispositivos conectados ao sistema (decorrentes de sobre-tensões) e diminuição da vida útil de cabos.

Dentre os possíveis efeitos externos dos harmônicos está: a degradação na comunicação sistemas de desempenho; ruídos audíveis excessivos; e harmônica induzida por tensão e correntes (IEEE 519, 1992).

Essas harmônicas podem ser minimizadas a níveis aceitáveis através do dimensionamento adequado de transformadores, bem como, o emprego de filtros especialmente calculados. Na escolha de filtros, a solução mais comum consiste na aplicação de filtros do tipo Passivo, e em alguns casos, do Tipo Ativo.

Este problema ganhou dimensão internacional, o que provocou a criação de normas e recomendações técnicas que especificam o limite de magnitude de harmônicas de corrente e tensão nas diversas frequências, bem como, criando também normas e metodologias para mensurar essas distorções geradas.

O objetivo desse trabalho é discutir expor o problema da geração de harmônicas no sistema elétrico e propor um algoritmo de lógica *Fuzzy* para a instalação de filtro passivo conforme dados de entrada de uma simulação, e baseado nas normas IEC 61000 – 4 – 30 (IEC 61000 - 4 - 30, 2008), IEC 61000 - 3 - 2 (IEC 61000 - 3 - 2, 2001) e IEC 61000 – 4 – 7 (IEC 61000 - 4 - 7,2002). A eficiência do algoritmo é validada por softwares computacionais e são propostas uma seleção e um dimensionamento do filtro passivo para eliminar ou diminuir a distorção harmônica gerada.

## 1.2 – JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA DO ESTUDO

Nos sistemas de comunicações telefônicas, a presença de harmônicas gera ruídos, ocasionando grande degradação das comunicações (ARRILLAGA E WATSON, 2003). Existem outros sistemas nos quais os efeitos são também desastrosos. Muitas vezes, a presença de harmônicas só é detectada após a ocorrência de acidentes, tal como a destruição de capacitores destinados à correção de fator de potência.

Atualmente, tem havido uma evolução considerável em processos industriais de alta tensão que dependem de retificação controlada para o seu funcionamento e, portanto, geram harmônicas coerentes e baixas, não prejudicando o sistema elétrico.

No projeto desses equipamentos, muitas vezes, pressupõe-se a existência de uma fonte simetria de tensão livre de distorção harmônica. Conseqüentemente, os consumidores de energia do sistema de baixa tensão estão sendo alvos dessas dificuldades operacionais, aumentando como resultado da interação harmônica de seus próprios equipamentos de controle com o fornecimento de energia.

O padrão da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) de forma geral, embora difícil de se definir, deve ser garantido pelo operador do sistema. Contudo, essa qualidade pode acarretar problemas difíceis que necessitem de habilidades e informações técnicas para encontrar soluções adequadas.

Atualmente, as paralisações e os cortes de fornecimento de tensão podem, até certo ponto, ser dominados pelo operador do sistema. Entretanto, as flutuações de tensão harmônica, não podem, uma vez que são geradas pelos consumidores. Dessa forma, ainda não está claro de quem deve assumir este problema: a concessionária do sistema elétrico ou seus consumidores.

Com objetivo de minimizar o impacto da geração de harmônicas no sistema elétrico foram estabelecidas normas reguladoras contendo limites de emissão de harmônicas. Entretanto a questão ainda continua a ser decidida: quem irá controlar a emissão por parte do consumidor de baixa tensão e que irá cobrá-los por isso.

O risco de acontecerem freqüências harmônicas ressonantes e de seus efeitos sobre a destruição de capacitores de correção do fator de potência estão bem documentados na literatura. Entretanto, algumas das conseqüências negativas desse efeito não podem ser imediatamente observadas quando se considera efeito das harmônicas na sobrecarga desse equipamento.

Pela falta de conhecimento atualmente, ainda é impossível determinar a extensão que qualquer sistema elétrico pode suportar, quando sujeito a um determinado nível de harmônicas, e permanecer viável em termos dos serviços que o sistema tem de executar. Dessa forma, podemos identificar duas grandes barreiras: (i) é a capacidade de fazer medições precisas e (ii) o estado de simulação por computador.

O que podemos notar é que hoje há uma enorme necessidade de um planejamento mais global para a limitação da distorção harmônica nos sistemas elétricos. A preocupação com a distorção da forma de onda deve ser compartilhada

por todas as partes envolvidas, a fim estabelecer o justo equilíbrio entre o exercício do controle da distorção e manutenção da distorção.

Analisando todo esse contexto de forma bastante aprofundada podemos concluir que a realização desse trabalho vem contribuir para o tema abordado, bem como, somar seus resultados aos dos vários grupos de estudos relacionados a esta linha de pesquisa.

### 1.3 – OBJETIVOS

#### 1.3.1 - Objetivo Geral:

➤ Elaborar um Algoritmo Computacional *Fuzzy* baseado na ferramenta computacional MATLAB para analisar e identificar coeficientes harmônicos prejudiciais aos seus equipamentos e instalações, presentes no sinal de entrada (tensão ou corrente) de um consumidor final do sistema de energia de baixa tensão.

#### 1.3.2 - Objetivos Específicos:

➤ Analisar e identificar coeficientes harmônicos presentes no sinal de entrada (seja tensão ou corrente) superiores a 5% do coeficiente fundamental do sinal;

➤ Projetar um Filtro Passivo para qualquer harmônica prejudicial que se sobreponha ao sinal de entrada;

➤ Calcular um coeficiente de distorção harmônico total (THD, do inglês) sem a presença dos coeficientes harmônicos prejudiciais identificados que foram reduzidos ou eliminados, e;

➤ *Fuzzificar* o novo THD para relacioná-lo com inferências e obter resultados mais adequados ao controle visual.

### 1.4 – CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Um desafio que merece intensa investigação está em determinar em qual frequência está presente a distorção (harmônica) que prejudica a forma de sinal da corrente fornecida. Reduzir esta distorção na onda de tensão e corrente para níveis

aceitáveis tem sido um problema nos projetos de sistema de alimentação desde os primeiros dias da corrente alternada.

Nos últimos anos, houve uma crescente evolução nos processos industriais que dependem dos sinais de tensão e corrente estáveis ou, como se costuma identificar, processos que requerem sinais não distorcidos. Portanto, sinais que não possuam harmônicas presentes. Em contrapartida, no projeto desses equipamentos, muitas vezes é prevista uma fonte de tensão simétrica com ausência de distorção harmônica. Dessa forma, muitos consumidores de alta tensão têm reduzido suas taxas de geração de harmônicas. Isto tem tornado os usuários de baixa tensão os principais geradores das distorções harmônicas no sistema de energia elétrica, bem como, causado dificuldades operacionais para as concessionárias de energia elétrica devido ao aumento da interação harmônica nos seus equipamentos de controle e de fornecimento de energia (ARRILLAGA E WATSON, 2003).

O ponto chave da relevância desse trabalho está na importância de se identificar em quais frequências estão contidas as distorções harmônicas provocadas por equipamentos não-lineares de um determinado consumidor ligados na rede elétrica, os quais provocam flutuações (oscilações no sinal de tensão e corrente) podendo gerar interrupções e até quedas de tensão e corrente.

A QEE, embora difícil de definir e controlar, deve ser garantida pelo Operador do sistema. Contudo, qualidade de energia elétrica pode levantar problemas complicados que necessitam de informações detalhadas e habilidades técnicas para encontrar soluções adequadas, uma vez que, cada vez mais, as distorções são geradas pelos usuários do sistema. Dessa forma, ainda não está claro quem deve assumir o risco de garantir os níveis de distorção harmônica.

Logo, uma boa ação a ser tomada é especificar em norma os limites de emissão das distorções harmônicas gerados pelos usuários de baixa tensão e classificar os equipamentos geradores de distorção.

Outra questão é decidir quem irá controlar a perturbação provocada pelos usuários e que irá cobrá-los por isso, este tema não é objeto deste trabalho.

## 1.5 – DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Para este estudo, o universo da pesquisa delimita-se ao estudo direcionado sobre Geração, Distribuição e Consumo de Energia Elétrica, QEE, Filtro Harmônicos, Programação computacional envolvendo a ferramenta MATLAB, bem como, a utilização de sua Caixa de Ferramenta para Lógica *Fuzzy* e seus conceitos.

Inicia-se o processo com a geração de um arquivo texto por um medidor de THD devidamente calibrado, o qual foi utilizado para a medição do THD de tensão e corrente em um consumidor final que utiliza um sistema elétrico de Baixa Tensão. Este arquivo texto contém os valores dos coeficientes da fundamental e das 2ª a 50ª harmônicas, presentes no sinal.

Utilizando-se de um algoritmo computacional, objetivo principal desse trabalho. O desenvolvido na ferramenta MATLAB, será efetuada uma busca pelas as harmônicas que possuem seus coeficientes acima de 5% do valor da fundamental, conforme norma IEC 61000 – 3 - 2 que especifica este valor. Uma vez identificada(s) a(s) harmônica(s), será projetado um filtro passivo, o qual, implantado no sistema elétrico, irá mitigar ou eliminar a harmônica identificada. No mesmo algoritmo computacional existem a possibilidade de se efetuar a busca por harmônicas prejudiciais até 3 vezes. Finalizada a etapa de busca, projeta-se e implanta-se um filtro passivo e o algoritmo efetua um novo cálculo para o THD, esta nova variável é então *fuzzificada* para obtenção de um resultado mais adequado as expectativas e do controle visuais do homem.

## 1.6 – METODOLOGIA APLICADA À PESQUISA

Para este trabalho a metodologia adotada foi dividida nas seguintes fases:

- ❖ (1ª Fase) Definição do local da pesquisa:
- ✓ Brasil – Amazonas – Manaus – Pólo Industrial de Manaus – Empresa Metalúrgica Esplanada.

- ❖ (2ª Fase) Como será realizado este trabalho?
- ✓ O trabalho será baseado nas medições efetuadas na empresa identificada através de um Medidor de THD devidamente calibrado, o qual irá medir o coeficiente da fundamental e das quadragésima nona (49) harmônicas presentes no sinal, perfazendo um total de cinqüentas medições (50).
- ✓ Duração da medição: 2 horas.
- ✓ Intervalos de cada medição: a cada 1 minuto.
  
- ❖ (3ª Fase) Tipo de pesquisa:
- ✓ Ponto de vista da sua Natureza – é uma pesquisa Aplicada.
- ✓ Ponto de vista da forma de Abordagem do Problema – é uma pesquisa Quantitativa.
- ✓ Ponto de vista dos Procedimentos Técnicos – é uma pesquisa Bibliográfica e Estudo de Caso.
- ✓ O conjunto de procedimentos intelectuais e técnicos propostos por esse trabalho para que os seus objetivos sejam atingidos serão baseados no Método Científico Dedutivo.
  
- ❖ (4ª Fase) Universo da pesquisa:
- ✓ Está compreendida na empresa identificada, no meu sistema elétrico de baixa tensão, sendo que a medição realizada foi na entrada de sua rede elétrica.
  
- ❖ (5ª Fase) Amostras:
- ✓ Foram realizadas medições durante duas horas, no intervalo de 1 minuto, do THD da tensão e corrente. Essas medições foram exportadas para uma planilha em Excel.
  
- ❖ (6ª Fase) Instrumentos de coleta de dados:
- ✓ O instrumento de coleta de dados utilizado foi o Medidor de THD devidamente calibrado, direcionado somente para efetuar este tipo de medição. Outro instrumento utilizado foram as observações sistemáticas, pois para a coleta das

medições as mesmas foram planejadas e realizadas em condições controladas para aos propósitos estabelecidos.

- ❖ (7ª Fase) Forma de apresentação e análise dos dados:
- ✓ Nesta fase de organização do trabalho serão utilizados recursos computacionais e manuais para organizar os dados. Um equipamento elétrico destinado a medição do THD será empregado na coleta dos dados na rede elétrica da empresa. Será criado um algoritmo computacional para analisar as medições realizadas, fuzzificá-las para obter um resultado mais apropriados, gerando para isso tabelas, figuras, quadros, gráficos, fórmulas e cálculos.

## 1.7 – ORGANIZAÇÃO DOS CAPÍTULOS

No **Capítulo 1** serão apresentados a introdução, justificativa, objetivos gerais e específicos, a relevância do tema para os dias de hoje, a delimitação do campo de pesquisa, bem como, a metodologia aplicada neste trabalho.

No **Capítulo 2** serão apresentados os conceitos básicos sobre Qualidade de Energia Elétrica - QEE. Ainda nesse capítulo, serão abordados conceitos de distorção, seus efeitos no sistema de energia, conceito matemático da distorção aplicando outros conceitos de série de Fourier, determinação do cálculo para a Distorção Total e para a conclusão desse capítulo, medidas para diminuir ou eliminar essas distorções presentes no sinal fornecido pela concessionária de energia elétrica.

No **Capítulo 3** serão apresentados conceitos introdutórios sobre Lógica *Fuzzy*, passando sobre temas como: aplicação da lógica *Fuzzy*, verificando seu sistema de organização e como se dá a Base de Regras, o processo de Fuzzificação, a Máquina de Inerência e por final veremos a Defuzzificação.

No **Capítulo 4** será proposto o Algoritmo Computacional baseado em Lógica *Fuzzy* e demonstrado o seu funcionamento utilizando para isso a ferramenta de fluxograma de atividades.

No **Capítulo 5** será apresentado o Estudo de Caso realizado em um consumidor de baixa tensão do algoritmo do filtro computacional de Lógica *Fuzzy* proposto, bem como, os seus resultados obtidos. Neste mesmo capítulo foram propostos testes de simulação do algoritmo. Seus resultados são relatados e discutidos.

Finalmente no **Capítulo 6** são apresentadas as considerações finais e conclusões deste trabalho, onde é realizada uma análise sobre os aspectos mais significativos de seu desenvolvimento. Além disso, são apresentadas também, as sugestões para os trabalhos futuros, dando continuidade a esta linha de pesquisa.

Na última seção estão as Referências Bibliográficas pesquisadas para a base teórica e técnica, bem como, a sustentabilidade da linha de pesquisa.

## CAPÍTULO 2 – QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA - QEE

### 2.1 - INTRODUÇÃO

Inicialmente a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) era medida pelas concessionárias e pelos consumidores como sendo uma forma exclusiva onde se levava somente em consideração os níveis de continuidade do sistema elétrico, ou seja, interrupções no fornecimento de energia aos consumidores de forma não planejada. Realmente, durante vários anos essa era a única preocupação e objeto de foco por parte das concessionárias de energia elétrica.

Com avanço da tecnologia e o aumento populacional, atualmente nas residências e industriais que utilizam a baixa tensão estão cada vez mais “inteligentes” e seguras, devido à utilização de projetos e circuitos digitais de pequeno e grande porte. Em contrapartida, esta utilização torna estes consumidores muito mais sensíveis às mínimas variações no fornecimento de energia elétrica. É importante ressaltar que essas mesmas variações já existiam há vários anos, mas não eram percebidas. Atualmente, essas variações são consideradas como um grande problema principalmente pelos clientes industriais, causando, geralmente, elevados prejuízos aos mesmos (ARRILLAGA E WATSON, 2003).

