

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

BENEVALDO PEREIRA GONÇALVES

**METODOLOGIA PARA DIAGNOSTICAR A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
REFERENTE À DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMA TRIFÁSICO DE
BAIXA TENSÃO UTILIZANDO LÓGICA FUZZY**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Belém
2010**

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

**METODOLOGIA PARA DIAGNOSTICAR A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA
REFERENTE À DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMA TRIFÁSICO 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 de Processos Industriais.

BENEVALDO PEREIRA GONÇALVES

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS TAVARES DA COSTA JÚNIOR

**Belém
2010**

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

BENEVALDO PEREIRA GONÇALVES

TÍTULO: Metodologia para diagnosticar a qualidade de energia elétrica referente à distorção harmônica em sistema trifásico 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

Prof. Dr. Roberto Célio Limão de Oliveira
UFPA

Prof. Dr. Francisco Beraldo Herrera
Fernandez – EST/UEA

Eng. Jandecy Cabral Leite
ITEGAM

DEDICATÓRIA

A Deus, pelo amor e graças alcançadas.
Aos meus pais, pois graças a eles estou aqui.
Aos meus filhos que por causa deles estou aqui.

AGRADECIMENTOS

Eu agradeço imensamente a Deus por mais essa conquista, por toda inspiração que recebi para tomar os caminhos certos junto às pessoas certas.

Eu agradeço aos meus pais por tudo que sou, pelo amor e apoio que sempre recebi.

Eu agradeço aos meus filhos, bens mais preciosos da minha vida, pela compreensão e paciência nos momentos de ausência.

Eu agradeço muito, as minhas amigas da equipe de estudo que tanto me ajudaram Amélia e Jack, sem vocês não teria conseguido obrigado pelo companheirismo, força e carinho de todas as horas e momentos que passamos juntos.

Eu agradeço aos professores Jandecy e Tavares, por toda a orientação e paciência e por ter dado a chance do seu sonho ser nosso sonho também.

Eu agradeço a todas as pessoas que torceram por mim, que me incentivaram e acreditaram mesmo quando eu mesmo não acreditava e achava impossível.

Deus abençoe todos vocês. Amém.

"Embora ninguém possa voltar atrás para fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora a fazer um novo fim."

Chico Xavier.

RESUMO

Este trabalho ressalta a importância de monitorar e diagnosticar a qualidade de energia elétrica sob a ótica das distorções harmônicas presente nas instalações elétricas em sistema trifásico de baixa tensão através de uma proposta metodológica para analisar e diagnosticar o nível dos distúrbios harmônico avaliando o indicador total de distorção harmônica (THD), apoiado por um sistema especialista baseado em um sistema de inferência Fuzzy.

Palavras-chaves: Qualidade de Energia, Harmônica, Indicador THD, Monitoramento, Diagnóstico, Sistema de Inferência Fuzzy.

ABSTRACT

This work emphasizes the importance of monitoring and diagnosing the quality of electric power from the viewpoint of harmonic distortion present in the electrical installation in low voltage three-phase system using a methodology to analyze and diagnose the level of harmonic disturbances evaluating the overall indicator of distortion Harmonic (THD), supported by an expert system based on a Fuzzy inference system.

Keywords: Power Quality, Harmonic, THD Indicator, Monitoring, Diagnosis, Fuzzy Inference System.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE GRÁFICO	13
CAPÍTULO I	14
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Contextualização	14
1.2. Justificativa da Proposta do Estudo	15
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo Geral	16
1.3.2. Objetivos Específicos	16
1.4. Relevância da Aplicação da Pesquisa	17
1.5. Delimitação da Pesquisa	17
1.6. Metodologia Aplicada à Pesquisa	18
1.7. Descrição e Organização dos Capítulos	18
CAPÍTULO II	20
2. FUNDAMENTOS DE QUALIDADE DA ENERGIA	20
2.1 – Índices de Qualidade	22
2.2 – Distorções Harmônicas	26
2.3 – Indicadores de distorções harmônicas	31
2.3.1 – Indicador distorção harmônica total (THD)	31
2.4 – Normas regulamentadoras e recomendações	32
2.4.1 – IEEE Std. 519-1992	33
2.4.2 – IEC 61000-2-2	33
2.4.3 – IEC 61000-4-7	34
2.4.4 – IEC 61000-4-30	34
CAPÍTULO III	36
3. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY	36
3.1 – Sistema de Inferência Fuzzy	41
3.1.1 – Base de Regras	43
3.1.2 – Fuzzyficação	44
3.1.2 – Inferência	46
3.1.3 – Defuzzyficação	47
CAPÍTULO IV	48
4. METODOLOGIA PROPOSTA	48
4.1 - Etapa 01: Definição do equipamento de medição	48
4.2 - Etapa 02: Realização da leitura	49
4.3 - Etapa 03: Formulação dos diagnósticos básicos	50
4.4 - Etapa 04: Determinação do indicador THD de tensão e corrente	52
4.5 - Etapa 05: Definição do banco de dados	53
4.6 - Etapa 06: Elaboração do sistema de inferência Fuzzy	55
4.6.1 - Definição das variáveis de Entrada	55
4.6.2 - Definição da variável de Saída	55
4.6.3 - Definição do método de inferência:	56
4.6.4 - Definição das Regras Fuzzy	58
4.7 – Etapa 07: Determinação do diagnóstico	60
4.7.1 – Classificação da variável de saída DIAGNÓSTICO	60
4.7.2 – Análise do DIAGNÓSTICO	64

CAPÍTULO V	65
5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	65
5.1 - Análise realizada pela Ferramenta da IMS:	65
5.2 - Análise realizada pela metodologia proposta:	69
CAPÍTULO VI	77
6.1 - CONCLUSÃO	77
6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
6.3 – REFERÊNCIAS	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Problema de qualidade de energia elétrica.	22
Figura 2 - Tensão normal adicionada da 5ª harmônica resultando o sinal distorcido.	27
Figura 3 - Harmônico de seqüência zero.	30
Figura 4 - Função indicadora de A.	40
Figura 5 - Função de pertinência de A.	40
Figura 6 - Variáveis lingüísticas.	41
Figura 7 - Modelo de um sistema de inferência Fuzzy.	43
Figura 8 - Mecanismo de inferência Fuzzy.	46
Figura 9 - Analisador de Energia.	49
Figura 10 - Exemplo de um diagrama multifilar.	50
Figura 11 - Fluxo para geração do TH de tensão e corrente.	53
Figura 12 - Modelo conceitual do banco de dados proposto.	54
Figura 13 - Sistema de inferência Fuzzy proposto.	56
Figura 14 - Função de pertinência da variável THD_U.	57
Figura 15 - Função de pertinência da variável THD_I.	57
Figura 16 - Função de pertinência da variável de saída DIAGNOSTICO.	58
Figura 17 - Gráfico de superfície do diagnóstico em função do THD_I e THD_U.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem, frequência e seqüência das harmônicas.....	29
Tabela 2 - Limites recomendados pela IEEE Std 519-192.....	33
Tabela 3 - Níveis de distorção harmônica individual conforme o IEC 61000-2-2.....	34
Tabela 4 - Estrutura do arquivo exportado pelo equipamento de medição.	49
Tabela 5 - Relação dos níveis de THD de tensão e corrente.	58
Tabela 6 - Definição dos tipos de diagnóstico.....	63

LISTA DE GRÁFICO

Gráfico 1 - Conjunto de THD de tensão da fase 01.....	66
Gráfico 2 - Conjunto de THD de tensão da fase 02.....	66
Gráfico 3 - Conjunto de THD de tensão da fase 03.....	66
Gráfico 4 - Conjunto de THD de tensão das fases 1,2 e 3 simultaneamente.....	67
Gráfico 5 - Conjunto de THD de corrente da fase 1.....	67
Gráfico 6 - Conjunto de THD de corrente da fase 2.....	67
Gráfico 7 - Conjunto de THD de corrente da fase 3.....	68
Gráfico 8 - Conjunto de THD de corrente das fases 1, 2 e 3 simultaneamente.....	68
Gráfico 9 - Diagnóstico da fase 1 do THD de corrente e tensão.	69
Gráfico 10 - Diagnóstico da fase 2 do THD de corrente e tensão.	71
Gráfico 11 - Diagnóstico da fase 3 do THD de corrente e tensão.	72
Gráfico 12 - Diagnóstico do sistema trifásico.	73
Gráfico 13 - Visão do diagnóstico do THD de corrente e tensão das três fases.....	74
Gráfico 14 - Diagnóstico do sistema trifásico em relação as fases.	75
Gráfico 15 - Diagnóstico final do sistema trifásico.	75

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As formas de energia existente atualmente representam uma alavanca para o desenvolvimento dos países impactando de forma direta na sociedade em todos os seus aspectos. Uma dessas formas é a energia elétrica que impulsiona diversos seguimentos seja para consumo ou para produção. (OLIVEIRA, 2008).

A disponibilidade da energia elétrica representa um incremento na qualidade de vida das populações. Num primeiro momento em que se implanta um sistema de distribuição de energia elétrica, a população local imediatamente passa a constar com inúmeros benefícios, seja no conforto, criação de novos postos de trabalho e consequentemente no processo de desenvolvimento global.

Com a demanda de energia exigida para manter um grande parque consumidor surge à preocupação com a continuidade do serviço, isto é, ter uma matriz energética capaz de atender as necessidades dos consumidores e por outro lado, tão importante quanto, a questão da qualidade da energia elétrica, foco do presente estudo.

Conceitualmente a Qualidade de Energia está relacionada a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade de energia é: "Qualquer problema de energia manifestada na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária. (AFONSO, 2003).

Na ótica do consumidor, talvez seja mais simples e adequado utilizarmos simplesmente a palavra "distúrbios" para englobar todos os fenômenos que afetam a qualidade da energia elétrica. Dentre os distúrbios que afetam a qualidade de energia destacam-se as Distorções Harmônicas. A presença de harmônicas é sinônima de uma onda de tensão ou de corrente deformada, consequentemente a

deformação da onda de tensão ou de corrente significa que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a Qualidade de Energia é afetada.

Essencialmente, a maioria dos equipamentos eletrônicos passou a agregar algum ou vários tipos de componentes que geram cargas não-lineares na rede elétrica. (AFONSO, 2003).

Para proporcionar uma avaliação da qualidade de energia sob a ótica das distorções harmônicas pode-se utilizar o indicador da Taxa de Distorção Harmônica (THD) tendo como resultado um diagnóstico representativo da qualidade de energia.

Para auxiliar a formulação e avaliação do diagnóstico da qualidade de energia podem-se utilizar os conceitos da lógica Fuzzy que são atualmente ferramentas importantes para a solução de problemas complexos de controle em plantas industriais. Um sistema especialista Fuzzy, também chamado de sistema de inferência Fuzzy, tem como uma de suas características, a capacidade de incorporar o conhecimento de operadores e engenheiros (especialistas) na estratégia de controle, valorizando desta forma estas informações. (SHAW, 1999).

Desta forma, esta teoria tem como objetivo criar um sistema ou um ambiente que permita representar conhecimentos que são complexos, incertos, contraditórios e incompletos de uma maneira sistemática e lógica. (JÚNIOR, 1999).

A presente pesquisa apresenta uma metodologia para diagnosticar a qualidade de energia elétrica afetada pelos distúrbios provenientes das distorções harmônicas analisando o indicador total de distorção harmônica (THD) através de um sistema de inferência Fuzzy.

1.2. Justificativa da Proposta do Estudo

Como um dos principais distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica é decorrente das distorções harmônicas onde as correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas a rede e provocam a circulação das correntes harmônicas que geram tensões harmônicas através da impedância da rede, tendo como resultado a deformação da tensão de alimentação. Temos como conseqüências: (OLIVEIRA, 2008).

1. Sobrecarga da rede de distribuição por aumento da corrente eficaz;

2. Sobrecarga, vibrações e envelhecimento dos alternadores, transformadores, motores, ruídos dos transformadores;
3. Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação de energia reativa;
4. Perturbação das redes de comunicação ou das redes telefônicas;
5. Envelhecimento precoce do material o que leva a substituí-lo mais tarde, a menos que seja sob redimensionado;
6. Deformações da corrente provocam disparos intempestivos e a parada das instalações da produção.

Essas conseqüências, dentre outras, geram impactos econômicos de grandes proporções tanto para os consumidores residenciais quanto para a cadeia produtiva (comércio e indústria). Fica assim evidente a necessidade de um plano para eliminar ou atenuar o impacto das distorções no sistema elétrico, bem como a necessidade de uma metodologia de diagnóstico da qualidade da energia elétrica.

O referido estudo sugere uma metodologia para apoiar a política de prevenção através da avaliação e diagnóstico da qualidade de energia elétrica sob a ótica das distorções harmônicas monitorando o indicador da taxa de distorção harmônica por meio de um sistema especialista Fuzzy (sistema de inferência Fuzzy).

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Propor uma metodologia para avaliar e diagnosticar a Qualidade de Energia Elétrica referente aos distúrbios decorrentes das distorções harmônicas analisando a taxa de distorção harmônica (THD) de corrente e tensão objetivando uma política de prevenção através de um sistema especialista Fuzzy.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Efetuar um estudo sobre qualidade de energia, delimitando as distorções harmônicas e o indicador total de distorção harmônica (THD), bem como as normas e recomendações regulamentadoras do setor energético;

2. Efetuar uma pesquisa sobre os fundamentos da lógica Fuzzy, explorando o sistema de inferência fuzzy;
3. Elaborar uma metodologia para viabilizar o diagnóstico e análise das distorções harmônicas baseada no indicador total de distorção harmônica (THD) utilizando um sistema especialista Fuzzy (sistema de inferência Fuzzy).
4. Monitorar e acompanhar os indicadores das distorções harmônicas, através da metodologia proposta registrando todas as informações coletadas e analisadas em um banco de dados;
5. Simular a aplicação da metodologia proposta.

1.4. Relevância da Aplicação da Pesquisa

Atualmente, uma das formas para realizar a análise e avaliação da qualidade de energia referente às distorções harmônicas tanto de tensão quanto de corrente através do indicador THD (total de distorção harmônica) é efetuar uma leitura no sistema elétrico, através de um equipamento específico que calcule o conjunto de THD (corrente e tensão) e disponibilize um gráfico onde um especialista responsável pela análise com um conhecimento teórico e empírico relevante, possa, com o auxílio das normas e recomendações regulamentadoras, formular o seu diagnóstico separadamente para o THD de tensão e corrente.

A metodologia proposta tem como relevância trazer para dentro do processo de diagnóstico e avaliação a visão do especialista através de um sistema de inferência Fuzzy e formular um único diagnóstico que englobe as duas análises tanto do THD de tensão quanto de corrente, bem como armazenar em um banco de dados todas as informações inerentes ao processo.