Olhando para tudo isso, chegamos ao ponto muito importante, o qual retrata que todos os envolvidos, desde a geração e distribuição aos consumidores, devem entender e conhecer (pelo menos de forma introdutória) os fenômenos que afetam a Qualidade da Energia Elétrica. Neste caminho, podemos mencionar a Resolução ANEEL No. 024 de 2000, que busca:

*“... estabelecer, na forma que se segue, as disposições relativas à continuidade dos serviços públicos de energia elétrica, nos seus aspectos de duração e frequência, a serem observadas pelas concessionárias e permissionárias de serviço público de distribuição e de transmissão de energia elétrica...”*

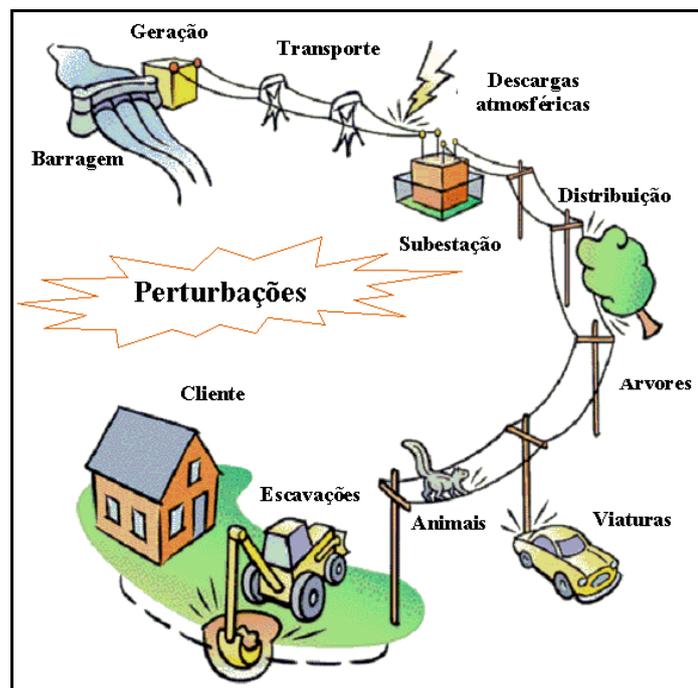
*(ANEEL RES. 024, 2000)*

Outra documentação importante que possui referência para Qualidade da Energia Elétrica é a Resolução No. 505 de 2001 da Agência Nacional de Energia Elétrica que busca:

*“... estabelecer, na forma que se segue, as disposições atualizadas e consolidadas relativas à conformidade dos níveis de tensão de energia elétrica em regime permanente, a serem observadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ...”*

*(ANEEL RES. 505, 2001)*

O Termo Qualidade da Energia Elétrica está relacionado com qualquer desvio que possa ocorrer na magnitude, forma de onda ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Esta designação também se aplica às interrupções de natureza permanente ou transitória que afetam o desempenho da transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica.



**Figura 1 – Perturbações que acontecem ao longo da geração e distribuição da energia elétrica até ao cliente final.**

Recentemente a ANEEL aprovou os Procedimentos de Distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST através da Resolução

Normativa No. 395 de 15 de Dezembro de 2009 (ANEEL RES. 395, 2009), (ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008), (LAMIN, 2009).

Nestes Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica, no módulo 8 que trata da Qualidade da Energia Elétrica, a ANEEL descreve a grande importância e necessidade de, através de normas e regulamentos específicos para a área de qualidade da energia elétrica, estabelecer e definir os procedimentos, as responsabilidades e principalmente os prazos para o desenvolvimento das campanhas de medição para cada um dos indicadores de Qualidade, visando futura implementação de programa de acompanhamento e controle dos novos indicadores relativos a perturbações na forma de onda de tensão, tais como distorções harmônicas, flutuação e variações de tensão de curta duração (ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008).

Estes procedimentos são uma grande inovação para o setor de distribuição de energia elétrica no que se refere à Qualidade do Produto. Sendo assim, são criadas sistemáticas que possibilitam à ANEEL estipular padrões para os indicadores de Qualidade da Energia Elétrica.

Mas em tudo ficou definido nestes PRODIST (procedimentos), por exemplo, a questão dos protocolos de medição para os diversos indicadores de qualidade do produto, o PRODIST estabelece que esses protocolos sejam definidos em resolução específica.

Dessa forma e de maneira não estabelecida, a quantidade de medições de parâmetros da Qualidade da Energia Elétrica, bem como um grande comércio de variáveis equipamentos para monitoração tem sido estimulado nos últimos anos. Em sintonia com isso, o sistema de medição e monitoramento a ser utilizado irá depender unicamente do equipamento de monitoração empregado, logo para diversos tipos de equipamentos existentes, diversos sistemas de monitoramento e medição serão criados.

Refletindo sobre este assunto, é de fundamental importância que os protocolos de medição sejam precisamente definidos para que se determinem os equipamentos ou dispositivos de medição mais adequados para cada caso (RAMOS, DE LIRA E BRONZEADO, 2003). O que podemos ver e analisar é que não há procedimentos específicos e legais que possam garantir a qualidade das

medições do sistema de monitoramento e medição da Qualidade da Energia Elétrica, seja pela ausência de protocolos de medição padronizados (BELCHIOR, et al, 2008), ou por falta de metrologia legal para certificação de equipamentos, produtos e processos, bem como pela falta de qualificação e capacitação de pessoal no uso desses medidores (SOLETO, BONATTO, BELCHIOR E MERTENS, 2008), (NBR/IEC 17025, 2005).

Hoje o maior debate é sobre quais os limites aceitáveis para os protocolos de medição que são utilizados nos equipamentos e dispositivos de medição. O que podemos observar é que o mesmo fenômeno, quando medido por dois equipamentos diferentes, pode apresentar valores muito distintos, tornando-se imprescindível o estabelecimento de um protocolo com o qual seja possível, homogeneizar as medições dos parâmetros indicadores dos níveis da qualidade da energia elétrica em um sistema.

## 2.2 – QEE: NORMATIZAÇÃO DA MEDIÇÃO

Para que pudesse haver uma normatização de medição para a Qualidade da Energia Elétrica no Brasil algumas etapas importantes deveriam acontecer. Uma dessas etapas foi à criação do Grupo de trabalho da ABNT, CE - 03: 77.1/GT2 – Qualidade da Energia Elétrica. Este grupo de trabalho está elaborando a Norma NBR IEC 61000 - 4 - 30 Compatibilidade Eletromagnética (CEM) Parte 4 - 30 “Técnicas de Medição - Métodos de Medição da Qualidade da Energia Elétrica”, baseado na IEC 61000 - 4 - 30 Testing and Measurement Techniques – Power quality measurement methods (NEWMAN, 2009), (IEC 61000 - 4 - 30, 2008), e pretende encaminhá-la para apreciação e audiência pública o mais breve possível ainda neste ano de 2010.

Falando agora do universo eletromagnético, podemos falar que este é bastante amplo e que podem ocorrer nos sistemas elétricos. Esse universo vai de pequenos fenômenos eletromagnéticos que podemos identificar como transitórios ultra-rápidos até os de baixa frequência, típicos de oscilações eletromecânicas entre grandes sistemas interligados. Outros fenômenos, tais como: flutuações de tensão, desequilíbrios, distorções harmônicas constituem outros aspectos da Qualidade da Energia Elétrica que requer uma metodologia específica para o adequado registro.

Sendo assim, esta norma definirá o desempenho desejado, incluindo o método de medição, a incerteza e faixa de valores dos parâmetros medidos, avaliações dos resultados das medições e como proceder para se fazer a integração ou agregação no tempo para os valores medidos. Dessa forma, podemos identificar que o objetivo desta norma é tornar o mais parecido possível os resultados obtidos por diferentes equipamentos ou dispositivos de medição para um mesmo fenômeno eletromagnético.

De forma geral a norma IEC 61000 - 4 – 30 exige equipamento e dispositivo de medição certificados conforme padrões definidos por ela mesma, logo a certificação de um produto, processo ou serviço geralmente passa por necessidades onde a avaliação de conformidade é fundamental. Assim, o estabelecimento de um protocolo para a realização de medições é fundamental para que seja possível a realização de comparações entre resultados de diversos pontos de monitoramento.

Finalizando a análise da norma em questão, os seus principais pontos e benefícios são:

- ✓ A padronização dos métodos;
- ✓ Técnicas de medição;
- ✓ Garantia na confiabilidade dos resultados, e;
- ✓ Possibilitar a comparação de resultados de forma ampla independentemente do modelo/marca do instrumento utilizado.

### 2.3 – NORMA PARA EMISSÃO DE HARMÔNICAS NA REDE ELÉTRICA

Como já identificamos, as correntes distorcidas podem afetar na operação dos equipamentos ligados à rede elétrica, e causar problemas que afetam a Qualidade da Energia Elétrica fornecida aos consumidores. Dessa forma, a rede elétrica como um todo, fica prejudicada devido à soma de milhões de equipamentos gerando harmônicas.

Para que haja um controle dessas correntes foram criadas e estabelecidas normas com objetivo de limitar a emissão de harmônicas por equipamentos eletro-eletrônicos encontradas em todos os setores.

Entre muitas normas técnicas criadas que tratam da emissão de harmônicas, visando mitigar sua expansão, podemos citar a norma IEC 61000 – 3 – 2 (IEC 61000 - 3 - 2, 2001), a qual limita a emissão de harmônicas por equipamentos eletro-eletrônicos com corrente de entrada menor que 16 A por fase e/ou máximo de 5% do coeficiente da onda fundamental para todos os coeficientes harmônicos presentes no sinal de tensão ou corrente. Esta normalização será empregada neste trabalho.

#### 2.4 – FATORES QUE PREJUDICAM NA QEE

Em um sistema elétrico de alimentação existem vários parâmetros que definem como má qualidade o serviço prestado. Os harmônicos presentes na tensão e na corrente do sinal e seus efeitos nos diversos equipamentos eletro-eletrônicos têm constituído assunto de interesse de vários grupos de pesquisas e alvo de inúmeras publicações.

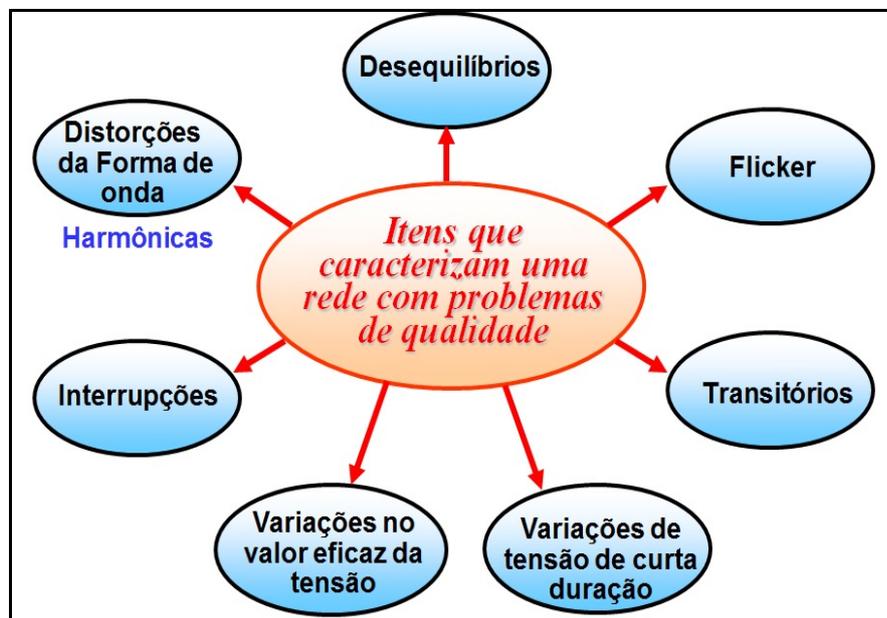


Figura 2 – Fatores que prejudicam o fornecimento de energia elétrica na rede.

### 2.4.1 - Harmônicas

De uma maneira geral, as tensões geradas pelas usinas elétricas possuem, a princípio, formas de onda praticamente senoidais. Nas barras mais próximas dessas usinas, devido aos altos níveis de curto circuito, as medições efetuadas por analisadores harmônicos ou osciloscópios mostram que as tensões têm menos que 1% de distorção (RESENDE, 2007). Entretanto, à medida que os pontos de medição se distanciam das centrais geradoras e se encaminham para cargas elétricas as distorções de tensão aumentam. Nas proximidades de certas cargas, as formas de onda das correntes também são bastante distorcidas. As distorções nas formas de onda das tensões e correntes (harmônicas) tornaram-se mais significativas a partir da década de 90, quando a proporção de equipamentos eletroeletrônicos começou a se equiparar com os elétricos.

O termo harmônico surgiu quando, ao investigar problemas de transmissão de calor, o físico e matemático francês, Jean - Baptiste Joseph Fourier descobriu que toda função com forma de onda periódica, pode ser representada por uma soma infinita de senóides e co-senóides, mais uma componente contínua (NILSON E RIEDEL, 2003). Assim, se  $y(t)$  é uma função periódica qualquer, pode ser expressa na forma:

$$y(t) = A_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)$$

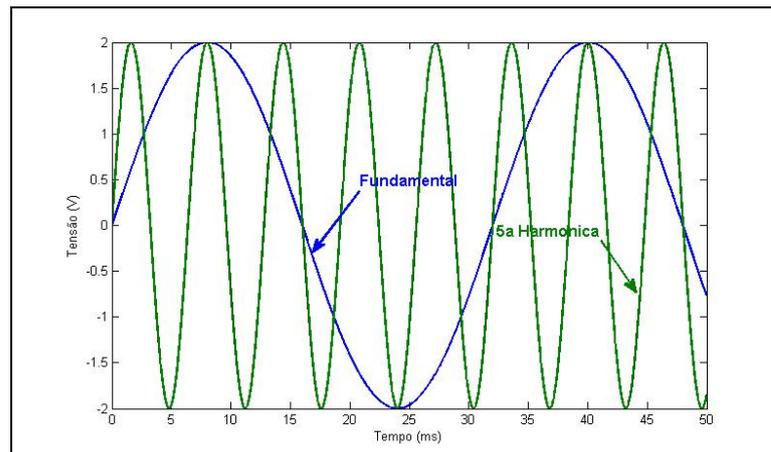
(equação 1)

onde o símbolo de somatório significa que os termos em seno e co-seno são calculados para  $h = 1, 2, 3, \dots$ . Os parâmetros  $A_0$ ,  $a_h$  e  $b_h$  em recebem o nome de coeficientes de Fourier (NILSON E RIEDEL, 2003). O coeficiente  $A_0$  representa a amplitude da componente contínua e os coeficientes  $a_h$  e  $b_h$  representam, respectivamente, as amplitudes das componentes co-senoidal e senoidal.

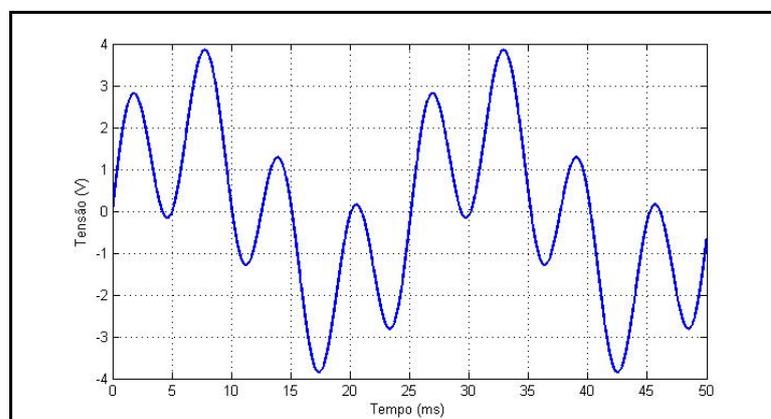
A frequência  $\omega = 2\pi/T$  é chamada de Frequência Angular Fundamental da função periódica  $y(t)$ . Os múltiplos inteiros de  $\omega$ , isto é,  $2\omega$ ,  $3\omega$ ,  $4\omega$ , etc., são denominados harmônicos de  $y(t)$ . Deste modo,  $2\omega$  é o segundo harmônico,  $3\omega$  é o terceiro harmônico e assim por diante (NILSON E RIEDEL, 2003).

No caso da rede elétrica brasileira, sabe-se que a frequência fundamental ( $f = \omega/2\pi$ ) é 60 Hz e os harmônicos são todas as ondas de frequência múltipla inteira da fundamental, ou seja, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz,... Então, os harmônicos podem ser definidos como sinais senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sinal de alimentação e representam uma forma matemática de analisar a distorção de uma forma de onda, seja ela de tensão ou de corrente. Esta análise é feita através da decomposição de uma onda utilizando a série de Fourier.

A Figura 3 apresenta uma onda de tensão qualquer decomposta em suas componentes: fundamental e 5ª harmônica. A Figura 4 mostra a forma de onda da tensão total, que é a resultante da soma das duas componentes apresentadas na Figura 3.



**Figura 3 – Onda Fundamental com a sua 5ª Harmônica.**



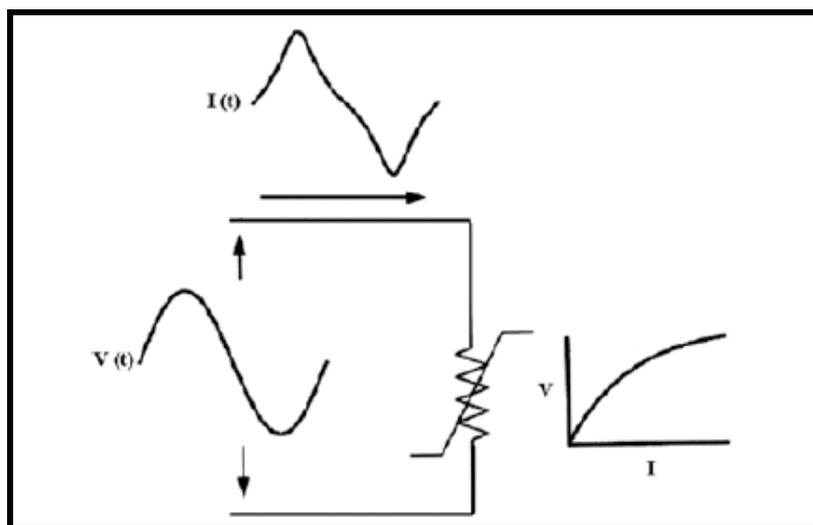
**Figura 4 – Onda resultante da soma da fundamental e a 5ª Harmônica.**

As frequências harmônicas se dividem em dois tipos: pares e ímpares, sendo que as harmônicas ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral, onde os sinais são simétricos, e as harmônicas pares existem nos casos onde há assimetria do sinal, devido à presença de componente contínua (PROCOBRE, 2001).

As harmônicas que causam maior distorção na onda da corrente são geralmente as de ordem ímpar e, quanto menor sua frequência, maior será esta distorção.

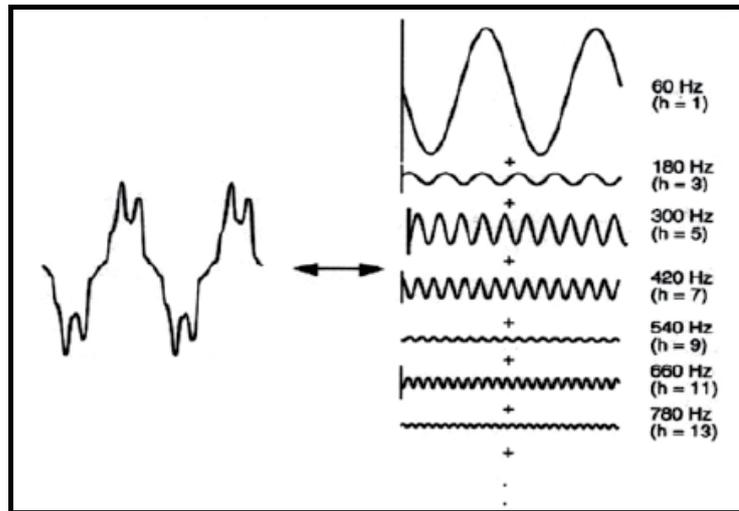
Dos problemas da qualidade da energia relacionados com distorção de sinais, somente os causados por correntes de frequências harmônicas serão estudados neste trabalho. Outros tipos de distorção, tais como: deslocamentos por componente contínua, inter-harmônicos, notching e ruídos não fazem parte deste trabalho.

É importante sempre lembrar que esta distorção é causada por dispositivos não-lineares. A Figura 5 ilustra o caso de uma tensão senoidal aplicada a um simples resistor não-linear, no qual a tensão e a corrente variam de acordo com a curva apresentada. Enquanto a tensão aplicada é puramente senoidal, a corrente resultante é distorcida. Esta situação ilustra o surgimento das distorções harmônicas na rede elétrica (BELCHIOR, OLIVEIRA E OLIVEIRA, 2009).



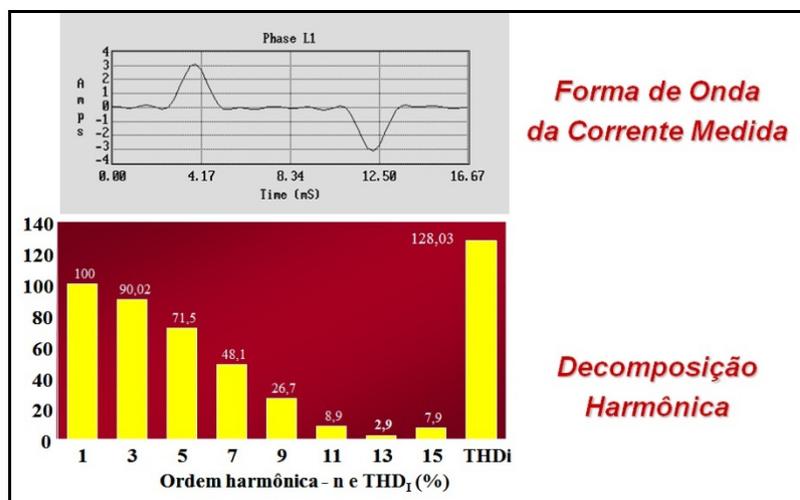
**Figura 5 - Comportamento Tensão versus Corrente de um Dispositivo Não-Linear.**

Esta distorção é também conhecida de forma ampla por uma onda não-senoidal (distorcida), como se pode ver na Figura 6. Nesta mesma figura podemos notar de forma geral o que acabamos de escrever. A onda distorcida é obtida através do somatório da onda fundamental e de suas ondas de frequência múltipla, suas harmônicas.



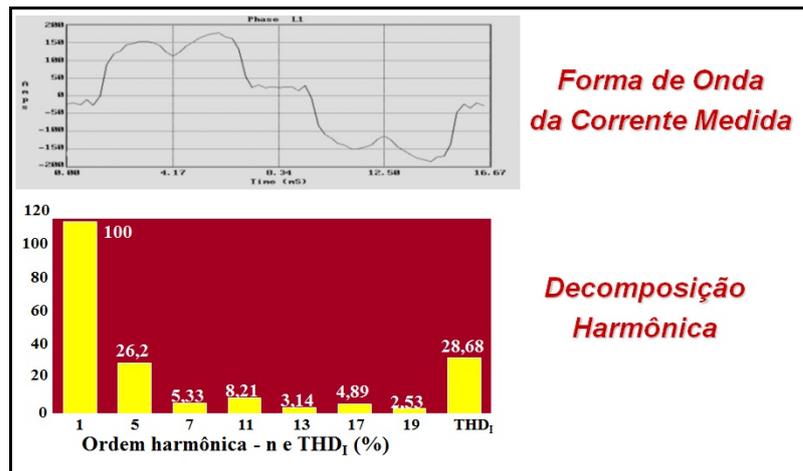
**Figura 6 - Decomposição de uma forma de Onda por meio da Série de Fourier.**

A figura 7 traz a forma de onda da corrente medida e a decomposição harmônica de uma fonte chaveada muito utilizada em equipamentos eletro-eletrônicos. A forma de onda medida não é uma senoíde, logo podemos observar que a decomposição harmônica é muito grande.



**Figura 7 – Geração de harmônicos por Fonte Chaveada.**

Já na Figura 8, podemos ver a forma de onda da corrente medida e a decomposição da mesma em harmônica de um No-Break. A forma de onda é quase uma senoíde, não existindo assim harmônicas que prejudicassem a rede elétrica, pois este sinal será somado aos outros, os quais irão contribuir para o aumento do THD em um ponto de acompanhamento comum – PAC.



**Figura 8 – Geração de harmônicos por No-Break.**

#### 2.4.2 – Indicadores de Harmônicos

Existem alguns indicadores que permitem quantificar e avaliar a distorção harmônica de uma onda de tensão e/ou corrente, e são importantes na determinação de eventuais ações corretivas. A determinação desses indicadores pode ser feita por aparelhos microprocessados, compostos por analisadores numéricos baseados em algoritmo utilizando a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), que calculam:

- ✓ Os valores (as amplitudes e as fases) das harmônicas para um grande número de janelas temporais de observação e fornecem, quase em tempo real, as decomposições espectrais simultâneas de tensões e de correntes, e;
- ✓ Os valores dos indicadores do nível de harmônicas (fator de potência, fator de crista, potência de distorção e taxa de distorção harmônica individual e total).

Para os sistemas elétricos trifásicos com ligação estrela aterrada, essas medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase - neutro e, para as demais configurações de sistemas trifásicos, através das tensões fase-fase (ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008).

Com base nestes procedimentos (ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008), o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25ª ordem harmônica ( $h_{\min} = 25$ ).

#### 2.4.3 – Distorção Harmônica Total

De uma maneira geral, a distorção harmônica total THD (do inglês Total Harmonic Distortion) é um índice utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos presentes numa onda de um sinal qualquer. Em outras palavras, a THD é um índice essencial, pois, com um só valor, mostra o quanto uma onda está distorcida em relação à onda senoidal original (RESENDE, 2007).

Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o valor de THD é 0%. Já para algumas ondas muito distorcidas, tais como correntes de alguns aparelhos eletrônicos, a THD pode chegar a 100% (PIRES, 2006).

A THD é uma notação bastante utilizada para definir a importância do conteúdo harmônico de um sinal alternado. Normalmente é expresso como sendo:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N V_n^2}}{V_1}$$

(equação 2)

Onde  $V_1$  é a tensão fundamental e  $V_n$  é a tensão harmônica de ordem n.

#### 2.4.4 - Fator de Potência

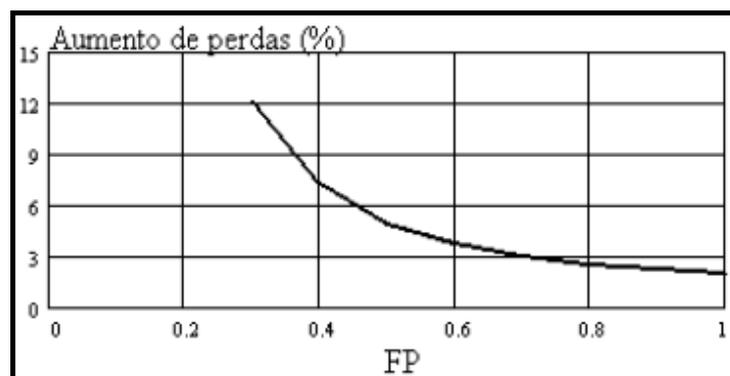
Define-se como Fator de Potência (FP) de uma instalação o quociente entre as Energias Ativa (P) e a Energia Aparente (S), ou seja (FERNANDES E BAESSO, 2007):

$$FP = \frac{\text{Energia Ativa (P)}}{\text{Energia Aparente (S)}}$$

(equação 3)

No Brasil, a ANEEL regulamentou através da Resolução n°: 456, de 29 de novembro de 2000 (ANEEL RES. 456, 2000), que o fator de potência mínimo de uma instalação elétrica consumidora será de 92%, e que para algumas classes de equipamentos este limite pode chegar até 97%.

O que podemos observar na equação (3) é que para uma dada energia ativa, quanto menor o Fator de Potência, maior será a energia reativa, isso porque as perdas de transmissão de energia elétrica são proporcionais ao quadrado da corrente eficaz que circula pelos condutores e, conseqüentemente, a corrente pelos condutores. A figura 9 mostra exatamente o que acabamos de descrever.



**Figura 9 - Relação entre as perdas e o fator de potência.**

Pode-se observar que quanto maior o FP menor a perda de energia.

#### 2.4.5 – Problemas causados pelos Harmônicos

Os principais problemas causados pela circulação de correntes harmônicas na rede elétrica são:

- ✓ Sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz;
- ✓ Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das correntes harmônicas de 3ª ordem;
- ✓ Sobrecarga, vibrações e envelhecimento de alternadores, transformadores e motores;
- ✓ Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação reativa;
- ✓ Deformação da tensão de alimentação;
- ✓ Atuação indevida de sensores e equipamentos de proteção;
- ✓ Queima ou operação inadequada de aparelhos sensíveis;
- ✓ Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas, e;
- ✓ Erros de medição.

Para combater estes problemas não é preciso acabar com todas as harmônicas da rede, mas sim com aquelas que têm maior influência, isto é, eliminar aquelas que estão presentes em maior intensidade (amplitude).

Apesar da existência de equipamentos, no mercado, com capacidade de medir harmônicos de ordens até superiores a 50, as harmônicas mais significativas são as ímpares da 3ª à 13ª ordem, que atualmente causam maior distorção no sistema elétrico.

Nos últimos anos, os efeitos dos harmônicos no sistema elétrico e em seus componentes passaram a ter uma atenção importante para os níveis de Qualidade da Energia Elétrica - QEE.