1.5. Delimitação da Pesquisa

O campo da Qualidade de Energia Elétrica é muito abrangente e vasto, para delimitar a pesquisa o estudo em questão irá focalizar:

- O estudo da Qualidade de Energia Elétrica avaliando e diagnosticando sob a ótica da prevenção dos distúrbios gerados pelas distorções harmônicas através da análise do indicador da taxa de distorção harmônica (THD) de

corrente e tensão em sistema trifásico de baixa tensão utilizando um sistema de inferência Fuzzy.

1.6. Metodologia Aplicada à Pesquisa

O estudo que segue tem características quali-quantitativas, pois qualifica o indicador total de distorção harmônica (THD) como sendo normal, significativo ou crítico quantificando o nível do THD dentro de uma faixa entre 0% e 100%.

O procedimento aplicado na pesquisa foi organizado da seguinte forma:

- **População e Amostra:** O estudo será em um setor de produção de uma empresa do Pólo Industrial de Manaus/AM (PIM) ou analisando arquivos de leitura dos fornecedores de equipamento de medição.
- **Instrumentos de Medida:** Será utilizado um equipamento para ler os dados de corrente, tensão, potência e frequência dos sinais das instalações elétricas gerando um arquivo com as componentes harmônicas que serão avaliados pela metodologia proposta.
- **Coleta de Dados:** A coleta de dados será realizada periodicamente através do equipamento de leitura ou obtido de fornecedores de medição para nível de testes e validação do modelo proposto.
- **Tratamento e Análise dos Dados:** Será utilizada a ferramenta computacional MATLAB, versão 6.1.0.450 para validar a metodologia proposta.

1.7. Descrição e Organização dos Capítulos

Uma vez definido o universo a ser trabalhado, o presente estudo foi dividido em seis capítulos assim constituídos:

- **Capítulo 1:** Apresenta os aspectos introdutórios sobre a problemática do assunto, contendo a justificativa, o objetivo geral e os específicos a serem alcançados e/ou cumpridos, a relevância da pesquisa bem como a

delimitação. Mostra também como foram os procedimentos metodológicos para realização do trabalho e a descrição e organização dos capítulos.

- **Capítulo 2:** Apresenta a fundamentação teórica de acordo com as bibliografias estudadas sobre os fundamentos da qualidade de energia elétrica delimitando nos aspectos das distorções harmônicas, do indicador total de distorção harmônica (THD), bem como as normas e recomendações regulamentadoras do setor elétrico.
- **Capítulo 3:** Apresenta a fundamentação teórica de acordo com as bibliografias estudadas sobre os fundamentos de Lógica Fuzzy, os conjuntos Fuzzy com suas operações, as variáveis lingüísticas e o sistema de inferência Fuzzy.
- **Capítulo 4:** Apresenta a metodologia proposta constituído de todas as etapas: definição do equipamento de medição, realização da leitura, formulação do diagnóstico, determinação do indicador THD de tensão e corrente, definição do banco de dados, elaboração do sistema de inferência Fuzzy para determinar o diagnóstico e Definição do Diagnóstico.
- **Capítulo 5:** Apresenta a aplicação da metodologia através da avaliação de um arquivo contendo o THD de corrente e tensão tendo como resultado o diagnóstico da qualidade de energia dos respectivos dados lidos.
- **Capítulo 6** Apresenta a conclusão da pesquisa bem como as sugestões para trabalhos futuros, as referências bibliográficas.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTOS DE QUALIDADE DA ENERGIA

A Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é um assunto que vem despertando a atenção de fornecedores e de consumidores de eletricidade. Tal preocupação decorre em partes da obrigatoriedade da observação de normas e legislações que regem o mercado de energia elétrica. Além disso, devemos levar em conta que a eletricidade atingiu um grau de importância relevante e essencial para o funcionamento da nossa sociedade, em todos os seguimentos. Assim como o ar, a água e o solo, a energia elétrica que utilizamos também pode ser “poluída” ou apresentar qualidade. (OLIVEIRA, 2008).

A baixa qualidade da energia fornecida a equipamentos elétricos pode resultar em mau funcionamento dos equipamentos, em desgastes e prejuízos materiais, em aumento nas perdas energéticas, em aumento no consumo e até resultar em perturbações físicas e fisiológicas em usuários, levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas quanto das pessoas. A baixa qualidade pode ser decorrente de problemas em partes do sistema supridor como também pode ser decorrente de problemas na forma como alguns equipamentos utilizam a eletricidade. (OLIVEIRA, 2008).

Entre os problemas de qualidade de energia, a interrupção do fornecimento é, incontestavelmente, o mais grave, uma vez que afeta todos os equipamentos ligados à rede elétrica. Contudo, outros problemas de qualidade de energia, como os descritos a seguir, além de levarem à operação incorreta de alguns equipamentos, podem também danificá-los:

- Distorção harmônica: quando existem cargas não lineares ligadas à rede elétrica a corrente que circula nas linhas contém harmônicos e a queda de tensão provocada pelos harmônicos nas impedâncias das linhas faz com que as tensões de alimentação fiquem também distorcidas.
- Ruído (interferência eletromagnética): corresponde ao ruído eletromagnético de alta frequência, que pode ser produzido pelas comutações rápidas dos conversores eletrônicos de potência.

- Inter-harmônicos: surgem quando há componentes de corrente que não estão relacionadas com a componente fundamental (50 Hz); essas componentes de corrente podem ser produzidas por fornos a arco ou por ciclo conversores (equipamentos que, alimentados a 50 Hz, permitem sintetizar tensões e correntes de saída com uma frequência inferior).
- Interrupção momentânea: ocorre, por exemplo, quando o sistema elétrico dispõe de disjuntores com religador, que abrem na ocorrência de um curto-circuito, fechando-se automaticamente após alguns milissegundos (e mantendo-se ligados caso o curto-circuito já se tenha extinguido).
- Subtensão momentânea (voltage sag): também conhecido por “cava de tensão”, pode ser provocada, por exemplo, por um curto-circuito momentâneo num outro alimentador do mesmo sistema elétrico, que é eliminado após alguns milissegundos pela abertura do disjuntor do ramal em curto.
- Sobretensão momentânea (voltage swell): pode ser provocada, entre outros casos, por situações de defeito ou operações de comutação de equipamentos ligados à rede elétrica.
- Flutuação da tensão (flicker): acontece devido a variações intermitentes de certas cargas, causando flutuações nas tensões de alimentação (que se traduz, por exemplo, em oscilações na intensidade da iluminação elétrica).
- Micro-cortes de tensão (notches): resultam de curtos-circuitos momentâneos, que ocorrem durante intervalos de comutação dos semicondutores de potência dos retificadores.
- Transitórios: ocorrem como resultado de fenômenos transitórios, tais como a comutação de bancos de condensadores ou descargas atmosféricas.

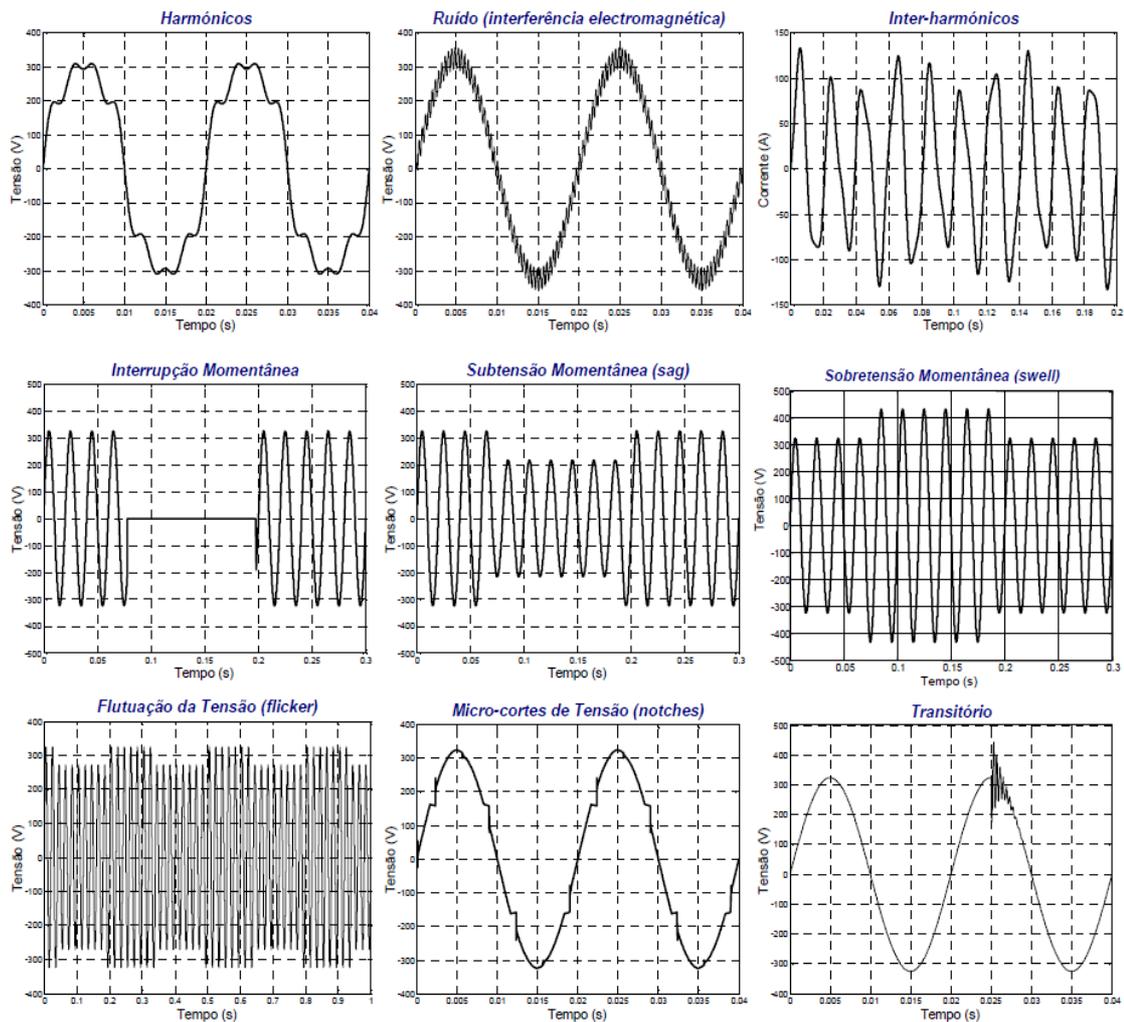


Figura 1 - Problema de qualidade de energia elétrica.

2.1 – Índices de Qualidade

Após a privatização da maioria das concessionárias de energia elétrica, a ANEEL criou o conceito de consumidor livre, com direito de comprar energia de qualquer concessionária, e não apenas daquela cuja concessão cobre a área onde o consumidor está instalado. Entretanto, num primeiro momento os consumidores livres eram aqueles cujas demandas eram superiores a 10 MW.

Desde 8 de julho de 2000, são livres todos aqueles consumidores de energia elétrica com demandas acima de 3 MW, e alimentados com tensão igual ou superior a 69 kV. Ainda são poucos os que exercem este direito. Existem apenas 2 casos no Brasil de consumidores que trocaram de concessionária: Volkswagen (Taubaté/SP) e Carbocloro (Cubatão/SP). Este número promete continuar pequeno devido ao

imenso esforço que as concessionárias estão dispendendo para manter seus clientes.

Ainda que por outras circunstâncias (oferta quase igual a demanda) não se possa esperar expressivas reduções de preços da energia por conta desta liberalização, é certo que o novo ambiente deve estimular inovações tecnológicas redutoras de custo, com grande destaque para a qualidade da energia.

Muitas empresas já desejam acompanhar as curvas de tensão, de transientes e de correntes harmônicas no ponto de entrega de suas concessionárias. No ambiente de livre mercado, cresceu muito em importância a qualidade da energia entregue, e este acompanhamento.

As quedas de tensão são de tipicamente 0,5 a 30 ciclos e as interrupções de normalmente 2 segundos à 5 segundos. As interrupções são normalmente causadas por manutenção na linha. As quedas de tensão são normalmente causadas por falhas na alimentação ou pela partida de cargas muito grandes como motores.

As falhas na alimentação são causadas tipicamente por alguma sobrecarga momentânea (por exemplo, algum curto-circuito na linha causado por um galho ou dois fios que se tocaram devido ao vento). As concessionárias utilizam dispositivos que tentam reconectar o circuito rapidamente. Durante este período, ocorre uma queda de tensão ou uma interrupção na alimentação. Alguns sistemas rearmam muito rapidamente (de 2 a 3 ciclos), enquanto outros levam muito mais tempo (de 20 ciclos até 5 segundos). Não é incomum que o sistema rearme e desarme várias vezes até a causa do curto-circuito ser sanada. Estas falhas na alimentação podem abranger uma área muito grande atingindo diversos circuitos de distribuição.

Partida de motores ou cargas grandes faz com que aumente muito o esforço sobre o sistema. Impedâncias dimensionadas para o funcionamento em modo contínuo são normalmente muito altas para estes casos, causando quedas de tensão. Infelizmente, devido a queda de tensão, o fator de potência dos motores diminui muito diminuindo o torque de partida fazendo com que o período do arranque fique bem maior e, portanto, aumentando a gravidade da queda de tensão.

O desempenho das concessionárias quanto à continuidade do serviço prestado de energia elétrica é medido pela ANEEL com base em indicadores específicos, denominados de DEC e FEC.

O DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica o número de horas em média que um consumidor fica sem energia elétrica durante um período, geralmente mensal. Já o FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) indica quantas vezes, em média, houve interrupção na unidade consumidora (residência, comércio, indústria etc).

O DEC pode ser calculado por

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i) \times T(i)}{Cs} \quad (1)$$

Onde:

- i = número de interrupções, de 1 a n ;
- $T(i)$ = tempo de duração de cada interrupção do conjunto de consumidores considerados, em horas;
- $Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingido nas interrupções;
- Cs = número total de consumidores do conjunto considerado.

O FEC pode ser calculado por

$$FEC = \frac{\sum_{i=1}^n Ca(i)}{Cs} \quad (2)$$

Onde:

- i = número de interrupções, de 1 a n ;
- $Ca(i)$ = número de consumidores do conjunto considerado, atingido nas interrupções;
- Cs = número total de consumidores do conjunto considerado.

As metas de DEC e FEC a serem observadas pelas concessionárias estão definidas em Resolução específica da ANEEL. Essas metas também estão sendo publicadas mensalmente na conta de energia elétrica do consumidor.

A ANEEL implantou no ano 2000 mais três indicadores destinados a aferir a qualidade prestada diretamente ao consumidor, quais sejam: DIC, FIC e DMIC.