## 2.5 – FILTROS HARMÔNICOS

Nesta seção serão apresentados alguns conceitos sobre tipos de filtros harmônicos e suas aplicações. Nesse sentido, é possível encontrar diversas técnicas para reduzir as distorções harmônicas de tensão e/ou corrente. Estas técnicas podem ser:

- ✓ Uso de filtros passivos conectados em paralelo e/ou em série;
- ✓ Inserção de reator em série na linha C.A.;
- ✓ Aumento da quantidade de pulsos em unidades conversoras, com o uso de transformadores defasadores;
- ✓ Técnicas de compensação de fluxo magnético;
- ✓ Filtros ativos de potência conectados em paralelo e/ou em série, e o;
- ✓ Uso de dispositivos eletromagnéticos.

A definição de qual técnica deverá ser adotada, ou mesmo, a associação entre elas, deve ser baseada na análise dos seguintes aspectos:

- ✓ Conhecimento do sistema de alimentação do ponto de vista da concessionária;
- ✓ Conhecimento do sistema consumidor;
- ✓ Local da instalação do dispositivo para redução de harmônicos;
- ✓ Desempenho e capacidade nominal de tensão/corrente do dispositivo;
- ✓ Custo inicial de compra e custo da energia consumida no próprio dispositivo;
- ✓ Efeitos colaterais prejudiciais sobre o sistema de alimentação;
- ✓ Efeitos colaterais prejudiciais ao funcionamento das cargas elétricas envolvidas;
- ✓ Influências nocivas das variações do sistema sobre o dispositivo utilizado, e a;
- ✓ Influência da carga sobre a técnica utilizada;

Entre as técnicas acima descritas como possíveis estratégias para a diminuição ou até mesmo eliminação das correntes harmônicas, aquelas associadas ao emprego dos filtros são comumente as mais empregadas. Devido a este fato, discutimos agora a técnica que será utilizada neste trabalho: Filtros Harmônicos Passivos.

Os filtros, de uma maneira geral, são circuitos de seleção de frequência capazes de escolher certos sinais de entrada, com base na frequência, e separá-los de outros sinais. Nenhum filtro é capaz de separar totalmente as frequências desejáveis das indesejáveis. Na verdade, o que ocorre é uma atenuação dos sinais indesejáveis e a transmissão dos desejáveis, com um mínimo de atenuação. Sendo assim, o principal objetivo dos filtros de harmônicos é reduzir a amplitude de tensões e correntes de uma ou mais frequências harmônicas indesejáveis.

São utilizados dois tipos de filtro de harmônicos, a saber, Passivos e Ativos, assim classificados em função da natureza dos componentes utilizados.

Os filtros passivos são aqueles que possuem componentes passivos, resistivo (R), indutivo (L) e capacitivo (C), que desviam os harmônicos gerados pelas cargas não lineares, prevenindo a circulação destes nos componentes da rede mais susceptíveis a danos. Topologicamente são equipamentos de dois terminais, geralmente ligados em conexão trifásica estrela. Podem ser utilizados no sistema elétrico na configuração em:

- ✓ Série - objetivando barrar os harmônicos de tensão provenientes da rede elétrica para o consumidor;
- ✓ Paralela (derivação) - visando limpar a rede elétrica de correntes harmônicas, provenientes do consumidor que utiliza cargas não-lineares, e;
- ✓ Série - Paralela, utilizado para minimizar correntes harmônicas no neutro.

Os filtros passivos em derivação e em série apresentam vantagens e desvantagens, de acordo com o tipo de aplicação. Entretanto, a utilização de filtros passivos ligados em derivação ou shunt é a mais difundida para a redução de

harmônicos. Este tipo de filtro têm sido amplamente estudado e aplicado em sistemas elétricos. Ao longo de vários anos, devido a fatores científicos, tecnológicos e econômicos, esta técnica tem se firmado como a solução mais tradicional para a redução de harmônicos. Os filtros passivos podem ser classificados em dois grupos: sintonizados e amortecidos.

A principal desvantagem dos filtros passivos em série é ter que conduzir toda corrente de carga, o que torna seu custo maior, além das dificuldades relacionadas com o isolamento elétrico dos componentes L e C deste filtro, entre outras.

Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes formados por elementos R, L e C em série ou combinações série - paralela destes elementos de circuito. Nestes filtros, os elementos capacitivos e indutivos são escolhidos de modo que os circuitos apresentem baixa impedância para as freqüências que eles devem filtrar, ou seja, para as freqüências ressonantes.

Os filtros amortecidos são circuitos formados por capacitores, indutores e resistores em diversas combinações e apresentam baixa impedância predominantemente resistiva ao longo de uma larga faixa de freqüências.

Outra função dos filtros sintonizados e amortecidos é que, para freqüências abaixo da freqüência de ressonância ou sintonia, apresentam impedância capacitiva, podendo também, funcionar como compensadores reativos para a freqüência fundamental.

Os filtros passivos são mais baratos que filtros ativos. Porém, para a boa performance do filtro passivo é necessário um capacitor em condições de fornecer uma grande compensação capacitiva na freqüência fundamental. Um inconveniente deste filtro é a inconstância do seu desempenho devida à variabilidade da carga, na qual o filtro está conectado. Além disto, podem ainda ocorrer ressonâncias do filtro com o sistema elétrico.

Os filtros ativos são aqueles compostos por elementos com eletrônica embarcada em conjunto com elementos passivos, que fornecem o conteúdo harmônico necessário a uma carga não-linear, limpando a rede da circulação destes harmônicos.

Para os filtros ativos terem um bom desempenho, necessitam ter uma potência igual ou superior à carga não-linear a ser filtrada, tornando-se, em alguns

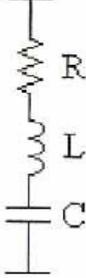
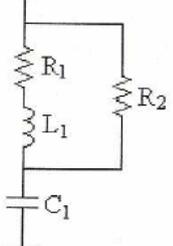
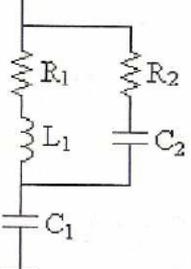
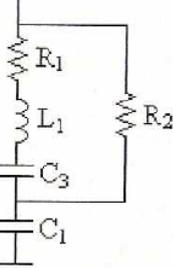
casos, economicamente inviáveis. Entretanto, têm seu desempenho constante independente da variabilidade da carga, desde que respeitado os limites de carga do filtro. Os filtros ativos, por não serem objeto desse trabalho, não serão estudo aqui.

### 2.5.1 – Filtros Passivos

A maneira mais comum de mitigação de harmônicos é através da utilização de filtros, e a solução mais clássica é a utilização de filtros passivos em derivação. Ao longo de vários anos, devido a fatores tecnológicos, científicos e econômicos, estes têm se firmado como a solução mais viável para redução de harmônicos. Entretanto, a tarefa de projetar filtros passivos para a rede de distribuição não é tão trivial. Isto porque a interação entre um filtro e o sistema elétrico, onde este está conectado, é muito complexa e requer um bom projeto, que leva em consideração as características peculiares das cargas e do próprio sistema de distribuição, além de atender os requisitos das normas e recomendações específicas (IEEE 519, 1992), (ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008), (IEEE 1531, 2003).

Via de regra, as empresas supridoras de energia já dispõem das informações relativas às impedâncias que modelam as características do seu sistema elétrico. Não obstante, pode-se dizer que a maior carência da área hoje é obter as informações no que tange às cargas consumidoras, onde muito pouco, ou quase nada, se conhece sobre suas impedâncias harmônicas.

A Figura 10, a seguir, ilustra os tipos de filtros passivos (RLC) em derivação existentes e a sua classificação quanto à característica de frequência (RESENDE, 2007).

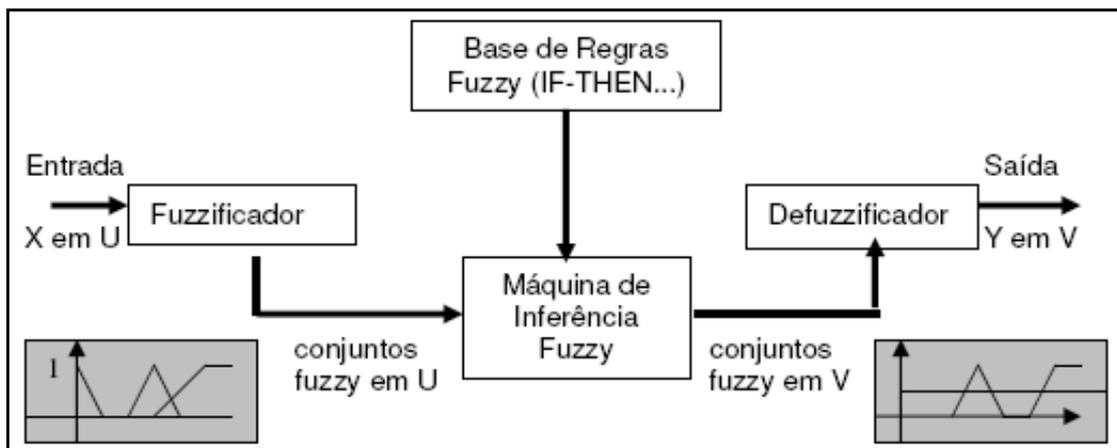
Tipo de Filtro	Circuito por Fase
Sintonizado	
Amortecedor de 1ª ordem	
Amortecedor de 2ª ordem	
Amortecedor de 3ª ordem	
Amortecedor Tipo C	

**Figura 10 – Tipos de Filtros Passivos.**

## CAPÍTULO 3 – LÓGICA FUZZY

Durante a década de 60, mais precisamente em 1965, segundo Feitosa (FEITOSA,1992), o professor L. A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, que trabalhava com Inteligência Artificial, achava que a teoria usual de conjuntos era por demais rígida, para contemplar fenômenos quotidianos do dia a dia. Uma vez que, os sistemas especializados, os quais estava interessado em implementar, eram softwares interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, sustentadas apenas pela teoria usual de conjuntos, a qual admite apenas decisões binárias, ou seja, o “verdadeiro” e o “falso”. Não seria possível utilizá-los satisfatoriamente, abrangendo toda a gama de decisões da mente humana para interpretar estes fenômenos.

Genericamente, um sistema *Fuzzy* é composto de quatro componentes conforme especificado na figura 11:



**Figura 11 - Organização básica de um Sistema *Fuzzy*.**

Com os estudos realizados sobre os conjuntos *Fuzzy*, surgia a possibilidade de interpretar os fenômenos não quantitativos e vagos, porém, surgia também, a necessidade de dar a esta teoria uma estrutura matemática completa e consistente.

Como os sistemas lógicos estão intimamente relacionados com a teoria de conjuntos, Zadeh, vislumbrou a possibilidade da construção de uma lógica, capaz de adequar os conjuntos *Fuzzy*, aos padrões dos sistemas lógicos já consagrados.

Na Lógica Clássica, o valor verdade de uma proposição assumirá, somente, o valor falso (0) ou o valor verdadeiro (1) e, necessariamente, terá que assumir um desses dois, não havendo outra possibilidade. Já na Lógica *Fuzzy*, o valor verdade de uma proposição, pode ser um subconjunto *Fuzzy* de qualquer conjunto parcialmente ordenado. Geralmente é adotado o  $[0,1]$ , que é o intervalo fechado de números reais. Assim, na Lógica *Fuzzy*, não existem apenas o verdadeiro (1) e falso (0), mas uma infinidade de valores verdades, os quais são expressões lingüísticas interpretadas como subconjuntos *Fuzzy* do intervalo unitário.

Por exemplo: falso, muito falso, um pouco falso, mais ou menos falso, um pouco verdadeiro, pouco verdadeiro, muito verdadeiro, verdadeiro, etc.

Na Lógica Clássica, os predicados são termos exatos como: igual a, maior que, ímpar, primo, etc. Na Lógica *Fuzzy*, os predicados são termos subjetivos, indefinidos ou nebulosos como: magro, alto, úmido, quente, velho, etc.

Outro aspecto que difere as duas lógicas é quanto aos quantificadores, que na Lógica Clássica existem apenas os quantificadores: universal ( $\forall$ ) e o existencial ( $\exists$ ). Conforme Feitosa (FEITOSA, 1992) e Cruz (CRUZ, 1996), a idéia de Zadeh se torna interessante, na medida em que associa a cada elemento de um conjunto um certo número real do intervalo  $[0,1]$ . Sendo que, cada conjunto corresponde a um predicado lógico e os elementos do conjunto aos objetos que satisfazem o predicado. Pode-se dizer que esse número é o grau de verdade do objeto satisfazendo o predicado.

Definição: Seja  $V \neq \emptyset$ . Um conjunto *Fuzzy*  $\underline{A}$  é uma função  $f_A: V \rightarrow [0,1]$ , onde o conjunto  $\underline{V}$  é chamado o universo de  $\underline{A}$ , com  $\underline{A} \subseteq \underline{V} \times [0,1]$ ,  $[0,1]$  é o intervalo de números reais e  $f_A$  é denominado o conjunto verdade de  $\underline{A}$ . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto *Fuzzy*  $\underline{A}$  com a função  $f_A$ , ou seja,  $\underline{A} \equiv f_A$ .

Por exemplo: Seja  $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ . Então um conjunto *Fuzzy*  $\underline{A}$  poderia ser do tipo:  $V = \{(x_1; 0.3), (x_2; 0.7), (x_4; 0.1)\}$ .

É conveniente observar que, cada elemento do conjunto *Fuzzy*  $\underline{A}$  possui um valor verdade em  $[0,1]$  e que  $\underline{A}$  é formado por pares ordenados, uma vez que,  $A \subseteq V \times [0,1]$ . Assim, o valor verdade, também chamado de “Grau de Aderência” ou “Grau de Pertinência”, do elemento  $x_1$  é 0,3, ou seja,  $f_A(x_1) = 0,3$ . Por convenção, os elementos que tiverem grau de aderência (valor verdade) igual a zero, não precisam ser representados no conjunto, que é o caso do elemento  $x_3$ , ou seja,  $f_A(x_3) = 0$ , ou ainda  $(x_3; 0) \in \underline{A}$ . Também por convenção, todos os elementos do conjunto universo  $\underline{V}$  possuem grau de aderência igual a 1, grau este que não precisa ser representado.