Os indicadores DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e FIC (Frequência de Interrupção por Unidade Consumidora) indicam por quanto tempo e o número de vezes respectivamente que uma unidade consumidora ficou sem energia elétrica durante um período considerado. O DMIC (Duração Máxima de

Interrupção por Unidade Consumidora) é um indicador que limita o tempo máximo de cada interrupção, impedindo que a concessionária deixe o consumidor sem energia elétrica durante um período muito longo. Esse indicador passa a ser controlado a partir de 2003.

As metas para os indicadores DIC, FIC e DMIC estão publicadas na Resolução ANEEL número 024, de 27 de janeiro de 2000 e já estão sendo informadas na conta de energia elétrica do consumidor as metas do DIC e FIC.

As normas e recomendações internacionais também são usadas como referência para na avaliação da qualidade da energia elétrica são elas:

- Padrões do IEEE mais comuns usados em Qualidade de Energia:
 - IEEE 446 - Emergency and Standby Power
 - IEEE 519 - Harmonic Control
 - IEEE 1001 - Interface with Dispersed Generation
 - IEEE 1100 - Power and Grounding Electronics
 - IEEE 1159 - Monitoring Power Quality
 - IEEE 1250 - Service to Critical Loads
 - IEEE 1346 - System Compatibility in Industrial Environments
 - IEEE 1366 - Electric Utility Reliability Indices
- Padrões do IEC mais comuns usados em Qualidade de Energia:
 - IEC 61000-2-2 - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto
 - IEC 61000-2-4 - Compatibility levels in industrial plants low-frequency conducted disturbances
 - IEC 61000-4-7 - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling public low-voltage power supply systems
 - IEC 61000-4-11 – Voltage dips/interruptions/variation immunity
 - IEC 61000-4-14 - Voltage fluctuation immunity
 - IEC 61000-4-13 - Harmonics/interharmonics immunity
 - IEC 61000-4-15 - Flickermeter
 - IEC 61000-4-16 - Test for immunity to conducted common mode disturbances in the frequency range 0 Hz to 150 kHz
 - IEC 61000-4-17 - Ripple on d.c. input power port, immunity test

- IEC 61000-4-27 - Unbalance, immunity test
- IEC 61000-4-28 - Variation of power frequency, immunity test
- IEC 61000-4-29 - Voltage dips, short interruptions and voltage variations on d.c. input power port, immunity tests
- IEC 61000-4-30 - Power quality measurements methods

2.2 – Distorções Harmônicas

Antes da década de 90, os conceitos de distorção harmônica e fator de potência ficavam restritos somente para aplicações em grandes indústrias e estudos acadêmicos. Nessa época as indústrias tinham uma preocupação com o controle de velocidade de seus processos. Essa necessidade levou ao desenvolvimento da eletrônica de potência, então novas tecnologias envolvendo materiais semicondutores de características não-lineares passaram a ser empregadas para o alcance das soluções nas indústrias. Com isso os problemas com harmônicos vieram a ser acentuados (NUNES, 2007).

A partir da década de 90, equipamentos eletrônicos passaram a ser bastante comuns em instalações residenciais e comerciais. Esses equipamentos, dotados também de componentes classificados como não lineares (diodos, mosfets, triacs, inversores), provocam o que chamamos de distorção harmônica no sistema elétrico. A quantidade e velocidade com que esses equipamentos passaram a estar inclusos nas instalações elétricas residenciais e comerciais, estão associados diretamente com o crescimento das reclamações de qualidade de energia feitas às concessionárias (MODERNO, 2001).

Essencialmente, a maioria dos equipamentos eletrônicos passou a agregar algum ou vários tipos de componentes não-lineares. Entre as principais cargas elétricas com características não lineares, que vem sendo empregadas no sistema elétrico encontram-se (NUNES, 2007):

- Circuitos de iluminação com lâmpada de descarga (ex: lâmpada a vapor de mercúrio);
- Fornos a arco;
- Compensadores estáticos tipo reator saturado;

- Motores de corrente contínua controlada por retificadores;
- Motores de indução controlados por inversores de freqüência;
- Processos de eletrólise através de retificadores não-controlados;
- Motores síncronos controlados por reatores saturados;
- Cargas de aquecimento controladas por tiristores;
- Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Computadores;
- Eletrodomésticos com fontes chaveadas (ex: TV, DVD, etc).

As distorções harmônicas são um tipo específico de energia “suja” (poluída ou contaminada) que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma contínua, associadas ao crescente número de acionamentos estáticos (inversores de freqüência, variadores de velocidade, etc.), fontes chaveadas, e outros dispositivos eletrônicos de acionamento (lâmpadas eletrônicas, por exemplo).

Os harmônicos do sistema de potência são definidos como tensão e correntes senoidais em freqüências que são múltiplos inteiros da principal gerado (ou fundamental) de freqüência (ARRILLAGA, 2003).

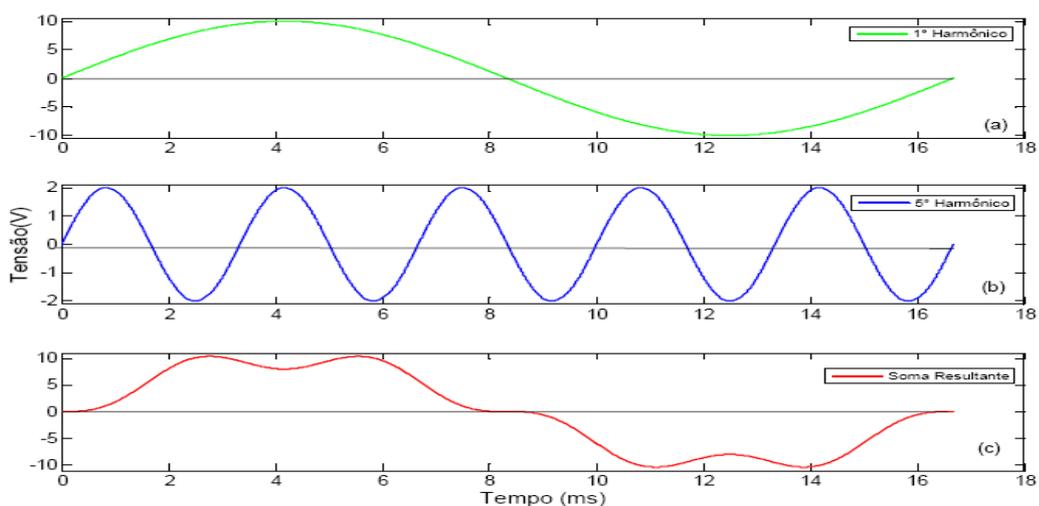


Figura 2 - Tensão normal adicionada da 5^a harmônica resultando o sinal distorcido.

A extração de componentes harmônicas em qualquer âmbito, usualmente é realizada pela Transformada de Fourier (TF), pois foi uma das primeiras técnicas aplicadas à caracterização das frequências dominantes em ondas eletromagnéticas que viajam através do tempo por uma função periódica. Assim, o mesmo princípio pode ser aplicado à extração de harmônica das correntes e/ou tensões em sistemas elétricos de potências, proporcionando uma análise individual de cada componente. (SANKARAN, 2002).

A série de Fourier, desenvolvida pelo matemático Jean Baptiste Fourier, foi formulada sobre a hipótese de que qualquer função periódica não senoidal com frequência fundamental f pode ser expressa como a soma de infinitas funções periódicas senoidais com frequências múltiplas da fundamental. (SANKARAN, 2002).

A Equação 3 mostra o cálculo da série de Fourier para uma função periódica $x(t)$.

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (3)$$

onde, a_0 representa o valor médio da função periódica $x(t)$ e tanto a_n quanto b_n são os coeficientes da série, os quais se estendem até a n -ésima ordem harmônica.

Como visto até o momento, as distorções harmônicas são causadas por cargas que apresentam comportamento não linear, isto é, cargas que requerem correntes com componentes harmônicos de alta densidade. Em geral este comportamento não linear pode ser observado pela não conformidade da forma de onda de corrente quando relacionada com a forma de onda de alimentação da carga. (DUGAN, 2001).

Os sinais harmônicos são classificados quanto a sua ordem, frequência e seqüência, conforme indicado na tabela 1.

Ordem	Frequência (Hz)	Seqüência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n \cdot 60$	—

Tabela 1 - Ordem, frequência e seqüência das harmônicas

Em uma situação ideal, onde somente existisse um sinal de frequência 60 Hz, apenas existiria a harmônica de ordem 1, chamada de fundamental.

Observando a tabela acima, vemos dois tipos de harmônica: as ímpares e pares. As Ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral e as pares existem nos casos de haver assimetrias do sinal devido a presença de componentes contínuas.

A seqüência pode ser positiva, negativa ou nula (zero). Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores ($3F + N$), as harmônicas de seqüência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de seqüência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, etc. (PROCOBRE, 2003)

As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de seqüência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somasse as correntes algebricamente no condutor neutro, Isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem que é três vezes maior que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase. Com isso, ocorrem aquecimento excessivo do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores, etc. (PROCOBRE, 2003).

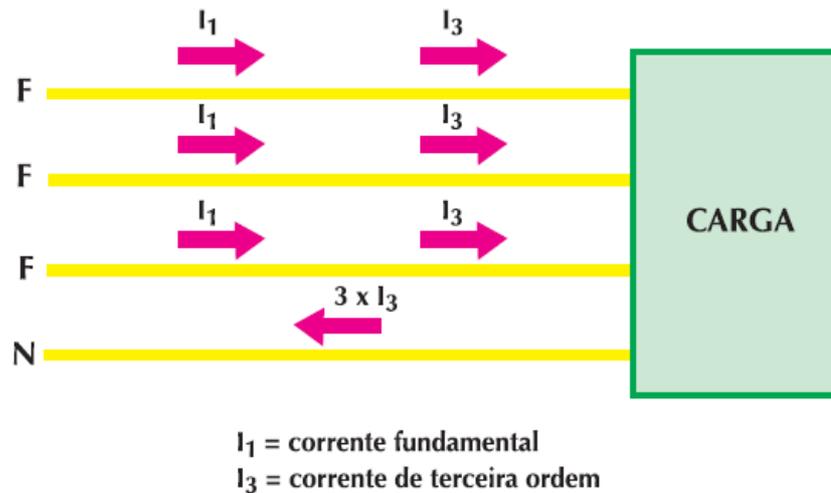


Figura 3 - Harmônico de seqüência zero.

Normalmente, quando a análise de componentes harmônicos de tensão e/ou corrente é realizada sobre os sistemas de eletrônicos de potências, não leve em consideração a extração das freqüências harmônicas acima da 63ª ordem, pois os equipamentos necessitariam de maior precisão, a qual viria acompanhada por um alto custo associado ao equipamento de inferência. (DUGAN, 2001).

Os efeitos das distorções harmônicas, uma vez que as fontes harmônicas estão claramente definidas, devem ser interpretados em termos dos seus efeitos sobre o resto do sistema em pessoal e equipamento externo ao sistema de potência (NUNES, 2007). Cada elemento do sistema de alimentação deve ser examinado para a sua sensibilidade harmônica como base para as recomendações sobre os níveis permitidos. Os principais efeitos da tensão e corrente harmônicas dentro do sistema de alimentação são (OLIVEIRA, 2008):

- A possibilidade de ampliação dos níveis de harmônicas resultantes de série e em paralelas ressonâncias;
- Uma redução na eficiência de geração, transmissão e utilização da energia elétrica;
- O envelhecimento do isolamento dos componentes de instalações elétrico com conseqüente encurtamento de sua vida útil;
- O mau funcionamento do sistema ou fábrica de componentes.
- Aquecimento excessivo;
- Disparo de dispositivo de proteção;
- Vibrações;

- Aumento da queda de tensão;
- Tensão elevada entre neutro e terra;
- Sobrecarga em equipamentos.

Entre os possíveis efeitos externos dos harmônicos são uma degradação na comunicação sistemas de desempenho, ruído audível excessiva e harmônica induzida por tensão e correntes.

2.3 – Indicadores de distorções harmônicas

Existem indicadores que permitem quantificar e avaliar a distorção harmônica das ondas das ondas de tensão e de corrente. Estes são

- O fator de potência;
- O fator de crista;
- A potência de distorção;
- O espectro em frequência;
- A taxa de distorção harmônica (THD).

Estes indicadores são indispensáveis para a determinação das ações corretivas eventuais. Para o trabalho em questão será analisado e avaliado somente o indicador taxa de distorção harmônica, pois é uma notação muito utilizada para definir a importância do conteúdo harmônico de um sinal alternado (SCHNEIDER, 2005).

2.3.1 – Indicador distorção harmônica total (THD)

A sigla THD vem do inglês Total Harmonic Distortion, distorção harmônica total. Esse indicador mostra em percentual o quanto temos de distorção harmônica em relação ao sinal completo. É utilizado para medir o nível de “poluição” causado por um conjunto de harmônica em um sistema elétrico, os cálculos do THD de tensão e corrente são apresentados pelas Equações 4 e 5 respectivamente.

Para tensão:

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} u_h^2}}{U_1} \quad (4)$$

Onde:

THD_u = representa o THD de tensão de uma leitura;

U_1 = harmônica de tensão fundamental;

U_h = harmônica de tensão de ordem n;

h = harmônica de tensão inicial de ordem 2.

Para corrente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} i_h^2}}{I_1} \quad (5)$$

Onde:

THD_i = representa o THD de corrente de uma leitura;

I_1 = harmônica de corrente fundamental;

I_h = harmônica de corrente de ordem n;

h = harmônica de corrente inicial de ordem 2.

2.4 – Normas regulamentadoras e recomendações

Existem várias normas e recomendações de diversas organizações mundiais sobre os limites de harmônicas em sistemas elétricos. Todas estas recomendações são desenvolvidas com o auxílio de diversos fabricantes de equipamentos, concessionárias de energias e instituições de pesquisa.

Pode-se dizer que de um modo geral as recomendações são criadas com o objetivo de fornecer uma referência comum para todas as partes envolvidas de forma que haja compatibilidade entre as instalações dos consumidores e das concessionárias.

Portando, algumas das principais recomendações serão tratadas, como é o caso da IEE Std. 519-1992 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e de algumas IEC 61000-X_X (International Electrotechnical Commission).

É importante salientar que nesta sessão só será abordados as normas e/ou recomendações utilizadas como base pela proposta deste trabalho.

2.4.1 – IEEE Std. 519-1992

O IEEE Std. 519-1992 (Práticas recomendadas e requisitos para controle de harmônicas em sistemas elétricos de potência) propõe um compartilhamento de responsabilidades para a manutenção das harmônicas no PAC (Ponto de Acoplamento Comum), onde os consumidores devem garantir que as correntes harmônicas estejam limitadas e as concessionárias, por sua vez, garantam os limites das distorções harmônicas de tensão. Esta recomendação propõe a avaliação das harmônicas no PAC, pois assim pode-se determinar como um consumidor afeta tanto a concessionária quanto outro consumidor conectado ao mesmo alimentador. A tabela 2 mostra os limites dos indicadores DHI (distorção harmônica individual) e DHT (distorção harmônica total) para limitação da distorção harmônica de tensão para o ponto de acoplamento comum (PAC).

Tensão nominal no PAC (U_n)	Distorção harmônica individual (%)	Distorção harmônica total (%)
$U_n \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < U_n \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$U_n > 161 \text{ kV}$	1,0	1,5

Tabela 2 - Limites recomendados pela IEEE Std 519-192.

2.4.2 – IEC 61000-2-2

A IEC-61000-2-2 limita distorções harmônicas de tensão para consumidores com tensão de alimentação entre 240V e 450v para sistema trifásicos ou monofásicos que estejam operando com frequência nominal de 50Hz ou 60Hz. Os níveis de harmônicas aceitáveis são mostrados pela Tabela 3, onde observa-se que os níveis são dados como um percentual da fundamental.

Harmônicos ímpares não múltiplos de 3		Harmônicos ímpares múltiplos de 3		Harmônicos pares	
Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \times 25/n$				

Tabela 3 - Níveis de distorção harmônica individual conforme o IEC 61000-2-2.

2.4.3 – IEC 61000-4-7

A norma IEC 61000-4-7 especifica as diretrizes necessárias para o projeto e construção de medidores de distorção harmônica. De acordo com essa norma, os medidores de THD são basicamente compostos por: circuitos de entrada com filtros anti-aliasing, conversores A/D, unidade de sincronização e um processador de transformada discreta de Fourier responsável por fornecer os coeficientes de Fourier. No aspecto metrológico, a IEC 61000-4-7 define duas classes de exatidão para medidores de THD. A classe I é utilizada quando são necessárias medições com elevado grau de precisão de exatidão. Os instrumentos de classe II são recomendados para aplicações mais gerais.

2.4.4 – IEC 61000-4-30

A norma IEC 61000-4-30, publicada em 2003, que objetiva botar um ponto final nas indefinições em relação a como se medem os parâmetros de qualidade, conhecidos também como protocolos de medição. A forma de agregação dos dados de protocolos de medição de parâmetros de qualidade não possuía uma formatação definida antes desta norma, de forma que alguns fabricantes se utilizavam disto para criar equipamentos que normalmente nem sequer faziam a agregação sobre todos os dados, valendo-se de leituras espaçadas no tempo de valores e perdendo assim vários ciclos de informação. A norma indica que os dados devem ser agrupados em três (3) tempos diferentes: 180 ciclos para 60Hz ou 150 ciclos para 50Hz; 10 minutos e 2 horas.

A norma define que as harmônicas de tensão devem ser calculadas conforme a norma IEC 61000-4-7:2002 classe 1, e que deve ser determinado um período de 10/12 ciclos, sem gaps descrito como Cng na norma 61000-4-7:2002. A agregação segue o conceito da 61000-4-30. As harmônicas de corrente estão definidas da mesma maneira, porém esta definição está no anexo da norma.

Conforme mostrado neste capítulo, um conjunto de fundamentos da qualidade de energia com os seus respectivos indicadores, onde foi delimitada a pesquisa, focando o objetivo deste trabalho, nas distorções harmônicas apresentando o indicador total de distorção harmônica (THD) com suas respectivas normas e regulamentações.

CAPÍTULO III

3. FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

A Lógica, ciência fundada por Aristóteles, lida com verdadeiro ou falso. Uma proposição pode ser verdadeira ou falsa em uma ocasião. Se é verdadeira, possui um valor verdadeiro igual a 1. Se não, possui um valor verdadeiro igual a zero. Proposições podem ser combinadas para gerar outras proposições, através de operadores lógicos. (SHAW, 1999).

Quando se diz que uma proposição é verdadeira ou falsa, está se fazendo uma declaração com certeza. Estas são chamadas declarações “crisp”. Por outro lado, existem declarações onde há apenas um certo grau de certeza. Foi para este tipo de situação que a Lógica Fuzzy foi criada. Tratar com proposições que são verdadeiras até um certo grau de certeza – algo entre 0 e 1.

Segundo Feitosa (1992), na década de 60, mais precisamente em 1965, 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.

A característica especial de Lógica *Fuzzy* é a de representar uma forma inovadora no manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A Lógica *Fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (MARÇAL e SUSIN, 2005).

Deste modo, é possível se converter toda a experiência humana em uma forma compreensível pelo computador. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy*, tem um imenso valor prático, pela qual se torna possível a inclusão

da experiência de operadores humanos, os quais controlam os processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos ou que exijam tempo de solução reduzido. O sucesso atualmente reconhecido, de sistemas de modelagem e controle baseados em Lógica *Fuzzy*, em aplicações industriais, tem comprovado sua utilização como mais uma ferramenta (ou tecnologia) para a resolução de problemas de engenharia de controle industrial, manufatura, manutenção, comunicação homem-máquina e em sistemas de tomadas de decisão (MARÇAL e SUSIN, 2005).

Com o desenvolvimento desses elementos de teoria, os estudos desenvolvidos permitiram vislumbrar a possibilidade de se caminhar teoricamente, pois, com os conjuntos *fuzzy*, crescia a possibilidade de interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos, sendo, porém, necessário buscarem-se mecanismos para inferência a partir desses dados. Como os sistemas lógicos são intimamente relacionados com conjuntos, o passo seguinte foi dado em direção à construção de uma lógica capaz de adequar os conjuntos *fuzzy* ao raciocínio do senso comum. Tal sistema denomina-se Lógica *Fuzzy*.

Na tentativa de construir a Lógica *Fuzzy*, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Esta também tem contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como a lingüística, teoria de controle, teoria de informação, modelos de reconhecimento, análise de decisão, recuperação de informação e robótica, onde tem surgido um grande número de máquinas capazes de decisões, as quais são chamadas de máquinas inteligentes.

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 (1992) e 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* A é uma função $f_A: V \rightarrow [0,1]$, onde o conjunto V é chamado o universo de A , com $A \subseteq V \times [0,1]$, $[0,1]$ é o intervalo de números reais e f_A é denominado o conjunto verdade de A . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto *fuzzy* A com a função f_A , ou seja, $A \equiv f_A$.

Por exemplo: Seja $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$. Então um conjunto *fuzzy* A poderia ser do tipo: $A = \{(x_1;0,3), (x_2 ;0,7), (x_4 ;0,1)\}$. É conveniente observar que, cada elemento do conjunto *fuzzy* A possui um valor verdade em $[0,1]$ e que 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 $(x_3 ;0) \in A$. Também por convenção, todos os

elementos do conjunto universo V possuem grau de aderência igual a 1, grau este que não precisa ser representado.

Sejam 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 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 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 6.

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (6)$$

Se x for um conjunto R^+ e A um intervalo fechado, a função indicadora de A assume o aspecto ilustrado na Figura 2.

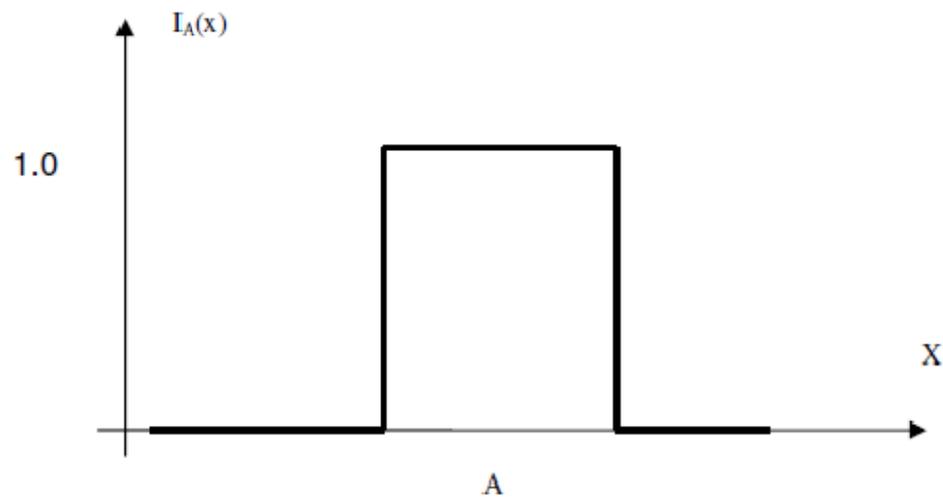


Figura 4 - Função indicadora de A.

Portanto, um conjunto clássico pode ser representado como $A = \{x \in X \mid I_A(x) = 1\}$, ou abreviadamente, $A = \{x, I_A\}$. De forma análoga, os conjuntos nebulosos são definidos por uma função $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ conhecida como a função de pertinência, que expressa o quanto um dado elemento x pertence a A .

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 de pertinência.

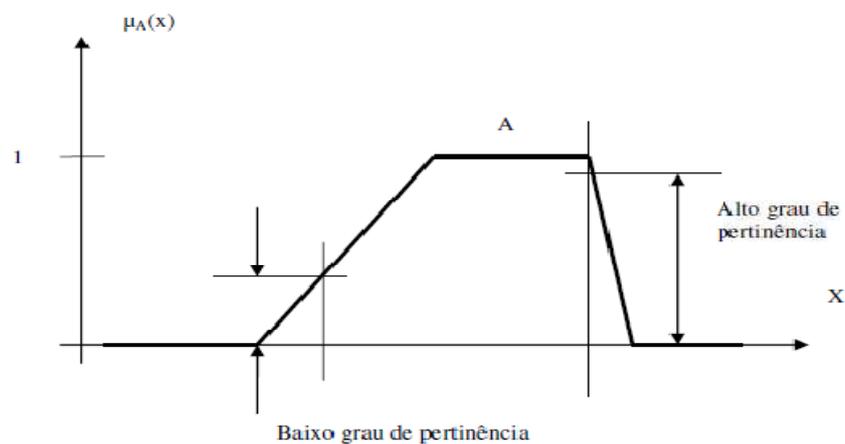


Figura 5 - Função de pertinência de A.

Na técnica de modelagem difusa, a variável lingüística tem o seu lado forte nessa técnica. Essa variável utiliza-se do conceito de qualificadores de conjuntos difusos, mudando a forma dos conjuntos difusos permitindo a utilização de conceitos expressivos. Tem-se, por exemplo, como variáveis lingüísticas os termos, duradouro, muito duradouro, levemente duradouro e pouco duradouro (KLIR, 1995).

A lógica fuzzy descreve propriedades que tem variação contínua de valores associando partes desses valores de um modo semântico, sendo que essas partes podem ser ultrapassadas, correspondendo na transição de um estado para outro (KRUSE, 1992).

A imprecisão e a ambigüidade são relatadas na não coerência entre o entendimento de um fato e de sua existência no mundo real. Isso faz com que haja ferramentas para identificarmos esses entendimentos (MENDEL, 1995).

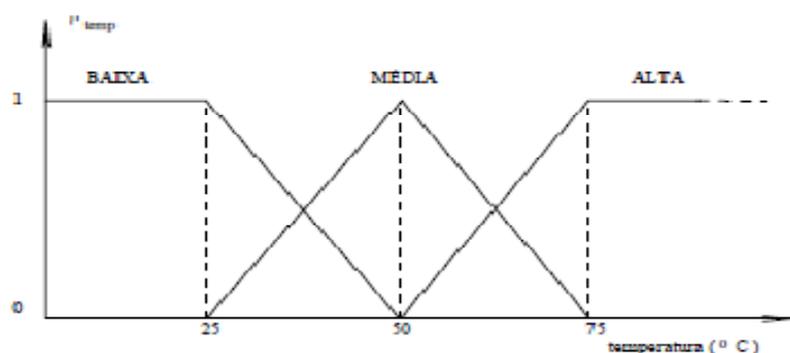


Figura 6 - Variáveis lingüísticas.

3.1 – Sistema de Inferência Fuzzy

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, segundo Cruz (1996).

Segundo 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;
- 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 & 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*.

O Sistema de Inferência Fuzzy é um processo de formulação de cartografia a partir de uma determinada entrada para uma saída utilizando a lógica difusa. A inferência fuzzy tem sido aplicada com sucesso em domínios com o controle automático de dados classificados, a análise de decisão, sistemas de peritos e visão computacional. Devido sua natureza multidisciplinar, na inferência fuzzy os sistemas estão associados a umas séries de nomes, tais como a regra de sistemas base-fuzzy, fuzzy expert systems, fuzzy modelagem, fuzzy com memória associativa (TANAKA, 1974).

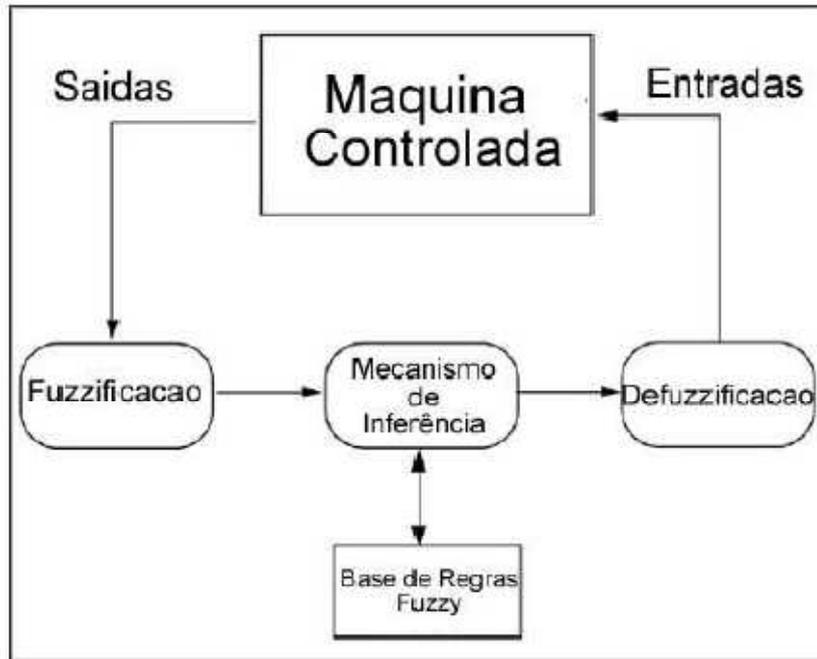


Figura 7 - Modelo de um sistema de inferência Fuzzy.

3.1.1 – 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 et al, 1996).

A forma mais geral de uma regra lingüística é:

SE premissa **ENTÃO** conseqüência.

Para Driankov (1996), 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 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 (VIEIRA, 1999).

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.

3.1.2 – Fuzzyficação

A fuzzyficação 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 (1997), o tipo e a quantidade de funções de pertinência usadas em um sistema dependem de:

1. Precisão;
2. Estabilidade;
3. Facilidade de implementação;
4. Manipulação;
5. 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).