Sejam  $\underline{V}$  o conjunto universo e dois conjuntos *Fuzzy*  $A = \{(x, f_A(x)), \forall x \in V\}$  e  $B = \{(x, f_B(x)), \forall x \in V\}$ . Então:

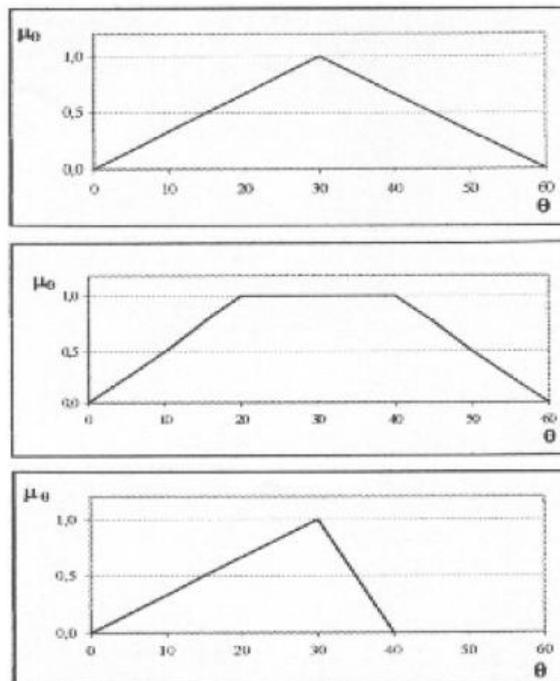
- ❖ Igualdade de conjuntos:  $A = B \Leftrightarrow f_A(x) = f_B(x), \forall x \in V$ .
- ❖ Conjunto Vazio:  $A = \emptyset \Leftrightarrow f_A(x) = 0, \forall x \in V$ .
- ❖ Conjunto Universo:  $A = V \Leftrightarrow f_A(x) = 1, \forall x \in V$ .
- ❖ União de conjuntos:  $A \cup B = \{(x, \max [f_A(x), f_B(x)], \forall x \in V\}$ . Usa-se a notação:  $\max [f_A(x), f_B(x)] = f_A \vee f_B$ , onde  $\vee$  é o conectivo “ou”.
- ❖ Intersecção de conjuntos:  $A \cap B = \{(x, \min [f_A(x), f_B(x)], \forall x \in V\}$ . Usa-se a notação:  $\min [f_A(x), f_B(x)] = f_A \wedge f_B$ , onde  $\wedge$  é o conectivo “e”.
- ❖ Conjunto Complementar: denotado por  $\neg A$ :  $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x), \forall x \in V$ . É interessante notar que, para a linguagem *Fuzzy* são usados os conectivos:  $\wedge$  (e);  $\vee$  (ou);  $\neg$  (negação) e  $\rightarrow$  (se... então). O  $\wedge$  modelado pelo mínimo, o  $\vee$  pelo máximo,  $\neg$  pelo complementar, isto é, negar uma frase  $\underline{A}$  de valor lógico (grau de aderência)  $f_A(x)$  é tomar o seu complementar  $\neg A$ , de valor lógico  $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x)$ . Já o conectivo  $\rightarrow$ , chamado de implicação, é modelado por:  $a \rightarrow b = 1 \wedge (1 - a + b)$ .

Dessa forma, uma sentença *Fuzzy* pode admitir outros valores - verdade e não somente falsa (0) ou verdadeira (1). Na Lógica Clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não. Dado um conjunto universo  $\underline{U}$  e um elemento  $x \in U$ , o grau de pertinência  $f_A(x)$ , o qual, de agora em diante, denota-se por  $\mu_A(x)$ , com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$  é dado pela função  $\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$ , chamada de Função Característica definida pela equação:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (4)$$

Zadeh (ZADEH, 1987) propôs uma caracterização mais ampla, fazendo com que a passagem da pertinência para não pertinência fosse mais lenta e gradual, na medida em que sugere que alguns elementos são mais pertinentes de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor (0) indica uma completa exclusão e o valor (1) representa a completa pertinência ou inclusão. Esta generalização aumenta o poder da função característica.

Por exemplo, para expressar a idéia de que uma temperatura tem seu valor perto de 30°C pode-se utilizar uma função de pertinência triangular ilustrada na Figura 12, onde os valores maiores e menores que 30°C são distribuídos simetricamente, com máximo grau de pertinência em 30°C, para sugerir a idéia de que quanto mais perto a temperatura de 30 °C, mais ele se identifica com o valor representado.

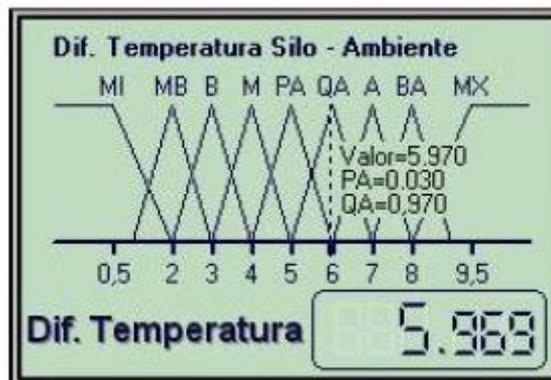


**Figura 12 – Função de Pertinência.**

Outro fenômeno poderia ser caracterizado pela função trapezoidal ilustrada na Figura 12(b), a qual expressa qualquer temperatura entre 20°C e 40°C, ter a mesma importância que a temperatura central de 30°C. Se a necessidade é fazer com que os valores menores que 30°C tenham pertinência maior dentro do conjunto e, restringir este fato aos valores maiores, pode ser usada outra função triangular ilustrada na Figura 12(c), a qual vem de encontro ao que se deseja representar.

Conceitos são de uma forma geral, expressos por elementos qualitativos como: muito, não muito, mais ou menos, pouco quente, um tanto baixo, ao invés de valores quantitativos. Esses elementos qualitativos são resgatados através de variáveis lingüísticas, as quais assumem valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras e frases, ao invés de assumirem valores numéricos.

Por exemplo, a variável lingüística temperatura poderia assumir valores no conjunto: mínima (MI), muito baixa (MB), pouco baixa (PB), média (MD), pouco alta (PA), muito alta (MA), máxima (MX). Para se atribuir um significado aos termos lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto universo de discurso comum conforme ilustrado na Figura 13.



**Figura 13 - Universo de discurso da variável lingüística Temperatura.**

### 3.1 – APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Zadeh (ZADEH, 1987), criador da Lógica *Fuzzy*, demonstra em seus trabalhos, a capacidade de tal teoria interpretar os fenômenos não exatos do nosso dia-a-dia. Daí sua aplicabilidade.

Apesar disso, os matemáticos não consideram a Lógica *Fuzzy* como uma Lógica Matemática nos padrões atuais, ou seja, ela não é, ainda, uma teoria matemática perfeitamente consistente e completa, uma vez que ela deixa de satisfazer algumas propriedades da Lógica Clássica, principal responsável para ditar a veracidade de uma teoria matemática. Isso, no entanto, não inviabiliza a Lógica *Fuzzy* como uma teoria matemática perfeitamente aplicada (CRUZ, 1996).

Segundo outro autor, Ivanqui (IVANQUI, 2005), existem diversas áreas que estão sendo beneficiadas pelo uso da Lógica *Fuzzy*, a exemplo:

- ✓ Em câmeras de vídeo, são aplicados ao foco automático e ao controle da íris da câmera;
- ✓ Em máquinas de lavar com a utilização de sensores de temperatura da água, concentração de detergente, peso das roupas, nível de água, etc;
- ✓ Em fornos de microondas, com informações obtidas a partir de sensores;
- ✓ Em aparelhos de ar-condicionado com o controle da umidade e temperatura, e;
- ✓ Manutenção de motores elétricos, verificação das condições de vibração dos motores com a finalidade de estabelecer procedimentos de manutenção.

Para Barbosa (1995), a aplicação da Lógica *Fuzzy* no controle de motores CC, facilitou, sensivelmente, o desenvolvimento de tais aparelhos, tornando-os mais precisos, capazes de interpretar com mais exatidão os fenômenos elétricos de um motor.

Especialistas em programação, como Tanaka e Mizumoto (1974), consideram a Lógica *Fuzzy*, no que diz respeito aos modelos matemáticos, muito mais adequada a programação, sugerindo softwares *Fuzzy* de fácil entendimento, capazes de serem usados em várias simulações reais. Estas afirmações são corroboradas por (CHANG, 1974), que também trabalha com representação e execução de programas *Fuzzy*.

### 3.2 – BASE DE REGRAS

A base de regras tem por objetivo representar de forma sistemática a maneira como o controlador gerenciará o sistema sob sua supervisão (DRIANKOV, 1996). A forma mais geral de uma regra lingüística é:

**SE** premissa **ENTÃO** conseqüência

Para Driankov (1996) e Ross (1995), as premissas também chamadas de antecedentes são associadas com as entradas do controlador *Fuzzy* e formam a parte das regras representada à esquerda, enquanto as conseqüências, que também são conhecidas como ações, estão associadas às saídas dos controladores.

Relacionadas às variáveis lingüísticas do processo, pode-se estabelecer os antecedentes – ou estados do processo – (DRIANKOV, HELLENDORN E REINFRANK, 1996) e associá-los com ações de controle. Para exemplificar a utilização da base de regras, toma-se como exemplo o controle de uma caldeira, onde se estabelece uma relação entre a temperatura interna da unidade, com a vazão necessária de água para o seu resfriamento, o que produz as seguintes regras:

**SE** temperatura é alta **ENTÃO** vazão de água é alta

**SE** temperatura é baixa **ENTÃO** vazão de água é baixa

**SE** temperatura é estável **ENTÃO** vazão de água é normal

Aparentemente simples, o exemplo dado é capaz de manter estável a temperatura em uma caldeira, desde que os conjuntos *Fuzzy* envolvidos tenham uma definição condizente com a realidade. O que vale observar é que para cada estado do processo é relacionada uma ação de controle (VIEIRA, 1999).

Este conjunto demonstra que a base de regras *Fuzzy* é bastante intuitiva, do ponto de vista humano. É como o clássico exemplo de estacionar um veículo em

uma vaga, virando-o um pouco mais para a esquerda ou para direita. Não existe, neste caso, uma formulação matemática explícita envolvida na solução do problema, mas sim a representação de um conhecimento adquirido pelo operador, o que justifica a dificuldade encontrada pelos iniciantes em estacionar um carro e a facilidade com que os motoristas com mais prática executam as manobras necessárias. (IVANQUI, 2005).

Portanto é este conhecimento – o da experiência – que as regras *Fuzzy* representam, sendo perfeitamente inteligível o seu significado.

Numa base de regras, há sempre um número finito de regras que pode ser estabelecida, depois que se determina o número de entradas e saídas necessárias ao sistema de controle, e que se escolhe os predicados lingüísticos (número, distribuição e forma das funções de pertinência) para cada uma destas variáveis.

De forma resumida, podemos dizer que o conhecimento humano pode ser representado na forma de regras *Fuzzy* “IF-THEN”. A base de regras *Fuzzy* consiste de um conjunto de regras “IF-THEN”, sendo considerada o coração de um sistema *Fuzzy*, uma vez que todos os outros componentes são usados para implementar as regras de modo eficiente e razoável.

A base de regras deve ser constituída de conjuntos *Fuzzy* completos, consistentes e contínuos. Conjunto de regras *Fuzzy* é dito completo quando para qualquer entrada existe uma regra na base de regras, é dito consistente quando não existem regras com a mesma parte “IF” e diferentes partes “THEN”, isto é, a base de regras não pode conter regras conflitantes e, é dito contínuo quando não existem regras vizinhas na parte “THEN” cuja interseção dos conjuntos *Fuzzy* seja vazia.

### 3.3 – FUZZIFICAÇÃO

A *Fuzzificação* é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos difusos. O grau de pertinência é determinado por uma função de pertinência que foi definida com base na experiência ou intuição. Funções de

pertinência são o meio pelo qual um controlador é sintonizado para alcançar respostas desejadas a determinadas entradas (CABRAL, 1994).

Conforme Fernandes (FERNANDES, 1997), o tipo e a quantidade de funções de pertinência usadas em um sistema dependem de: (i) precisão; (ii) estabilidade; (iii) facilidade de implementação; (iv) manipulação e (v) manutenção. Portanto, nessa etapa, Mattos (2001), cita que os valores numéricos são transformados em graus de pertinência e associados a uma variável lingüística. Permitindo uma ligação entre os termos lingüísticos (frio, próximo, quente, dentre outros) e as funções de pertinência.

O número e a forma das funções de pertinência em conjuntos difusos são escolhidos dependendo da exatidão, resposta, estabilidade, facilidade de implementação, manipulação e manutenção requeridas pelo sistema (MATTOS, 2001).

As funções de pertinência triangulares e trapezóides são as mais comuns, e têm provado serem boas em efetividade e eficiência.

Os conjuntos difusos devem abranger o eixo X, cobrindo todo o intervalo, ou o universo de discurso, para uma entrada de um sistema, mapeando para o intervalo de 0 a 1 do eixo Y as pertinências de uma entrada. Sobreposição entre limites de conjuntos é desejável e a chave para a operação suave do controlador. São permitidas pertinências em múltiplos – até mesmo em contraditórios – conjuntos (CABRAL, 1994).

Dessa forma a principal função de um fuzzificador é converter os valores reais de entrada (escalar ou vetorial) em conjuntos *Fuzzy* para que sejam tratados pela máquina de inferência. Dentre os fuzzificadores mais utilizados, podemos destacar:

- ✓ Singleton: simplifica os cálculos da máquina de inferência, mas não suprime o ruído.
- ✓ Gaussiano: pode simplificar os cálculos na máquina de inferência caso seja usada função de pertinência Gaussiana nas regras *Fuzzy*. Pode suprimir ruídos da entrada.

- ✓ Triangular: simplifica os cálculos na máquina de inferência se for usada função de pertinência Triangular nas regras *Fuzzy*. Pode suprimir ruídos da entrada.

### 3.4 – MÁQUINA DE INFERÊNCIA *FUZZY*

Depois das variáveis lingüísticas serem interpretadas, por meio da *Fuzzificação*, a próxima etapa é a descrição das situações nas quais há reações, ou seja, a determinação das regras SE - ENTÃO.

O lado SE (IF) de uma regra contém uma ou mais condições, chamadas antecedentes que constituem uma premissa; o lado ENTÃO (THEN) contém uma ou mais ações chamadas conseqüentes (CABRAL, 1994).

O antecedente da regra contém uma ou mais condições, o conseqüente contém uma ou mais ações. O antecedente corresponde diretamente aos graus de pertinência calculados durante o processo de *Fuzzificação*. Cada antecedente tem um grau de pertinência indicado para ele como resultado da *Fuzzificação*. Durante a avaliação das regras (a inferência), a intensidade é calculada com base em valores dos antecedentes e estão indicadas para saídas difusas da regra (FERNANDES, 1997).

Nesta máquina, os princípios da lógica *Fuzzy* são usados para combinar as regras *Fuzzy* "IF-THEN" existentes na base de regras em um mapeamento de um conjunto *Fuzzy* de entrada para um conjunto *Fuzzy* de saída.

Existem dois modos de inferir em um conjunto de regras: inferência baseada em composição e baseada em regras individuais.

Na inferência baseada em composição todas as regras da base de regras são combinadas com uma relação *Fuzzy* simples, união ou interseção, essas combinações podem ser a de Mamdani (norma S) ou de Gödel (norma T). Na inferência baseada em regras individuais, cada regra da base de regras determina um conjunto *Fuzzy* de saída e a saída da máquina de inferência é a combinação dos vários conjuntos *Fuzzy* individuais, a combinação pode ser feita pela união ou interseção.

Existe uma variedade de escolhas para máquinas de inferência. De um modo geral, os seguintes critérios devem ser considerados para escolha:

- ✓ Apelo Intuitivo - a escolha pode ser feita de modo intuitivo, por exemplo, um especialista humano fornece um conjunto de regras que ele acredita serem independentes umas das outras, então elas podem ser combinadas com a união.
- ✓ Eficiência Computacional - é calculada por uma fórmula bastante simples.
- ✓ Propriedades Especiais - Algumas escolhas podem resultar em uma máquina de inferência que tem propriedades especiais, se essas propriedades são desejáveis então faremos esta escolha.

A seguir, relacionamos algumas máquinas de inferência utilizadas em sistemas *Fuzzy*:

- ✓ Produto;
- ✓ Mínimo;
- ✓ Lukasiewicz;
- ✓ Zadeh, e;
- ✓ Dienes-Rescher.

Dentre estas, o Produto e o Mínimo são as mais utilizadas, uma vez que elas têm simplicidade computacional e apelo intuitivo.

### 3.5 – DEFUZZIFICAÇÃO

A *Defuzzificação* converte um conjunto difuso de saída de um sistema em um valor clássico correspondente. Este processo é importante para decifrar o significado das ações difusas usando funções de pertinência e também para resolver conflitos entre ações de competição (MATTOS, 2001).

A avaliação das regras associa potências (intensidade) para cada ação específica na atividade de inferência. Contudo, outro processamento, ou *Defuzzificação*, é necessário que seja executado por duas razões: a primeira é decifrar o significado de ações vagas (difusas), utilizando funções de pertinência; a segunda é resolver os conflitos entre ações conflitantes, que podem ter sido acionadas durante certas condições na avaliação das regras (CABRAL, 1994).

Sendo assim, um defuzzificador é definido como um mapeamento de um conjunto *Fuzzy*, saída da máquina de inferência em um valor real. Isto é, especificar um ponto na saída que melhor represente o conjunto *Fuzzy*. Existem três critérios que devem ser considerados para a escolha de um defuzzificador.

- ❖ 2.1 Plausibilidade: o valor de saída é intuitivo.
- ❖ 2.2 Simplicidade Computacional: é importante uma vez que controladores *Fuzzy* operam em tempo real.
- ❖ 2.3 Continuidade: uma pequena troca no conjunto de saída da máquina de inferência não representa uma grande troca do valor real da saída.

Dentre os defuzzificadores propostos na literatura podemos mencionar: Centro de Gravidade, Centro Ponderado e Máximo Valor.

## CAPÍTULO 4 – ALGORITMO PROPOSTO

### 4.1 - INTRODUÇÃO

Nesta seção, abordaremos as etapas constituídas do algoritmo computacional proposto para detectar os coeficientes harmônicos fora dos parâmetros especificados, bem como, projetar e calcular um novo THD.

Em uma fase anterior, é importante ser dito que, com ajuda de um equipamento de medição de THD que atentam as normas IEC 6100 – 4 - 7 e a IEC 6100 – 4 – 30 foram realizadas medições na empresa cliente, onde foi gerada (disponibilizadas em arquivo eletrônico) uma tabela contendo os seguintes dados: identificação da fase, data e hora da leitura, os valores da corrente, tensão e mensurar os valores de suas componentes harmônicas até a 50ª ordem.

Em posse dos dados dessa tabela é que o algoritmo computacional proposto inicia o seu funcionamento, obedecendo as seguintes etapas:

Etapa 1: conforme parâmetro normativo especificado, o algoritmo computacional é parametrizado para que nenhum coeficiente harmônico seja maior ou igual a 5 % do THD calculado, conforme equação específica.

Etapa 2: dentro da Lógica *Fuzzy* e conforme especificação dos níveis aceitáveis para NB (Normal Baixo), ND (Normal Dentro) e F (Fora) baseados em limites normativos é feita a parametrização desses níveis e suas Regras, bem como a fuzzificação (relações).

Etapa 3: com os dados coletados em forma de arquivo eletrônico das medições realizadas, o algoritmo computacional inicia sua funcionabilidade calculando o valor do THD e o valor de referência para comparação de cada dos quarenta e nove coeficientes harmônicos.

Etapa 4: o algoritmo computacional mostra conforme parametrização realizada na etapa 2, se o THD está se aproximando do (NB) Normal Baixo, se

aproximando do (ND) Normal Dentro ou já passou do limite (F) Fora do parâmetro THD definido.

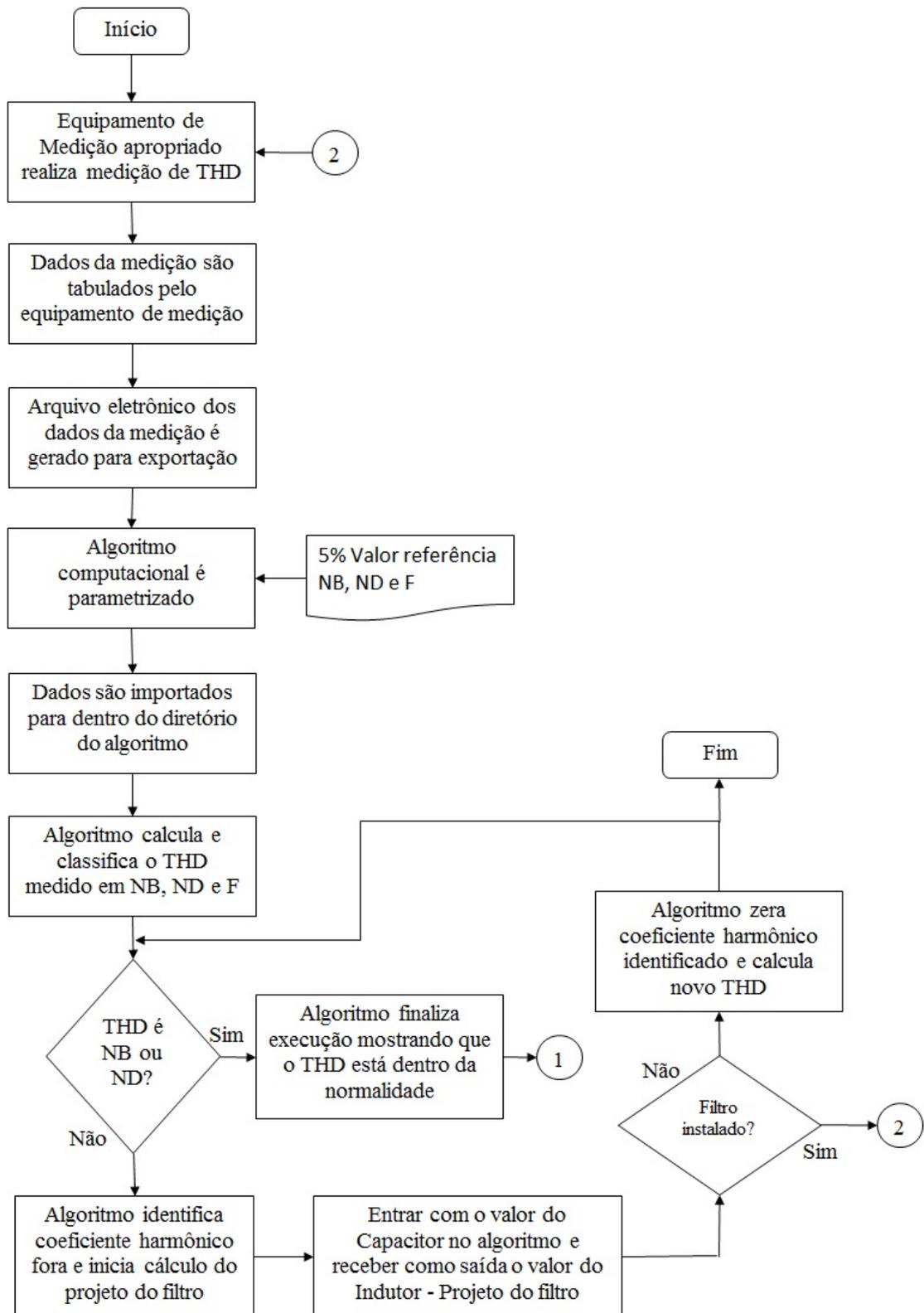
Etapa 5: para os níveis NB (Normal Baixo) e ND (Normal Dentro), o algoritmo computacional retornar saída como segura. Passando do limite F (Fora), o algoritmo entrar em outra fase, a qual identificará a frequência do coeficiente harmônico fora e efetuará o projeto do filtro harmônico passivo.

Etapa 6: dada uma gama de valores de capacitores comercializados, o usuário escolhe um valor de capacitor. O algoritmo computacional entende o valor do capacitor e calcula o valor do indutor.

Etapa 7: com os valores do capacitor e do indutor é projetado o filtro harmônico passivo, o qual implantado, filtraria a frequência dessa harmônica indesejável e o valor do THD cairia a valores aceitáveis.

Etapa 8: desse modo, o coeficiente harmônico dessa frequência foi reduzida a praticamente a zero, sendo assim, possível o cálculo de um novo THD imaginário, sendo somente apurado como verdadeiro após uma nova medição, um novo loop (retorno a etapa 1)

A Figura 14 mostra o fluxo das atividades inter-relacionadas do algoritmo computacional proposto.



**Figura 14 – Fluxograma Funcional do Algoritmo Computacional proposto.**

## CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO

### 5.1 - INTRODUÇÃO

Após um diagnóstico do sistema elétrico de baixa tensão de um consumidor final efetuado por um medidor de THD devidamente calibrado, um arquivo de texto será gerado com o coeficiente fundamental do THD de tensão e da corrente, bem como, os coeficientes das harmônicas medidas da 2ª até a 50ª ordem e suas frequências correlatas.

Desde ponto em diante a primeira parte do algoritmo do filtro será colocada em funcionamento, o qual irá analisar e detectar quais das componentes harmônicas estão fora do limite de 5% do coeficiente da frequência fundamental.

Identificada a componente harmônica e sua frequência correlata, o algoritmo do filtro gera automaticamente o projeto do filtro passivo. Para esta simulação foi gerado o arquivo SDTHD.txt.

É importante ressaltar que a partir desse ponto somente iremos enfatizar o THD de tensão, pois o mesmo cálculo servirá para o THD de corrente. Identificada a componente harmônica e sua frequência correlata, podemos definir o valor do capacitor e calcularmos o valor do indutor através da seguinte fórmula:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(equação 4)

O valor do capacitor definido pode ser escolhido conforme a Figura 15 (BOYLESTAD E NASHELSKY, 1999), a qual mostra diversos valores de capacitância típicas vendidas no comércio em micro ou pico-farady, tais como: 3.3, 4.7, 6.8, 10, 18 e 33 micro-farady.

QUADRO C.3 Valores Típicos dos Capacitores									
<i>pF</i>					<i>μF</i>				
10	100	1000	10000	0,10	1,0	10	100	1000	
12	120	1200							
15	150	1500	15000	0,15	1,5	18	180	1800	
22	220	2200	22000	0,22	2,2	22	220	2200	
27	270	2700							
33	330	3300	33000	0,33	3,3	33	330	3300	
39	390	3900							
47	470	4700	47000	0,47	4,7	47	470	4700	
56	560	5600							
68	680	6800	68000	0,68	6,8				
82	820	8200							

**Figura 15 - Valores Típicos dos Capacitores**

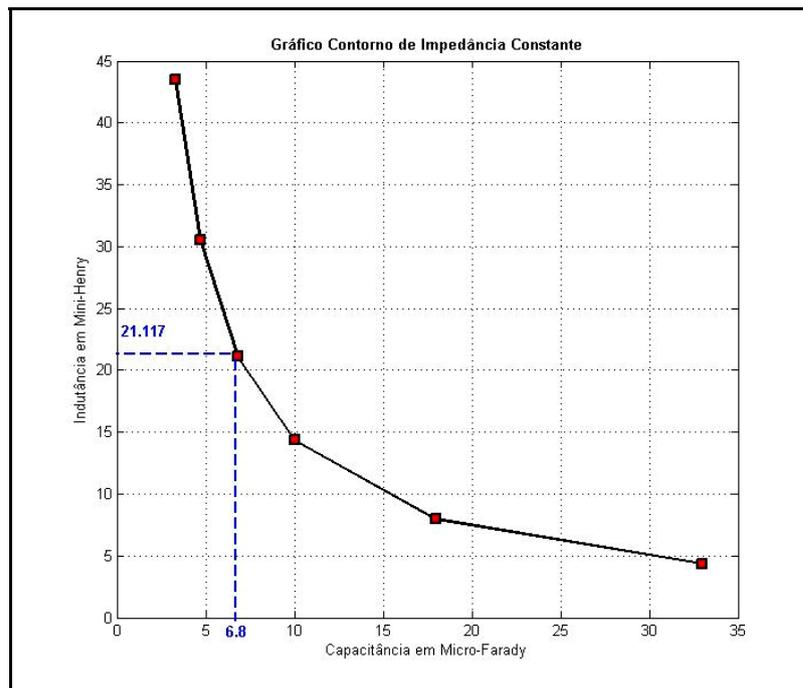
Uma vez definido o valor do capacitor durante a execução do algoritmo do filtro, o próprio algoritmo irá calcular o valor do Indutor. Outro fato importante que devemos ressaltar é que o valor da indutância calculada pode ser um valor diferente dos indutores comercializados, caso isso, aconteça, substitua sempre por um valor aproximado maior.

Na Figura 16, podemos ver o gráfico de Contorno de Impedância Constante para um filtro harmônico de 7<sup>a</sup> ordem, cuja frequência é de 420 Hz, onde o capacitor escolhido foi de 6.8 micro-farady e o indutor calculado será de 21.117 mili-henry (HANSELMAN E LITTLEFIELD, 2003). Para este caso, substituir o valor do indutor por um de 25 mili-henry.

Após as etapas de análise e detecção, avaliação dos coeficientes e projeto do filtro, a implantação do filtro de forma física no sistema elétrico do consumidor é uma etapa de suma importância.

Depois da implantação do filtro, o algoritmo do filtro modifica o coeficiente harmônico encontrado fora dos 5% da fundamental para zero, sendo assim, para cada coeficiente harmônico encontrado fora do limite de 5% da fundamental é projetado um filtro passivo, onde será implantado no sistema elétrico do consumidor final e que resultará na redução ou eliminação daquela harmônica no sinal, logo coeficiente aproximado de zero.

O algoritmo *Fuzzy* proposto para geração do filtro harmônico desse artigo está baseado no arquivo (saída) do diagnóstico do consumidor de baixa tensão, logo serviram de entradas para o algoritmo *Fuzzy* do filtro.



**Figura 16 - Gráfico Contorno de Impedância Constante.**

No próprio corpo do algoritmo do filtro, na primeira fase, existe a condição para que seja efetuada nova procura por harmônicas acima dos 5% estabelecido. Caso existam novos coeficientes, novos cálculos serão executados e um novo filtro será gerado (ARTERO, 2009).

Conforme o resultado do algoritmo, os filtros serão implantados em paralelo com a rede elétrica do consumidor onde foi efetuada a medição.