- a) Função trapezoidal: esta função utiliza quatro parâmetros (a,b,c,d), mais a variável de entrada a ser fuzificada;

$$\text{trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (7)$$

- b) Função gaussiana: utiliza dois parâmetros (σ, c), mais a variável de entrada a ser fuzificada.

$$\text{gaussiana}(x; \sigma, c) = e^{-\{(x-c)/\sigma\}^2} \quad (8)$$

- c) Função triangular: esta função utiliza três parâmetros (a,b,c), mais a variável de entrada a ser fuzificada;

$$\text{triangular}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (9)$$

3.1.2 – Inferência

Depois das variáveis lingüísticas serem interpretadas, por meio da fuzzyficação, 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 fuzzyficação. Cada antecedente tem um grau de pertinência indicado para ele como resultado da fuzzyficação. 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).

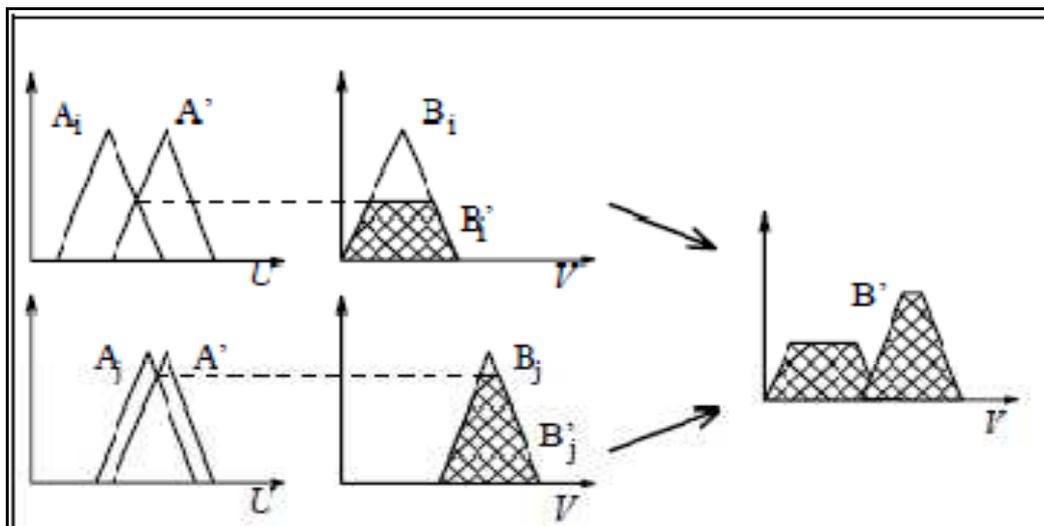


Figura 8 - Mecanismo de inferência Fuzzy.

3.1.3 – Defuzzyficação

A defuzzyficação 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 defuzzyficação, 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).

Na tentativa de construir a Lógica *Fuzzy*, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Esta também tem contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como a lingüística, teoria de controle, teoria de informação, modelos de reconhecimento, análise de decisão, recuperação de informação e robótica, onde tem surgido um grande número de máquinas capazes de decisões, as quais são chamadas de máquinas inteligentes (KLIR, 1995).

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGIA PROPOSTA

O sistema elétrico brasileiro foi projetado para operar com uma frequência de 60 Hz, no entanto o uso disseminado de equipamento de natureza não linear causou uma mudança nesse cenário, introduzindo harmônicas no sistema que, por sua vez afetam os diversos equipamentos conectados a rede elétrica.

A metodologia proposta para auxiliar o diagnóstico da qualidade de energia elétrica sob a ótica das distorções harmônica analisando o indicador total de distorção harmônica em sistema elétrico trifásico de baixa tensão está dividida nas seguintes etapas:

4.1 - Etapa 01: Definição do equipamento de medição.

As medições são essenciais para a identificação de componentes harmônicos em sistemas elétricos. Mede-se normalmente tensão e corrente em vários pontos do sistema, o que possibilita a análise de harmônicos, servindo também como ponto de partida para a metodologia proposta.

Os fornecedores de equipamento de medidores de distorção harmônica devem atender as normas regulamentadoras IEC 6100-4-7 e IEC 6100-4-30. O equipamento do fornecedor deve dispor de uma funcionalidade para exportar (disponibilizar) a leitura realizada permitindo assim a sua análise com os seguintes dados para cada fase: 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, a Tabela 4 apresenta um modelo para a disposição dos dados medidos.

DATA	HORA	H2_V1	...	H50_V1	H2_V2	...	H50_V2	H2_V3	...	H50_V3	H2_I1	...	H50_I1	H2_I2	...	H50_I2	H2_I3
10/08/10	10:10	0,4	.	0,6	0,9	.	1	0,9	.	1	0,2	.	0,8	0,1	.	0,5	0,9
10/08/10	10:15	0,1	.	0,1	0,1	.	1,9	0,1	.	1,9	0,5	.	1,4	0,1	.	0	0,4

Tabela 4 - Estrutura do arquivo exportado pelo equipamento de medição.

Legenda:

H2_I1...H50_I1 e H2_V1...H50_V1: representa todas as harmônicas de corrente e tensão da 2ª até a 50ª ordem da fase 1.

H2_I2...H50_I2 e H2_V2...H50_V2: representa todas as harmônicas de corrente e tensão da 2ª até a 50ª ordem da fase 2.

H2_I3...H50_I3 e H2_V3 ..H50_V3: representa todas as harmônicas de corrente e tensão da 2ª até a 50ª ordem da fase 3.



Figura 9 - Analisador de Energia

4.2 - Etapa 02: Realização da leitura.

Para realizar um conjunto de leituras que possam refletir o monitoramento contínuo da planta elétrica recomenda-se:

- No período de 24h devem-se realizar doze (12) leituras de 2h distribuída igualmente no período.
- Para cada período de leitura de 2h o equipamento medidor deve está configurado para registrar a tensão, corrente e conseqüentemente calcular suas respectivas componentes harmônicas até a 50ª ordem a cada 10 minutos.
- A primeira leitura deve ocorrer no circuito de entrada principal da instalação elétrica. A procura do poluidor (equipamento responsável pela geração do distúrbio) para isso deve-se realizar a análise do THD de corrente na entrada e em cada uma das saídas de diferentes circuitos, a fim de se orientar em direção ao perturbador.

- Definir os pontos de leitura: realizar as leituras contínuas em pontos estratégicos da planta da rede elétrica. Para auxiliar essa orientação sugere-se seguir o diagrama multifilar que permite que sejam visualizadas as conexões do quadro aos seus circuitos terminais e quadros subordinados. Dessa maneira, pode-se verificar graficamente, as quais fases estão conectadas os circuitos conforme Figura 11.

Com os pontos de leitura definidos para realização uma equipe pode ser designada para fazer o trabalho de coletas das respectivas leituras. Cada leitura realizada em um determinado período (2h) as informações exportadas pelo equipamento, apresentado veja Tabela 4, devem ser armazenadas em um banco de dados que será definido na etapa 5 para serem utilizadas na etapa 6 de diagnóstico.

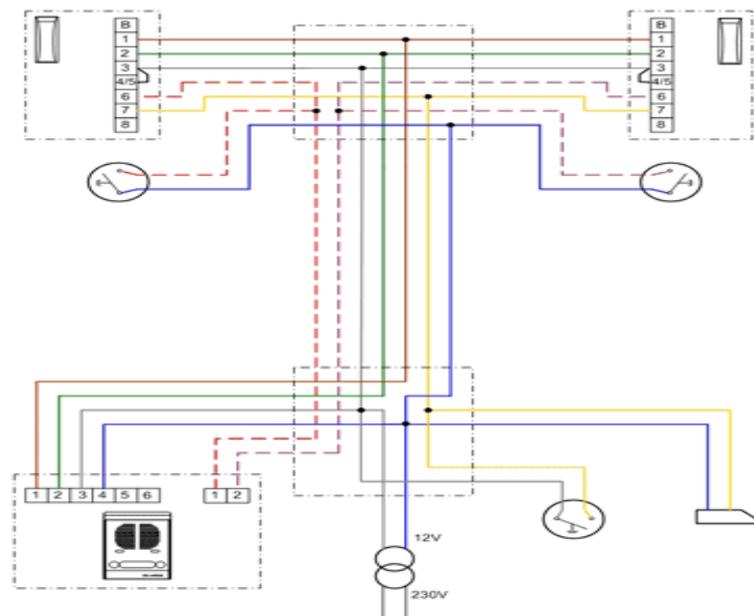


Figura 10 - Exemplo de um diagrama multifilar.

4.3 - Etapa 03: Formulação dos diagnósticos básicos.

Nesta etapa será realizada a formulação dos diagnósticos básicos, isto é, como a metodologia proposta irá analisar e diagnosticar as distorções harmônicas.

O primeiro passo é definir qual indicador representa de forma eficiente as distorções harmônicas, para isso será utilizado o indicador THD (total de distorção

harmônica) que traduz através de uma só grandeza a deformação da onda em tensão ou em corrente.

A recomendação IEEE 519-1992 (Harmonic in Power System) estabelece limites para distorção harmônica de corrente e tensão em circuito de distribuição e transmissão para sistema de baixa tensão. Como a recomendação IEEE 519-1992 especifica somente os valores aceitáveis, isto é, dentro dos limites, do THD. Será tomado também como referência os limites sugeridos em SCHNEIDER (2005), que obedece aos limites especificados no IEEE 519-1992 e ainda sugere duas novas faixas de valores (significativo e crítico) para o THD de tensão (THD_U) e corrente (THD_I) da seguinte forma:

Para tensão THD_U:

- Tipo de diagnóstico: NORMAL
 - Ocorrência: valor de THD de tensão inferior a 5% classificado como valor baixo. (recomendação IEEE 519-1992).
 - Característica do diagnóstico: algum funcionamento não é temido.
- Tipo de diagnóstico: SIGNIFICATIVO
 - Ocorrência: valor de THD de tensão compreendido entre 5% e 8% classificado como valor médio. (sugerido por SCHNEIDER (2005)).
 - Característica do diagnóstico: quaisquer funcionamento são possíveis.
- Tipo de diagnóstico: CRÍTICO
 - Ocorrência: valor de THD de tensão superior a 8% classificado como valor alto. (sugerido por SCHNEIDER (2005)).
 - Característica do diagnóstico: funcionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Para corrente THD_I:

- Tipo de diagnóstico: NORMAL
 - Ocorrência: valor de THD de corrente inferior a 10% classificado como valor baixo. (recomendação IEEE 519-1992).
 - Característica do diagnóstico: algum funcionamento não é temido.

- Tipo de diagnóstico: SIGNIFICATIVO
 - Ocorrência: valor de THD de corrente compreendido entre 10% e 50% classificado como valor médio. (sugerido por SCHNEIDER (2005)).
 - Característica do diagnóstico: existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes.
- Tipo de diagnóstico: CRÍTICO
 - Ocorrência: valor de THD de corrente superior a 50% classificado como valor alto. (sugerido por SCHNEIDER (2005)).
 - Característica do diagnóstico: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Com os tipos básicos dos diagnósticos definidos, bem como, com suas respectivas características é possível formular outros conjuntos de diagnósticos relacionando os tipos NORMAIS, SIGNIFICATIVOS e CRÍTICO, para isso será utilizado um sistema especialista Fuzzy que será demonstrado na etapa 4.

4.4 - Etapa 04: Determinação do indicador THD de tensão e corrente.

Para cada leitura de tensão e corrente realizada, em um determinado período, será gerada um conjunto de componentes harmônica da 2ª até a 50ª ordem (Tabela 4) para cada fase do sistema elétrico trifásico. Os conjuntos de componentes harmônicas geradas de uma leitura serão utilizados para calcular o THD de tensão e corrente. Para extrair o THD de tensão e corrente da leitura realizada no sistema elétrico serão utilizadas as equações 4 e 5 respectivamente.

O conjunto de componentes harmônicas (ordem das harmônicas) contidas no arquivo exportado de leitura gerada a partir do equipamento de medição será responsável pela geração de outro conjunto de dados representando pares de THD de tensão e corrente respectivamente. Este conjunto contendo os pares de THD de tensão e corrente que será avaliado pelo sistema especialista Fuzzy (etapa 6) com o objetivo de determinar o tipo de diagnóstico que será atribuído a cada par de THD de tensão e corrente.

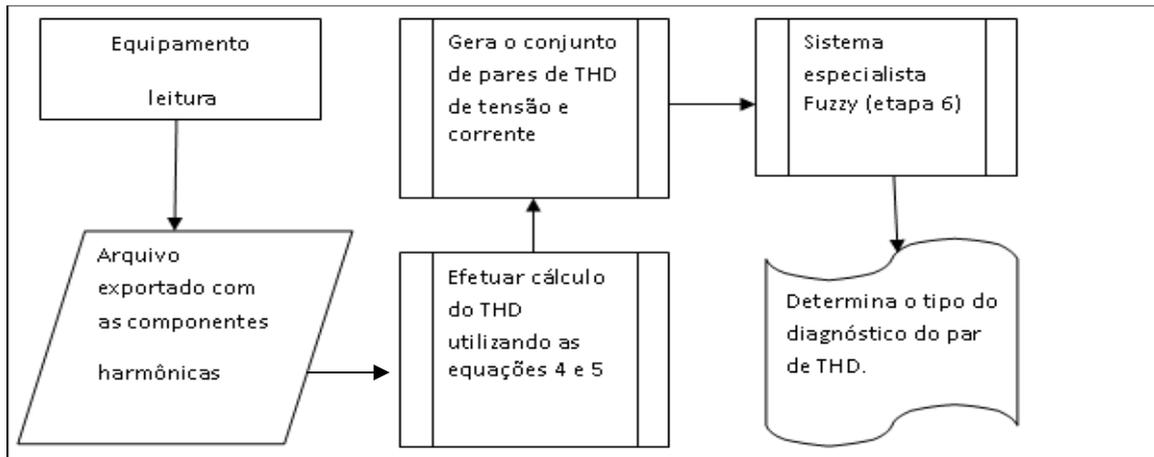


Figura 11 - Fluxo para geração do TH de tensão e corrente.

4.5 - Etapa 05: Definição do banco de dados.

Para o monitoramento contínuo da qualidade de energia referente aos distúrbios harmônicos torna-se necessário a criação de banco de dados que armazene os dados lidos com os seus respectivos diagnósticos. O banco de dados será constituído das seguintes informações:

- Dados do Equipamento de Medição
 - Registrar os dados técnicos do equipamento utilizado para realizar as leituras das harmônicas no sistema elétrico, com estes dados pode-se fazer uma análise do equipamento com relação às normas regulamentadoras para construção dos mesmos. Para cada equipamento será armazenado o número de série, nome, classe, descrição e modelo.
- Dados da Leitura
 - Cada leitura utiliza um equipamento para realizar a leitura periodicamente no sistema elétrico trifásico. Para cada leitura deve-se registrar o número de identificação da leitura, período de leitura (data, hora início e fim), local da leitura e observações.
- Dados da Grandeza
 - Uma leitura possui um conjunto de grandezas. Para cada grandeza deve-se registrar o número de identificação da grandeza, o valor da freqüência, corrente, tensão, fase, data e hora da leitura.