Depois de projetados e implantados os filtros passivos para cada coeficiente harmônico acima de 5% da fundamental, o próprio algoritmo gera um novo arquivo texto, o qual está atualizado com os novos dados dos coeficientes harmônicos. Neste instante é calculado um novo valor de THD (conforme a equação 4).

Esse resultado é fuzzificado. Para essa simulação, essa entrada está identificada como a variável THD3.

A segunda parte do algoritmo é baseada no método Mandani de Inferência *Fuzzy* onde é o mais utilizado na aplicação da metodologia *Fuzzy*. O método Mandani foi um dos primeiros sistemas de controle construídos usando teoria de conjunto *Fuzzy* (SUGENO, 1985) como uma tentativa de controlar a combinação de

síntese de um conjunto de regras lingüísticas com controles obtidos a partir de operadores com experiência humana.

A técnica Mandani mede esforço baseado na teoria de Lotfi Zadeh através dos sistemas de algoritmos *Fuzzy* complexos e processos na tomada de decisão (ZADEH, 1973). De uma forma resumida estão descritas as etapas de elaboração do algoritmo do filtro. São elas:

#### Algoritmo *Fuzzy* do Filtro:

Etapa 1 – Arquivo texto é gerado contendo as seguintes entradas: coeficiente da fundamental e as 2<sup>a</sup> a 50<sup>a</sup> coeficientes das harmônicas e suas freqüências correlatas.

Etapa 2 - É calculado o valor de referência no qual vale 5% do coeficiente da onda fundamental, a qual servirá de base de comparação para com os coeficientes das harmônicas.

Etapa 3 – São definidas as relações entre as entradas e saídas definidas.

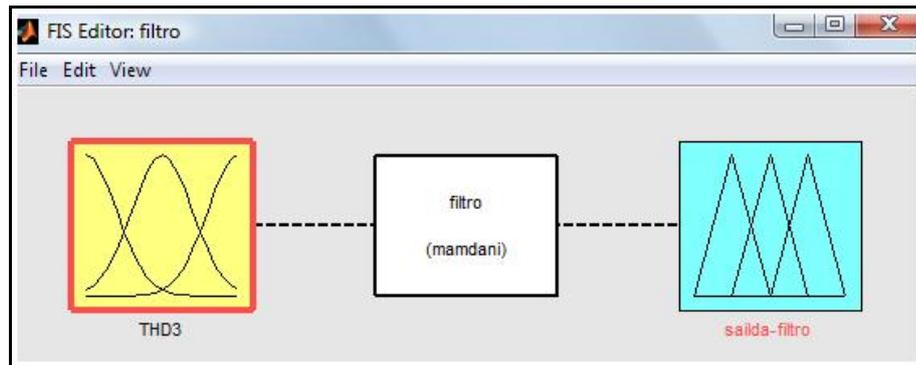
Etapa 4- O algoritmo é executado para determinar se existe algum coeficiente superior ao limite de referência.

Etapa 5 - Caso exista, esse coeficiente é identificado, bem como, a sua freqüência. É projetado o filtro, calculando os valores do Capacitor e o Indutor. É verificado novamente se existe outra harmônica prejudicial presente no sinal. Caso exista o algoritmo determina outro ramo de filtro para o sistema elétrico, o qual ficará em paralelo com o primeiro.

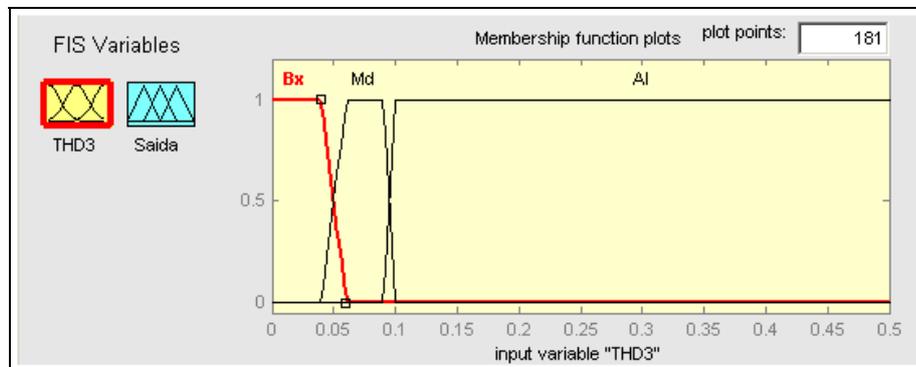
Etapa 6 – O valor do coeficiente harmônico identificado for a do limite é corrigido para zero. É calculado um novo THD o qual é fuzzificado. Dentro do Toolbox de Lógica *Fuzzy* no MatLab são criadas as relações entre entrada e saída. Observando a Figura 12, podemos notar a criação e edição do algoritmo Filtro.FIS, o qual possui entrada THD3 e saída saída-Filtro.

Etapa 7 – Através da Lógica *Fuzzy* podemos obter os seguintes resultados para a entrada THD3: (NB) Normal Baixo, (ND) Normal Dentro e (F) Fora.

Para os casos “NB” e “ND” não será necessário aplicação de novos filtros e de novas medições, entretanto, para a saída “F”, propomos aplicação do filtro projetado e nova medição dos coeficientes da fundamental e das harmônicas para efetuar novo cálculo do THD, através do algoritmo.



**Figura 17 - Tela Principal do sistema de inferência do Algoritmo Fuzzy do Filtro.**



**Figura 18 - Variável THD3 Tensão com suas relações: Normal Baixo (NB), Normal Dentro (ND) e F (Fora).**

## CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este trabalho trata de um assunto atual que envolve a Qualidade da Energia Elétrica prestada pela Concessionária de Energia Elétrica, a qual não instalou de forma satisfatória equipamentos para resolver ou minimizar os efeitos indesejáveis oriundos da presença de distorções no sistema elétrico, prejudicando assim todos os consumidores de uma determinada região.

Foi proposto um algoritmo baseado em Lógica *Fuzzy* para analisar e detectar a frequência da harmônica presente com valor acima de 5% da fundamental.

Esse algoritmo foi posto em prática após levantamento das medições efetuadas por um Medidor de THD para Baixa Tensão devidamente calibrado no sistema elétrico de um consumidor final. Através desse medidor os dados foram coletados e observou-se após aplicação do algoritmo do filtro proposto que para a frequência de 180 Hz (3° harmônica) havia o coeficiente acima de 5% da fundamental. Dessa forma foi projetado um filtro harmônico passivo sintonizável nesta frequência que consta de um capacitor de 10 micro-farady, um indutor de 78,18 mili-henry e uma resistência de 1 Ohm.

Foram criados vários arquivos de saída do Diagnóstico de THD (ver apêndice B1, B2 e B3), os quais serviram de entrada para o algoritmo do filtro. Durante a simulação, todas as harmônicas acima do valor de referência (5% do coeficiente da fundamental) foram detectadas e identificadas, bem como, suas frequências correlatas.

Para todas as simulações foram propostos filtros passivos que, empregados conforme projeto, iriam filtrar as harmônicas prejudiciais presentes no sinal de entrada.

Após essa filtragem foram calculados novos valores para o THD, onde com ajuda da lógica *Fuzzy*, foi possível uma melhor avaliação dos resultados.

O Algoritmo proposto funcionou de forma segura e consistente dando resultados esperados.

Devido a não estar devidamente definida em uma norma que regulamente a emissão de harmônicas na rede elétrica brasileira, e mesmo identificando as frequências harmônicas com coeficientes acima do especificado por normas internacionais, o consumidor final não se propôs a implantar o filtro harmônico de forma física e presente em suas instalações elétricas.

## 6.1 – TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudo, Análise e Implantação de Filtro Ativo em Subestação em planta industrial de Alta Tensão para mitigar Efeito Harmônico utilizando Processador Digital de Sinais e Controlador *Fuzzy*.
- ✓ Aplicação da Lógica *Fuzzy* em Sistemas Elétricos industriais para controle e monitoramento do consumo e medição do Fator de Potência em empresas de Usinagem.

## 6.2 – PUBLICAÇÃO ORIENDA DESSE TRABALHO

CIRINO, Weverson dos S.; LEITE, Jandecy C.; JUNIOR, Carlos T. C. e TOSTES, Maria Emília de L. “Aplicação de Filtro Harmônico em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão utilizando Lógica *Fuzzy*”, II Convencion Internacional de La Ingenieria en Cuba - VI Conferencia de Ingeniería Mecánica, Eléctrica e Industrial, Matanzas - Cuba, CIIC 2010 – CIMEI 2010, 03 a 05 de junho de 2010. ISBN: 978 – 959 – 247 – 077 – 4.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(ANEEL RES. 024, 2000) Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Resolução ANEEL Nº 024 de 27 de janeiro de 2000**, disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2000024.pdf>.

(ANEEL RES. 395, 2009) Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Resolução ANEEL Nº 395 de 15 de dezembro de 2009**, disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2009395.pdf>.

(ANEEL RES. 456, 2000) Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Resolução ANEEL Nº 456 de 29 de novembro de 2000**, disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2000456.pdf>.

(ANEEL RES. 505, 2001) Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Resolução ANEEL Nº 505 de 26 de novembro de 2001**, disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bres2001505.pdf>.

(ANEEL PRODIST-MÓDULO 8, 2008) Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8 - “Qualidade da Energia Elétrica”**, aprovado pela Resolução Normativa Nº 345 de 16 de dezembro de 2008, disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8\\_Revisao\\_0.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_Revisao_0.pdf)

(ARRILLAGA E WATSON, 2003) ARRILLAGA, and WATSON, N.R. **Power Systems Harmonics**, 2a. Ed. John Wiley & Sons, Ltd U.S.A. 2003.

(ARTERO, 2009) Artero, Almir Olivette. **Inteligência Artificial**. Editora Livraria da Física, São Paulo – SP, 2009.

(BARBOSA, 1995) Barbosa, V. B. **Aplicação da lógica *Fuzzy* no controle de um motor CC**. São José dos Campos: 1º ENCITA, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1995.

(BELCHIOR, BONATTO, RAFAEL, LEITE, BACCO E CARVALHO, 2008) Belchior, F. N.; Bonatto, B. D.; Rafael, F. S.; Leite, L. D.; Bacco, A. B. e Carvalho, T. S.. **O Problema da Ausência de Metodologia Oficial Uniformizada para Medição da Qualidade da Energia Elétrica no Brasil**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON), Poços de Caldas - MG, 17 a 20 de Agosto de 2008.

(BELCHIOR, OLIVEIRA E OLIVEIRA, 2009) Belchior, Fernando N., Oliveira, José C., e Oliveira, Luis C. Origa. **Uma abordagem à filtragem de harmônicos por meio de dispositivos eletromagnéticos**. Revista O setor Elétrico, Março 2009.

(BOYLESTAD E NASHELSKY, 1999) Boylestad, Robert., Nashelsky, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. Editora LTC, Rio de Janeiro – RJ, 1999, Apêndice C.

(BREUNIG, 2004) Breunig, Adriano. **Lógica *Fuzzy* aplicada ao Controle de Processos**. Mato Grosso – MT, 2004.

(CABRAL, 1999) Cabral, R. B. **Adaptação Computacional de Sistemas de Inferência Difusos: um caso aplicado**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 1994.

(CHANG, 1974) Chang, C. L. **Interpretation and execution of *Fuzzy* programs**. In: ***Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes***. New York: Academic Press, 1974.

(CRUZ, 1996) Cruz, L. F. **Sistematizações da teoria *Fuzzy***. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1996.

(DRIANKOV, 1996) Driankov, D.; HELLENDORRN, H.; REINFRANK, M. **An Introduction to *Fuzzy Control***. Springer-Verlag, 1996.

(DRIANKOV, HELLENDORRN E REINFRANK, 1996) Driankov, D.; Hellendoorn, H.; Reinfrank, M. **An Introduction to *Fuzzy Control***. Springer-Verlag, 1996.

(FEITOSA, 1992) Feitosa, H. A. **Princípios fundamentais da teoria *Fuzzy***. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1992.

(FERNANDES, 1997) Fernandes, A. P. S. **Sistema Especialista Difuso de Apoio ao Aprendizado do traumatismo Dento - Alveolar utilizando Recursos Multimídia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

(FERNANDES E BAESSO, 2007) Fernandes, Flávio. Baesso, José A. Werneck, Murilo T. **Impactos no fator de potência e harmônicas na substituição da Eletrotermia por Gás Natural**. 4º PDPETRO, Campinas, SP. 21 a 24 de Outubro de 2007.

(HANSELMAN E LITTLEFIELD, 2003) Hanselman, Duane. Littlefield, Bruce. **MATLAB 6 – Curso Completo**. Editora Prentice Hall. São Paulo – SP, 2003.

(IEC 61000 - 3 - 2, 2001) **IEC 61000-3-2 Consolidated edition Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq$  16A per phase)**, 2001.

(IEC 61000 – 4 - 7, 2002) **IEC 61000 - 4 - 7 Ed 1: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4 – 30: Testing and Measurement Techniques - General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto**, 2002.

(IEC 61000 - 4 – 30, 2008) **IEC 61000 - 4 - 30 Ed. 2.0: Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4 – 30: Testing and Measurements Techniques – Power Quality Measurement Methods**, 2008.

(IEEE 519, 1992) **IEEE 519 - 1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI)**. IEEE, New York. 1992.

(IEEE 1531, 2003) **The Institute of Electrical and Electroncis Engenneers, Inc. IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters: IEEE Std. 1531**. New York, USA, 2003.

(IVANQUI, 2005) Ivanqui, J. **Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica Fuzzy**. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2005. 104p.

(LAMIN, 2009) Lamin, H., **Nova era na regulação dos serviços de distribuição de energia.**, Revista Eletricidade Moderna, No. 419, pag. 112-123, Fevereiro de 2009.

(MATTOS, 2001) Mattos; Merisandra Côrtes de. **Sistema Difuso de Controle da Assistência Respiratória em Neonatos – SARE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

(NBR/IEC 17025, 2005) **NBR/IEC 17025 - General Requirements for the Competency of Testing and Calibration Laboratories**, 2005.

(NEWMAN, 2009) Newman, R., **Os níveis de desempenho das medições segundo a norma IEC 61000 - 4 - 30**, Revista Eletricidade Moderna, No. 419, pag. 90-101, Fevereiro de 2009.

(NILSON E RIEDEL, 2003) Nilson, James W.; Riedel, Susana A. **Circuitos Elétricos**. Sexta Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A., 2003.

(PIRES, 2006) Pires, IGOR AMARIZ – **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, março, 2006.

(PROCOBRE, 2001) **Procobre – Instituto Brasileiro do Cobre, Harmônicas nas Instalações Elétricas Causas, Efeitos e Soluções**, 2001. Disponível em: [www.procobrebrasil.org](http://www.procobrebrasil.org).

(RAMOS, DE LIRA E BRONZEADO, 2003) A. J. P. Ramos, D. P. C. P. de Lira, H. S. Bronzeado, **Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica – Aspectos Práticos**, V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, Aracajú - SE, Anais do V SBQEE, 17 a 20 de agosto de 2003.

(RESENDE, 2007) Universidade Federal de Uberlândia UFU / Faculdade de Engenharia Elétrica FEELT, Curso de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), Qualidade de Energia, Apostila da Disciplina QEE, Prof. José Wilson Resende, 2007.

(ROSS, 1995) Ross, T. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, McGraw-Hill. 1995.

(SOLETO, BONATTO, BELCHIOR E MERTENS, 2008) K. T. Soletto, B. D. Bonatto, F. N. Belchior, E. A. Mertens Jr., **Certificação Oficial de Medidores da Qualidade da Energia Elétrica**. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais (VIII INDUSCON), Poços de Caldas - MG, 17 a 20 de Agosto de 2008.

(SUGENO, 1985) SUGENO, M. **Industrial applications of Fuzzy**. Elsevier Science Rub. Co., 1985.

(TANAKA E MIZUMOTO, 1974) Tanaka, K., Mizumoto, M. **Fuzzy programs and their execution**. In: **Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes**. New York: Academic Press, 1974. p.41-76.

(VIEIRA, 1999) Vieira, R. S. **Protótipo de um sistema de monitoramento remoto inteligente**. Dissertação de mestrado, 1999, UFSC.

(ZADEH, 1987) Zadeh, L. A. **Fuzzy sets and applications**. USA: John Wiley & Sons, 1987. 684p.

(ZADEH, 1973) ZADEH, L.A. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes**. IEEE transaction on Systems, Man and Cybernetics, Vol 3. n° 1, pp. 28-44, Jan, 1973.

## ANEXOS

ANEXO 1 – Estrutura do arquivo de texto gerado pelo Medidor de THD para a Simulação.

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
1	21.3	60
2	0.16	120
3	1.08	180
4	0.43	240
5	0.45	300
6	0.27	360
7	0.25	420
8	0.37	480
9	0.34	540
10	0.85	600
11	0.27	660
12	0.52	720
13	0.27	780
14	0.17	840
15	0.34	900
16	0.34	960
17	0.43	1020

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
18	0.27	1080
19	0.32	1140
20	0.28	1200
21	0.37	1260
22	0.44	1320
23	0.21	1380
24	0.3	1440
25	0.4	1500
26	0.24	1560
27	0.34	1620
28	0.3	1680
29	0.2	1740
30	0.22	1800
31	0.35	1860
32	0.25	1920
33	0.38	1980
34	0.25	2040

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
35	0.45	2100
36	0.36	2160
37	0.23	2220
38	0.31	2280
39	0.47	2340
40	0.32	2400
41	0.28	2460
42	0.19	2520
43	0.34	2580
44	0.28	2640
45	0.34	2700
46	0.26	2760
47	0.45	2820
48	0.35	2880
49	0.45	2940
50	0.18	3000

## APÊNDICES

A1 – Algoritmo Computacional do Filtro (1ª Parte: identificação e projeto).

```

%%%%%%%%%%
%%%      Algoritmo Fuzzy do Filtro Passivo      %%
%%%      Dissertação Weverson Cirino              %%
%%%      Versão 2.5   06/04/2010                  %%
%%%%%%%%%%

clear
clc

fprintf ('.....Carregando o arquivo SDTHD.txt.....\n')
load C:\Documents and Settings\Weverson\Meus documentos\sdthda.txt
sdthd1 = sdthda;
ref = sdthda(1,2)*0.05;
fprintf ('////////////////////////////////////////\n')
fprintf ('.....O valor do Coeficiente Fundamental é %4.3f.\n',sdthd1(1,2))
fprintf ('////////////////////////////////////////\n')
fprintf ('.....Valor da Referência calculada é %4.3f.....\n',ref)
fprintf ('////////////////////////////////////////\n')
sdthd1(1,2) = 0;
if sdthd1(:,2) <= ref;
    fprintf ('.....Iniciar o Algoritmo Fuzzy do Filtro.....\n')
    fprintf ('.....\n')
    fprintf('.....Iniciando o Sistema de Procura e Cálculo.....\n')
    fprintf('..Encontrando a Ordem e Frequência da Harmônica Indesejável...\n')
    fprintf('.....calculando.....\n')
    fprintf('.....Nenhuma harmônica Prejudicial foi Encontrada.....\n');
else
    ord=sdthd1(:,1);
    val=sdthd1(:,2);
    freq=sdthd1(:,3);
    Mx=max(sdthd1);
    [Mx,ps]=max(sdthd1);

```

```

fprintf('.....Iniciar o Algoritmo Fuzzy do Filtro.....\n')
fprintf('.....\n')
fprintf('.....Iniciando o Sistema de Procura e Cálculo.....\n')
fprintf('..Encontrando a Ordem e Frequência da Harmônica Indesejável...\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....A Ordem do Filtro é de %d Ordem.....\n',ps(2))
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
Mfreq=freq(ps(2));
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('A Frequência encontrada para o cálculo do Filtro é %dHz.\n',Mfreq)
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....\n')
fprintf('...Processando Cálculos para encontrar os Valores de L e C....\n')
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
C=1e-6.*[3.3 4.7 6.8 10 18 33];
Ca=input('Escolha entre 3.3/4.7/6.8/10/18/33 Micro-Farady o valor do
Capacitor? ');
Cb=Ca*1e-6;
Lm=1/(4*(pi^2)*(Mfreq^2)*Cb);
L=1/(4*(pi)^2*(Mfreq^2)).*(C.^-1);
plot((1e6*C),(1000*L),'-ks','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k',
'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',8),grid,
title('Gráfico Contorno de Impedância Constante')
xlabel('Capacitância em Micro-Farady')
ylabel('Indutância em Mini-Henry')
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('|-----|\n')
fprintf('|... Valor do Capacitor é %4.3f Micro-Farady.....|\n',(1e6*Cb))
fprintf('|-----|\n')
fprintf('|... Valor do Indutor calculado é %4.3f Mini-Henry.....|\n',(1e3*Lm))

```

```

fprintf('|-----|\n')
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
sdthd1(ps(2),2)=0;
end
if sdthd1(:,2)<=ref;
    fprintf('////////////////////////////////////////\n')
    fprintf('//// Iniciando 2a Busca por Harmônicas Prejudiciais ///\n')
    fprintf('//// Nenhuma harmônica Prejudicial foi Encontrada ///\n');
    fprintf('////////////////////////////////////////\n')
else
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('...Iniciando pela 2 Vez a Procura por Harmônicas Prejudiciais...\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('..Nesta segunda verificação foi encontrada outra Harmônica..\n')
    fprintf('.....Será necessário o Cálculo de outro Filtro.....\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('.....Iniciar Novamente o Algoritmo Fuzzy do Filtro.....\n')
    fprintf('////////////////////////////////////////\n')
    ordd=sdthd1(:,1);
    vall=sdthd1(:,2);
    freqq=sdthd1(:,3);
    Mxx=max(sdthd1);
    [Mxx,pss]=max(sdthd1);
    fprintf('..Encontrando a Ordem e Frequência da Harmônica Indesejável...\n')
    fprintf('.....calculando.....\n')
    fprintf('////////////////////////////////////////\n')
    fprintf('.....A Ordem do Filtro é de %d Ordem.....\n',pss(2))
    fprintf('////////////////////////////////////////\n')
    fprintf('.....calculando.....\n')
    fprintf('.....calculando.....\n')
    Mfreqq=freqq(pss(2));

```



```

fprintf('*****\n')
fprintf('...Iniciando pela 3 Vez a Procura por Harmônicas Prejudiciais...\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('..Nesta terceira verificação foi encontrada outra Harmônica..\n')
fprintf('.....Será necessário o Cálculo de outro Filtro.....\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('.....Iniciar Novamente o Algoritmo Fuzzy do Filtro.....\n')
fprintf('////////////////////////////////////\n')
orddd=sdthd1(:,1);
vall=sdthd1(:,2);
freqqq=sdthd1(:,3);
Mxxx=max(sdthd1);
[Mxxx,psss]=max(sdthd1);
fprintf('..Encontrando a Ordem e Frequência da Harmônica Indesejável...\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....A Ordem do Filtro é de %d Ordem.....\n',psss(2))
fprintf('////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
Mfreqqq=freqqq(psss(2));
fprintf('////////////////////////////////////\n')
fprintf('A Frequência encontrada para o cálculo do Filtro é %dHz.\n',Mfreqqq)
fprintf('////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....\n')
fprintf('...Processando Cálculos para encontrar os Valores de L e C....\n')
fprintf('////////////////////////////////////\n')
CCC=1e-6.*[3.3 4.7 6.8 10 18 33];
Caaa=input('Escolha entre 3.3/4.7/6.8/10/18/33 Micro-Farady o valor do
Capacitor? ');
Cbbb=Caaa*1e-6;
Lmmm=1/(4*(pi^2)*(Mfreqqq^2)*Cbbb);

```

```

LLL=1/(4*(pi)^2*(Mfreqq^2)).*(CCC.^-1);
plot((1e6*CC),(1000*LL),'-ks','LineWidth',2,'MarkerEdgeColor','k',
'MarkerFaceColor','r','MarkerSize',8),grid
title('Gráfico Contorno de Impedância Constante')
xlabel('Capacitância em Micro-Farady')
ylabel('Indutância em Mini-Henry')
fprintf('////////////////////////////////////////\n')
fprintf('.....calculando.....\n')
fprintf('|-----|\n')
fprintf('| Valor do Capacitor do 3 Filtro é de %4.3f Micro-
Farady.\n',(1e6*Cbbb))
fprintf('|-----|\n')
fprintf('| Valor do Indutor do 3 Filtro calculado é %4.3f Mini-
Henry.\n',(1e3*Lmmm))
fprintf('|-----|\n')
sdthd1(psss(2),2)=0;
end
thd=(sdthd1(:,2).^2);
thd1=sum(1:50);
thd2=(thd1)^(1/2);
thd3=1/sdthda(1,2)*thd2; %mudar
fprintf('.....O Novo valor de THD para a Tensão é %4.4f.....\n',thd3)
% Fim do Algoritmo Fuzzy

```

A2 – Estrutura do Algoritmo do Filtro (2ª Parte: Lógica *Fuzzy*).

## [System]

Name='Filtro'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=1

NumOutputs=1

NumRules=4

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

## [Input1]

Name='THD3'

Range=[0 0.5]

NumMFs=3

MF1='Bx': 'trapmf', [-0.06 -0.04 0.04 0.06]

MF2='Md': 'trapmf', [0.04 0.06 0.09 0.1]

MF3='Al': 'trapmf', [0.09 0.1 0.55 0.56]

## [Output1]

Name='Saida'

Range=[0 1]

NumMFs=3

MF1='NB': 'trapmf', [-0.2 -0.19 0.29 0.31]

MF2='ND': 'trapmf', [0.29 0.31 0.49 0.51]

MF3='F': 'trapmf', [0.49 0.51 1.1 1.2]

[Rules]

1, 1 (1) : 1

2, 1 (1) : 1

3, 3 (1) : 1

2, 2 (1) : 1

B.1 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 01 coeficiente harmônico fora do limite especificado na frequência de 420 Hz.

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
1	22.9	60	18	0.27	1080	35	0.45	2100
2	0.16	120	19	0.32	1140	36	0.36	2160
3	0.32	180	20	0.28	1200	37	0.23	2220
4	0.43	240	21	0.37	1260	38	0.31	2280
5	0.45	300	22	0.44	1320	39	0.47	2340
6	0.27	360	23	0.21	1380	40	0.32	2400
<b>7</b>	<b>1.25</b>	<b>420</b>	24	0.3	1440	41	0.28	2460
8	0.37	480	25	0.4	1500	42	0.19	2520
9	0.34	540	26	0.24	1560	43	0.34	2580
10	0.85	600	27	0.34	1620	44	0.28	2640
11	0.27	660	28	0.3	1680	45	0.34	2700
12	0.52	720	29	0.2	1740	46	0.26	2760
13	0.27	780	30	0.22	1800	47	0.45	2820
14	0.17	840	31	0.35	1860	48	0.35	2880
15	0.34	900	32	0.25	1920	49	0.45	2940
16	0.34	960	33	0.38	1980	50	0.18	3000
17	0.43	1020	34	0.25	2040			

B.2 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 02 coeficientes harmônicos fora do limite especificado nas frequências de 300 Hz e 2.7 KHz.

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
1	20.7	60	18	0.27	1080	35	0.45	2100
2	0.16	120	19	0.32	1140	36	0.36	2160
3	0.32	180	20	0.28	1200	37	0.23	2220
4	0.43	240	21	0.37	1260	38	0.31	2280
<b>5</b>	<b>1.13</b>	<b>300</b>	22	0.44	1320	39	0.47	2340
6	0.27	360	23	0.21	1380	40	0.32	2400
7	1.25	420	24	0.3	1440	41	0.28	2460
8	0.37	480	25	0.4	1500	42	0.19	2520
9	0.34	540	26	0.24	1560	43	0.34	2580
10	0.85	600	27	0.34	1620	44	0.28	2640
11	0.27	660	28	0.3	1680	<b>45</b>	<b>1.25</b>	<b>2700</b>
12	0.52	720	29	0.2	1740	46	0.26	2760
13	0.27	780	30	0.22	1800	47	0.45	2820
14	0.17	840	31	0.35	1860	48	0.35	2880
15	0.34	900	32	0.25	1920	49	0.45	2940
16	0.34	960	33	0.38	1980	50	0.18	3000
17	0.43	1020	34	0.25	2040			

B.3 - Estrutura do arquivo de texto criado para Teste do Algoritmo do Filtro com 03 coeficientes harmônicos fora do limite especificado nas frequências de 180 Hz, 1.26 KHz e 2.82 KHz.

<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>	<b>Seq.</b>	<b>Coef.</b>	<b>Freq.</b>
1	23.5	60	18	0.27	1080	35	0.45	2100
2	0.16	120	19	0.32	1140	36	0.36	2160
<b>3</b>	<b>0.99</b>	<b>180</b>	20	0.28	1200	37	0.23	2220
4	0.43	240	<b>21</b>	<b>1.23</b>	<b>1260</b>	38	0.31	2280
5	0.45	300	22	0.44	1320	39	0.47	2340
6	0.27	360	23	0.21	1380	40	0.32	2400
7	1.25	420	24	0.3	1440	41	0.28	2460
8	0.37	480	25	0.4	1500	42	0.19	2520
9	0.34	540	26	0.24	1560	43	0.34	2580
10	0.85	600	27	0.34	1620	44	0.28	2640
11	0.27	660	28	0.3	1680	45	1.16	2700
12	0.52	720	29	0.2	1740	46	0.26	2760
13	0.27	780	30	0.22	1800	<b>47</b>	<b>1.17</b>	<b>2820</b>
14	0.17	840	31	0.35	1860	48	0.35	2880
15	0.34	900	32	0.25	1920	49	0.45	2940
16	0.34	960	33	0.38	1980	50	0.18	3000
17	0.43	1020	34	0.25	2040			