- Dados das componentes harmônicas
 - Uma grandeza lida gera um conjunto de componentes harmônicas. Para cada componente harmônica deve-se registrar o número de seqüência, o valor da componente harmônica de tensão e corrente com suas respectivas ordens. São esses conjuntos de componentes que irá gerar o THD (taxa de distorção harmônica) de cada leitura para futuro diagnóstico.
- Tipos de diagnóstico e características
 - Cada diagnóstico terá um tipo com suas respectivas características com um número de identificação e descrição.
- Dados do diagnóstico
 - Finalmente será armazenado o diagnóstico final contendo as seguintes informações: identificador da leitura e tipo do diagnóstico ao qual o diagnostico final está associado, o valor do THD diagnosticado de tensão e corrente bem como a data.

Para representar o modelo de banco de dados será utilizada a técnica do modelo conceitual utilizado na modelagem de banco de dados conforme a Figura 13.

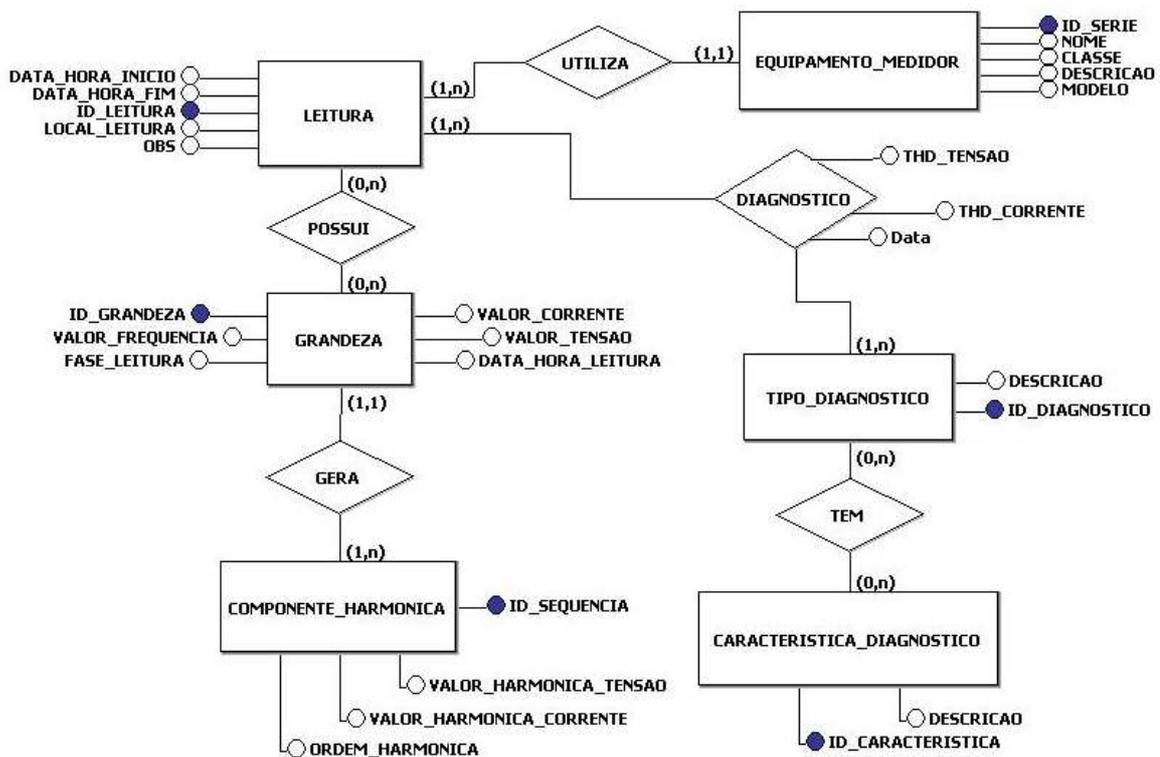


Figura 12 - Modelo conceitual do banco de dados proposto.

4.6 - Etapa 06: Elaboração do sistema de inferência Fuzzy.

Como um sistema de inferência Fuzzy é constituído de um processo de fuzzificação (variáveis de entrada), defuzzificação (variáveis de saída), mecanismo de inferência (Mamdani) apoiado por um especialista (recomendação IEEE 519-1992 e SCHNEIDER (2005)) temos a definição do sistema de inferência Fuzzy proposto da seguinte forma:

4.6.1 - Definição das variáveis de Entrada

As variáveis de entrada serão os pares de THD de tensão e corrente do conjunto gerado na etapa 4. Para cada par de THD será feito a seguinte análise:

Para tensão:

- Variável lingüística: THD_U
- Termo lingüístico:
 - Baixo: THD de tensão inferior a 5%.
 - Médio: THD de tensão entre 5% e 8%.
 - Alto: THD de tensão acima de 8%.

Para corrente:

- Variável lingüística: THD_I
- Termo lingüístico:
 - Baixo: THD de corrente inferior a 10%.
 - Médio: THD de corrente entre 10% e 50%.
 - Alto: THD de corrente acima de 50%.

4.6.2 - Definição da variável de Saída

A variável de saída irá representar o tipo de diagnóstico gerado a partir das ativações das regras do sistema de inferência que representam todas as combinações possíveis entre as relações dos tipos de diagnóstico básico definidos na etapa 3. Para cada variável de saída será feita a seguinte análise:

- Variável lingüística: DIAGNÓSTICO
- Termo lingüístico:
 - N (normal): THD de tensão e corrente normais.
 - IS&UN: THD de corrente significativo e THD de tensão normal.
 - IC&UN: THD de corrente crítico e THD de tensão normal.
 - IN&US: THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
 - S: THD de corrente e de tensão significativo.
 - IC&US: THD de corrente crítico e THD de tensão significativo.
 - IN&UC: THD de corrente normal e THD de tensão crítico.
 - IS&UC: THD de corrente significativo e THD de tensão crítico.
 - C: THD de corrente e de tensão crítico.

4.6.3 - Definição do método de inferência:

O método de inferência que será utilizado é o método chamado Mandani é o mais comumente visto através da metodologia fuzzy. O método Mandani foi um dos primeiros sistemas de controle construídos usando teoria de conjunto fuzzy 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.

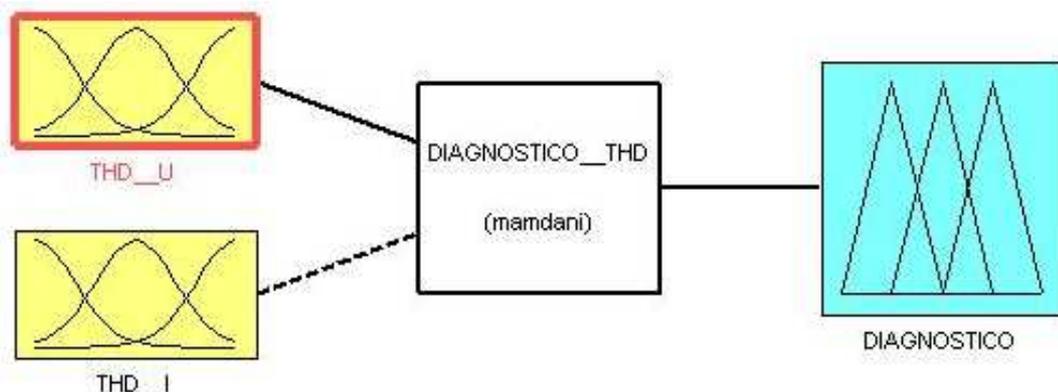


Figura 13 - Sistema de inferência Fuzzy proposto.

A Figura 14 representa o sistema de inferência fuzzy proposto onde: [THD_U] – representa a variável de entrada de tensão. [THD_I] - representa a variável de

entrada de corrente, formando assim o par de entradas de THD. [DIAGNÓSTICO_THD] – representa o sistema de inferência Mandani. [DIAGNÓSTICO] – representa a variável de saída do diagnóstico.

Serão agora definidas as funções de pertinência para as variáveis de entrada THD de tensão e corrente (THD_U e THD_I) com os seus respectivos termos lingüísticos, bem como a variável de saída (DIAGNÓSTICO).

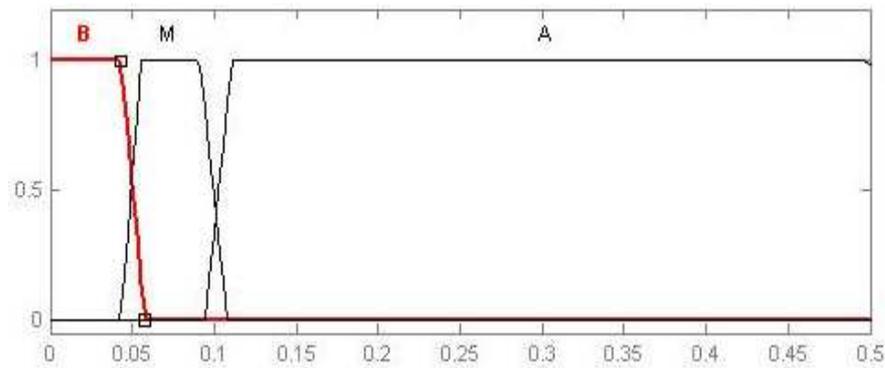


Figura 14 - Função de pertinência da variável THD_U.

A Figura 15 representa a variável de entrada da tensão THD_U onde: [B] - representa o valor baixo (THD de tensão menor que 5%). [M] representa o valor médio (THD de tensão entre 5% e 8%). [A] – representa o valor alto (THD de tensão acima de 8%).

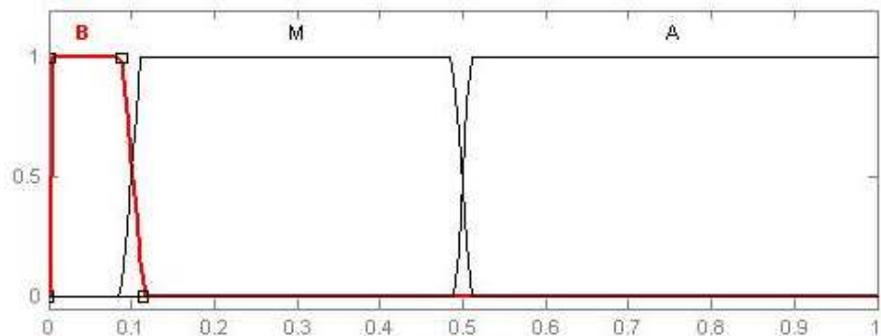


Figura 15 - Função de pertinência da variável THD_I.

A Figura 16 representa a variável de entrada de corrente THD_I onde: [B] - representa o valor baixo (THD de corrente menor que 10%). [M] representa o valor médio (THD de corrente entre 10% e 50%). [A] – representa o valor alto (THD de corrente acima de 50%).

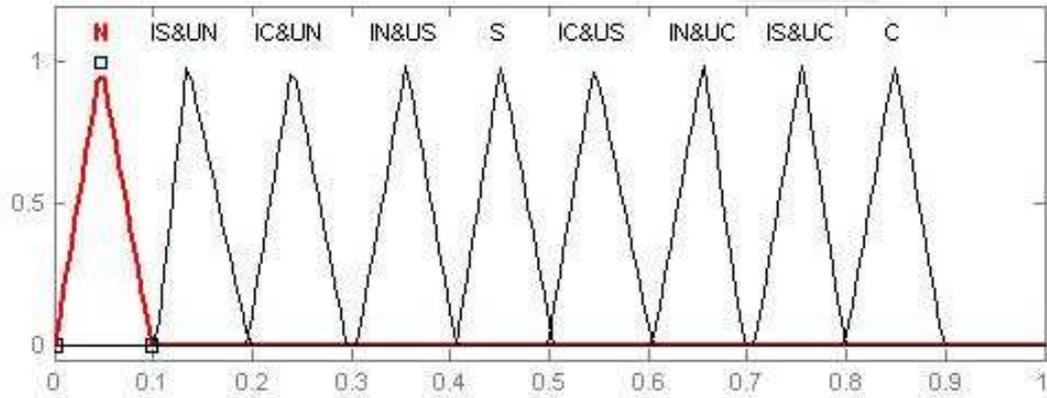


Figura 16 - Função de pertinência da variável de saída DIAGNOSTICO.

A Figura 17 representa a variável de saída [DIAGNÓSTICO] indicando o tipo de diagnóstico gerado a partir dos valores das variáveis de entrada (THD_U e THD_I).

4.6.4 - Definição das Regras Fuzzy

Com os tipos de diagnóstico básicos definidos na etapa 3 para o THD de tensão (THD_U) e corrente (THD_I) é possível relacioná-los possibilitando a criação de novos tipos de diagnóstico levando em consideração a uma análise do THD de tensão e corrente simultaneamente, conforme a Tabela 5.

THD	THD_U Baixo	THD_U Médio	THD_U Alto
THD_I Baixo	N	IN&US	IN&UC
THD_I Médio	IS&UN	S	IS&UC
THD_I Alto	IC&UN	IC&US	C

Tabela 5 - Relação dos níveis de THD de tensão e corrente.

As regras foram definidas da seguinte forma:

Se THD_U é BAIXO E THD_I é BAIXO

Então DIAGNOSTICO é N;

Descrição: THD de tensão e corrente normais.

Se THD_U é BAIXO E THD_I é MÉDIO

Então DIAGNOSTICO é IS&UN;

Descrição: THD de corrente significativo e THD de tensão normal.

Se THD_U é BAIXO E THD_I é ALTO

Então DIAGNOSTICO é IC&UN;

Descrição: THD de corrente crítico e THD de tensão normal.

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é BAIXO

Então DIAGNOSTICO é IN&US;

Descrição: THD de corrente normal e THD de tensão significativo.

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é MÉDIO

Então DIAGNOSTICO é S;

Descrição: THD de corrente e de tensão significativo.

Se THD_U é MÉDIO E THD_I é ALTO

Então DIAGNOSTICO é IC&US;

Descrição: THD de corrente crítico e THD de tensão significativo.

Se THD_U é ALTO E THD_I é BIXO

Então DIAGNOSTICO é IN&UC;

Descrição: THD de corrente normal e THD de tensão crítico.

Se THD_U é ALTO E THD_I é MÉDIO

Então DIAGNOSTICO é IS&UC;

Descrição: THD de corrente significativo e THD de tensão crítico.

Se THD_U é ALTO E THD_I é ALTO

Então DIAGNOSTICO é C;

Descrição: THD de corrente e de tensão crítico.

Após a execução de todos os passos de elaboração do sistema de inferência Fuzzy pode-se observar na Figura 18 a relação entre as variáveis de entrada (THD_U e THD_I) com a variável de saída (DIAGNÓSTICO).

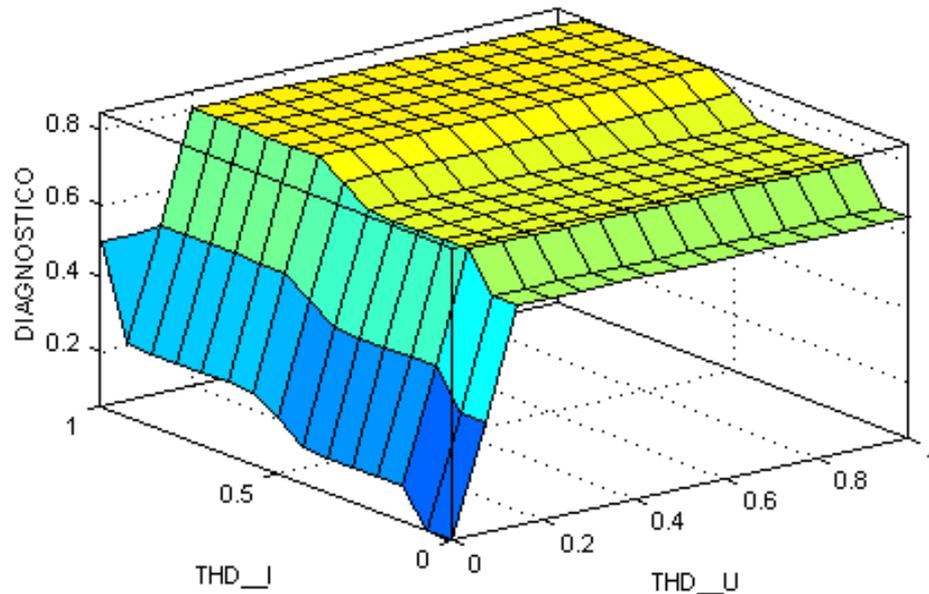


Figura 17 - Gráfico de superfície do diagnóstico em função do THD_I e THD_U.

4.7 – Etapa 07: Determinação do diagnóstico

Para determinar, finalmente, o tipo de diagnóstico é necessário classificar o valor da variável de saída DIAGNÓSTICO (gerado a partir da etapa 6), associando um número identificador do tipo do diagnóstico, uma descrição, bem como a descrição da característica do diagnóstico.

4.7.1 – Classificação da variável de saída DIAGNÓSTICO

Diagnóstico: [1] - Normal - (N)

{TIPO 01 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,1$ }

Diagnóstico: [2] - THD de corrente significativo e THD de tensão normal – (IS&UN)

{TIPO 02 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,1 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,2$ }

Diagnóstico: [3] - THD de corrente crítico e THD de tensão normal – (IC&UN)
 {TIPO 03 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,2 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,3$ }

Diagnóstico: [4] - THD de corrente normal e THD de tensão significativo – (IN&US)
 {TIPO 04 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,3 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,4$ }

Diagnóstico: [5] - THD de corrente e de tensão significativo – (S)
 {TIPO 05 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,4 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,5$ }

Diagnóstico: [6] - THD de corrente crítico e THD de tensão significativo – (IC&US)
 {TIPO 06 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,5 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,6$ }

Diagnóstico: [7] - THD de corrente normal e THD de tensão crítico – (IN&UC)
 {TIPO 07 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,6 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,7$ }

Diagnóstico: [8] - THD de corrente significativo e THD de tensão crítico – (IS&UC)
 {TIPO 08 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,7 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,8$ }

Diagnóstico: [9] - THD de corrente e de tensão crítico – (C)
 {TIPO 09 | DIAGNÓSTICO é um número real tal que $0,8 \leq \text{DIAGNÓSTICO} < 0,9$ }

Após a classificação da variável de saída (DIAGNÓSTICO) do sistema de inferência Fuzzy para determinar o tipo do diagnóstico a Tabela 5 demonstra a identificação do tipo de diagnóstico, a faixa do THD de tensão e corrente, à descrição e a característica de cada diagnóstico possível segundo a metodologia proposta. A descrição tanto do tipo do diagnóstico quanto da característica está baseado na combinação do diagnóstico básico formulado da etapa 3.

Identificador	Faixa THD(%)	Descrição	Característica
01	$\text{THD}_I < 10$ $\text{THD}_U < 5$	THD de corrente e tensão normais.	Algum disfuncionamento não é temido.
02	$10 \leq \text{THD}_I < 50$ $\text{THD}_U < 5$	THD de corrente significativo e THD de tensão normal.	Para a corrente: existe risco de aquecimento, implica o

			sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para a tensão: algum disfuncionamento não é temido.
03	$THD_I \geq 50$ $THD_U < 5$	THD de corrente crítico e THD de tensão normal.	Para corrente: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias. Para tensão: disfuncionamento não é temido.
04	$THD_I < 10$ $5 \leq THD_U < 8$	THD de corrente normal e THD de tensão significativo.	Para corrente: algum disfuncionamento não é temido. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.
05	$10 \leq THD_I < 50$ $5 \leq THD_U < 8$	THD de corrente e de tensão significativo.	Para corrente: existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.
06	$THD_I \geq 50$ $5 \leq THD_U < 8$	THD de corrente crítico e THD de tensão significativo.	Para corrente: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.

07	$\text{THD}_I < 10$ $\text{THD}_U \geq 8$	THD de corrente normal e THD de tensão crítico.	Para corrente: algum disfuncionamento não é temido. Para tensão: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.
08	$10 \leq \text{THD}_I < 50$ $\text{THD}_U \geq 8$	THD de corrente significativo e THD de tensão crítico.	Para corrente: existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.
09	$\text{THD}_I \geq 50$ $\text{THD}_U \geq 8$	THD de corrente e de tensão crítico.	Para corrente: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias. Para tensão: disfuncionamento são possíveis, uma análise aprofundada e a colocação de dispositivos de atenuação são necessárias.

Tabela 6 - Definição dos tipos de diagnóstico.

4.7.2 – Análise do DIAGNÓSTICO

Para fazer à análise do diagnóstico final todas as etapas anteriores devem ser realizadas com sucesso de tal forma que todos os dados necessários estejam armazenados no banco de dados proposto na etapa 05.

A análise do diagnóstico final de um determinado período de leitura que gera um conjunto de THD de tensão e corrente será realizada da seguinte forma:

1. Com as componentes harmônicas lidas e armazenadas no banco de dados é possível calcular o valor do THD de tensão e corrente de acordo com a etapa 04;
2. O conjunto de THD de tensão e correntes calculados será à entrada do sistema de inferência Fuzzy. O sistema de inferência foi projetado para entrada de um conjunto de pares de THD de tensão e corrente respectivamente;
3. Como o conjunto de entrada (pares de THD de corrente e tensão) gera um conjunto de saída. Cada valor de saída será classificado de acordo com o tópico 4.7.1 da etapa 07. Para cada tipo de diagnóstico identificado será associado um número entre 1 e 9;
4. Após a classificação teremos um conjunto de valores entre 1 e 9 indicando os possíveis tipos de diagnósticos. Cada tipo possui a sua característica;
5. Com os conjuntos de tipos de diagnósticos será possível fazer vários levantamentos estatísticos referentes à porcentagem de participação de cada tipo de diagnóstico avaliado seja por uma visão do sistema trifásico, ou por cada fase, para avaliação do diagnóstico da qualidade de energia elétrica da respectiva leitura realizada;
6. No final do levantamento estático, por tipo de diagnóstico, cada sentença calculada deverá ser apresentada de acordo com a Tabela 6, formulando assim o diagnóstico final sugerido pela metodologia proposta.

Para finalizar e avaliar as etapas da metodologia sugerida, no capítulo 5, será feito uma aplicação da mesma onde teremos uma formulação do diagnóstico referente a um período de leitura do sistema elétrico.

CAPÍTULO V

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Na execução de todas as etapas até o momento implica que todas as informações necessárias estão armazenadas no banco de dados, com isso é possível gerar o diagnóstico de uma leitura da rede elétrica realizada em um determinado período.

Exemplo:

Para aplicar a metodologia proposta foi utilizado o arquivo *demo_t.ims*, este arquivo foi gerado a partir de uma leitura feita por um equipamento de medição da empresa Indústria de Micro Sistemas Eletrônicos Ltda. (IMS), em uma determinada rede elétrica, contendo um conjunto de 230 medições, cada uma delas gera um THD de tensão e corrente para cada fase do sistema trifásico totalizando, dessa forma, 690 (3 X 230) pares de THD de corrente e tensão. Será este conjunto utilizado para avaliação. O arquivo está disponível no site da IMS (www.ims.ind.br).

Uma forma eficiente para avaliar a metodologia é comparar o procedimento de análise feito utilizando a ferramenta da IMS o software Smart Analisador T (Software de Análise, versão 2.02. 23/111) com a metodologia proposta.

5.1 - Análise realizada pela Ferramenta da IMS:

Após a inferência do sistema elétrico com o equipamento de medição é gerado um arquivo contendo o THD de tensão e corrente (*demo_t.ims*). Com o arquivo de leitura o software de análise da IMS oferece uma visão gráfica para exibir e analisar o THD de tensão e corrente por fase:

Os gráficos 1, 2, 3 e 4 representam a leitura do THD de tensão das fases 1,2 3 e das três fases juntas representando o sistema trifásico respectivamente.

Leitura do THD de Tensão
THD de tensão da fase 01
Demonstra a leitura do THD (porcentagem) da fase 01 em função do tempo.

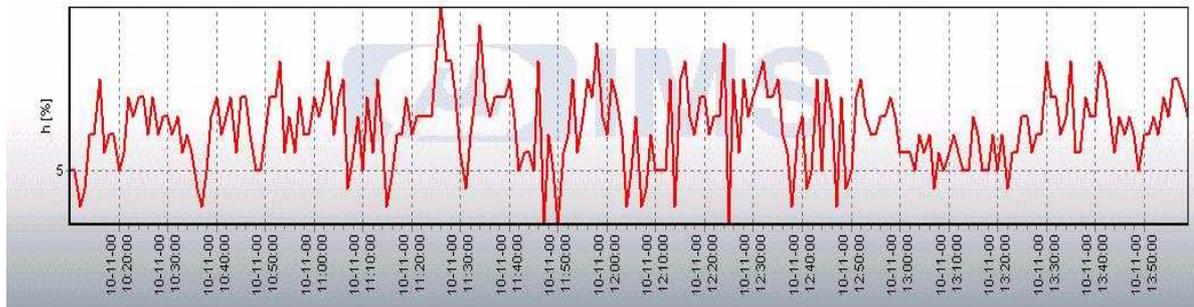


Gráfico 1 - Conjunto de THD de tensão da fase 01.

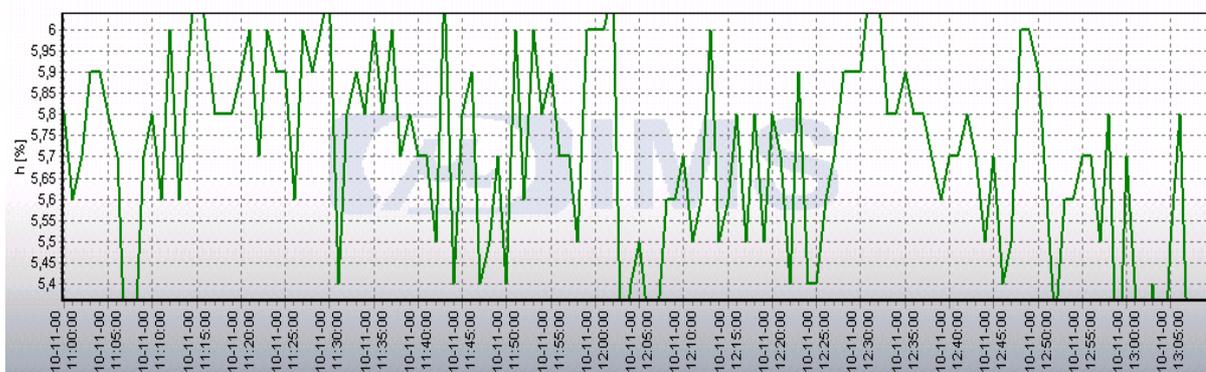


Gráfico 2 - Conjunto de THD de tensão da fase 02.

Leitura do THD de Tensão
THD de tensão da fase 03
Demonstra a leitura do THD (porcentagem) da fase 03 em função do tempo.

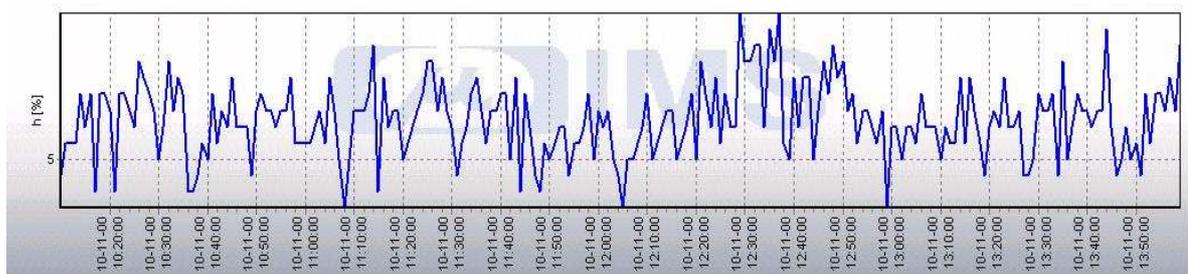


Gráfico 3 - Conjunto de THD de tensão da fase 03.

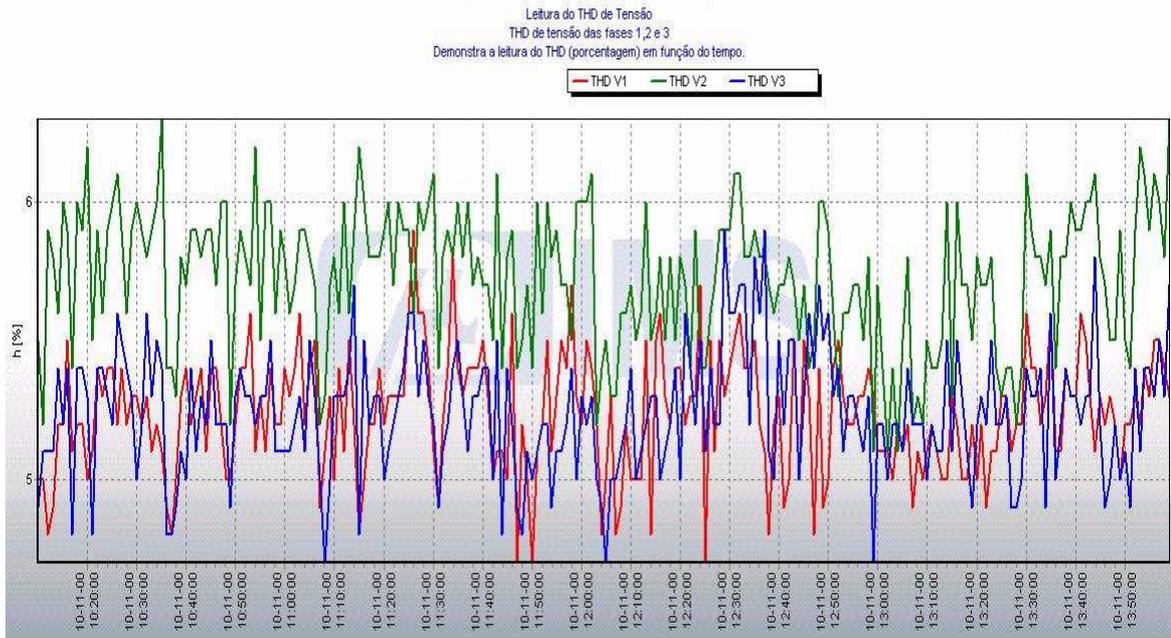


Gráfico 4 - Conjunto de THD de tensão das fases 1,2 e 3 simultaneamente.

Os gráficos 5, 6, 7 e 8 representam a leitura do THD de corrente das fases 1,2 e 3 e das três fases juntas representado o sistema trifásico respectivamente.

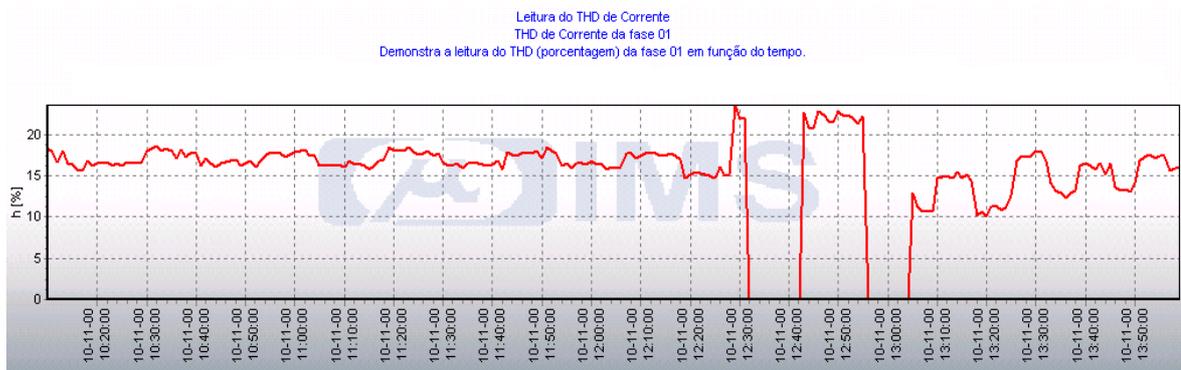


Gráfico 5 - Conjunto de THD de corrente da fase 1.



Gráfico 6 - Conjunto de THD de corrente da fase 2.



Gráfico 7 - Conjunto de THD de corrente da fase 3.

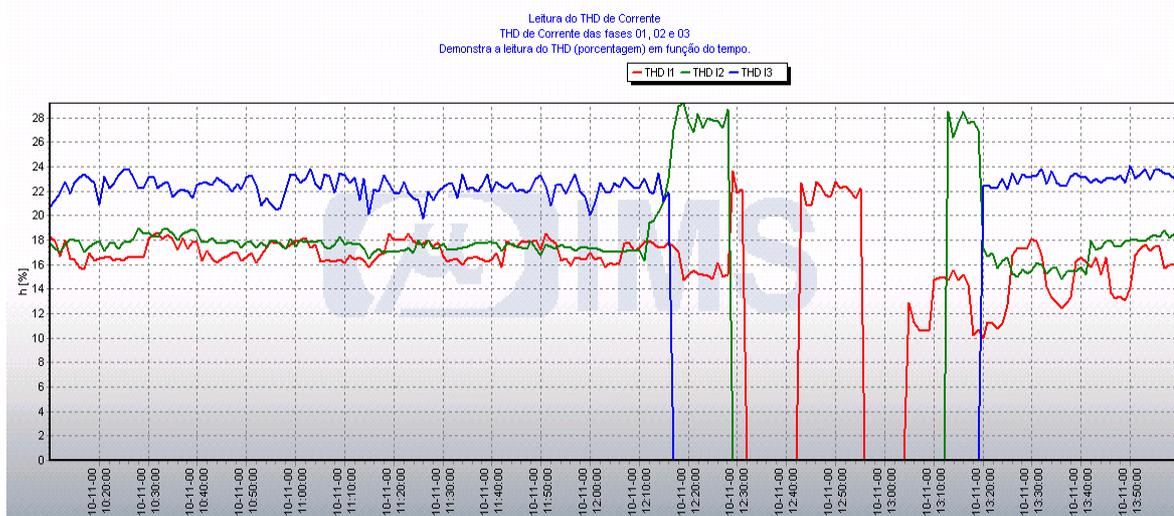


Gráfico 8 - Conjunto de THD de corrente das fases 1, 2 e 3 simultaneamente.

Para fazer a análise do THD da corrente e da tensão o especialista deve realizar a análise de cada gráfico através de seu conhecimento técnico e empírico baseando-se nas normas e recomendações regulamentadoras separadamente para o THD de tensão e corrente. A análise pode ser por fase ou uma visão geral do sistema trifásico.

Após a sua análise deve formalizar a descrição de um diagnóstico que represente o nível das distorções harmônica através do indicador THD no sistema elétrico.

Por exemplo, para fazer a análise dos gráficos acima utilizando a recomendação do IEEE 519-1992 (limites do THD de tensão é de 5% e 10% para corrente) pode-se fazer a seguinte afirmação: analisando separadamente o THD de tensão e corrente observa-se que as fases 1,2 e 3 estão acima dos limites permitidos de forma significativa, conseqüentemente afetando todo o sistema

trifásico, isto pode acarretar conseqüências relevantes a todos os elementos ligados a rede elétrica.

É importante salientar que neste caso a riqueza de detalhe do diagnóstico depende exclusivamente da análise do especialista responsável pela análise.

5.2 - Análise realizada pela metodologia proposta:

Os dados contidos no arquivo de leitura (demo_t.ims) devem está gravados no banco de dados. A partir do banco de dados ou do arquivo (demo_t.ims) deve-se gerar o conjunto de pares de THD de tensão e corrente que serão a entrada para o sistema de inferência Fuzzy. Após processar o conjunto de entrada será gerado o conjunto de saída, onde cada tido de diagnóstico será representado por um número entre 1 e 9.

Com o conjunto de saída é feito o levantamento estatístico da participação de cada tipo de diagnóstico em relação ao conjunto de entrada dos pares de THD tensão e corrente. Cada porcentagem calculada deve ser avaliada seguindo os critérios da Tabela 6, para cada tipo de diagnóstico.

A seguir será formalizado o diagnóstico final para cada gráfico estatístico gerado a partir da etapa 7 do diagnostico proposto.

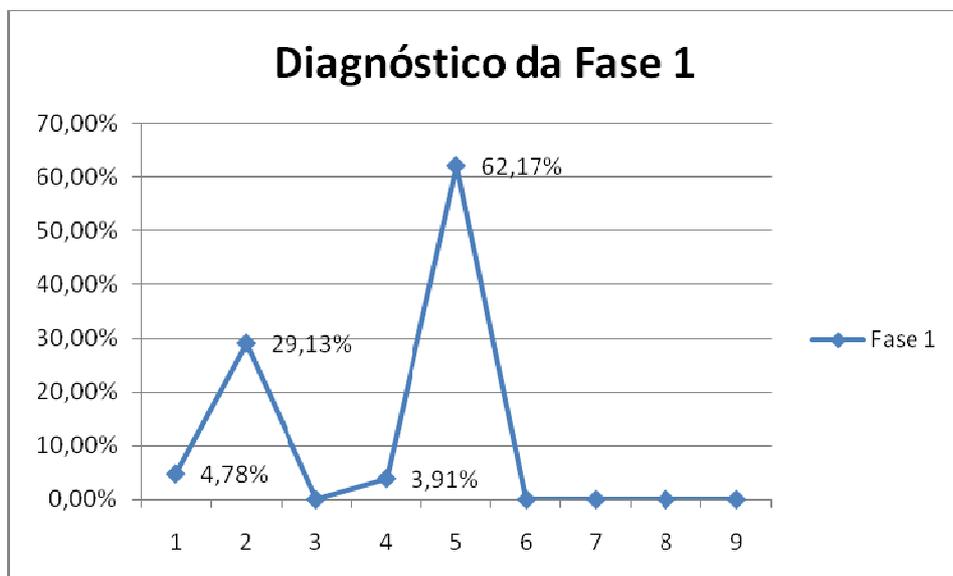


Gráfico 9 - Diagnóstico da fase 1 do THD de corrente e tensão.

Após a análise do Gráfico 9 observa-se:

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 62,17%
 - Faixa do THD (%): $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
 - Tipo de Diagnóstico: [5] - THD de corrente e de tensão significativo.
 - Característica do diagnóstico: para corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão quaisquer disfuncionamento são possíveis.
-
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 29,13%
 - Faixa do THD: $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $\text{THD}_U < 5$
 - Tipo de Diagnóstico: [2] - THD de corrente significativo e THD de tensão normal.
 - Característica do diagnóstico: para a corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para a tensão: algum disfuncionamento não é temido.
-
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 4,78%
 - Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $\text{THD}_U < 5$
 - Tipo de Diagnóstico: [1] - THD de corrente e tensão normais.
 - Característica do diagnóstico: algum disfuncionamento não é temido.
-
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 3,91%
 - Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
 - Tipo de Diagnóstico: [4] - THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
 - Característica do diagnóstico: para corrente algum disfuncionamento não é temido. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.

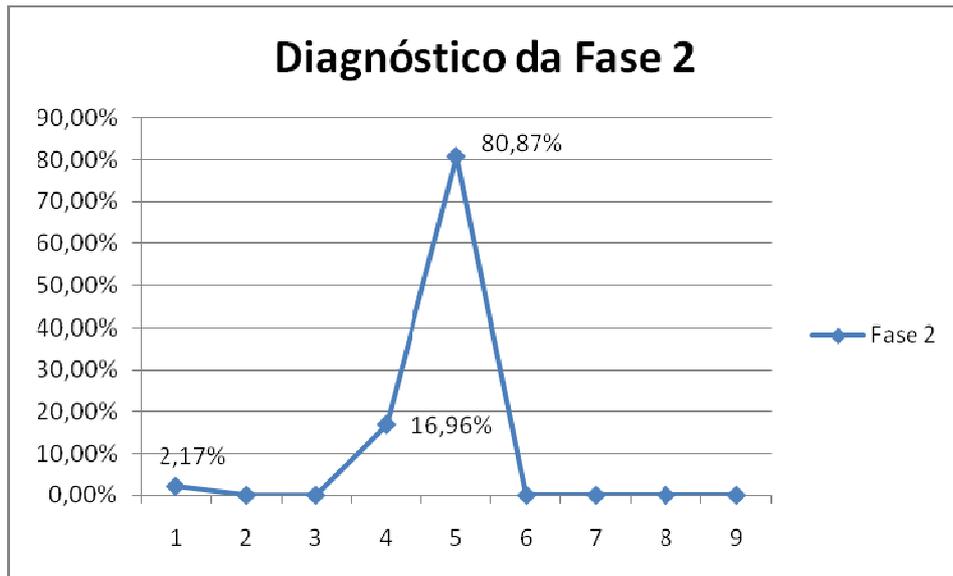


Gráfico 10 - Diagnóstico da fase 2 do THD de corrente e tensão.

Após a análise do Gráfico 10 observa-se:

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 80,87%
- Faixa do THD (%): $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
- Tipo de Diagnóstico: [5] - THD de corrente e de tensão significativo.
- Característica do diagnóstico: para corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão quaisquer disfunção são possíveis.
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 16,96%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
- Tipo de Diagnóstico: [4] - THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
- Característica do diagnóstico: para corrente algum disfunção não é temido. Para tensão: quaisquer disfunção são possíveis.
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 2,17%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $\text{THD}_U < 5$
- Tipo de Diagnóstico: [1] - THD de corrente e tensão normais.
- Característica do diagnóstico: algum disfunção não é temido.

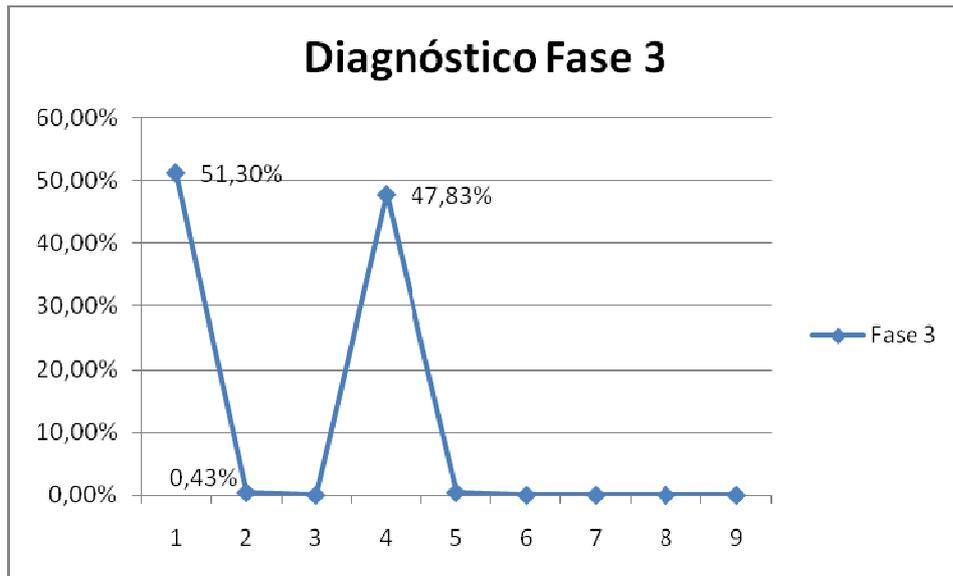


Gráfico 11 - Diagnóstico da fase 3 do THD de corrente e tensão.

Após a análise do Gráfico 11 observa-se:

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 51,30%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $\text{THD}_U < 5$
- Tipo de Diagnóstico: [1] - THD de corrente e tensão normais.
Característica do diagnóstico: algum disfuncionamento não é temido.
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 47,83%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
- Tipo de Diagnóstico: [4] - THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
- Característica do diagnóstico: para corrente algum disfuncionamento não é temido. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.
- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 0,43%
- Faixa do THD: $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $\text{THD}_U < 5$
- Tipo de Diagnóstico: [2] - THD de corrente significativo e THD de tensão normal.
- Característica do diagnóstico: para a corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para a tensão: algum disfuncionamento não é temido.

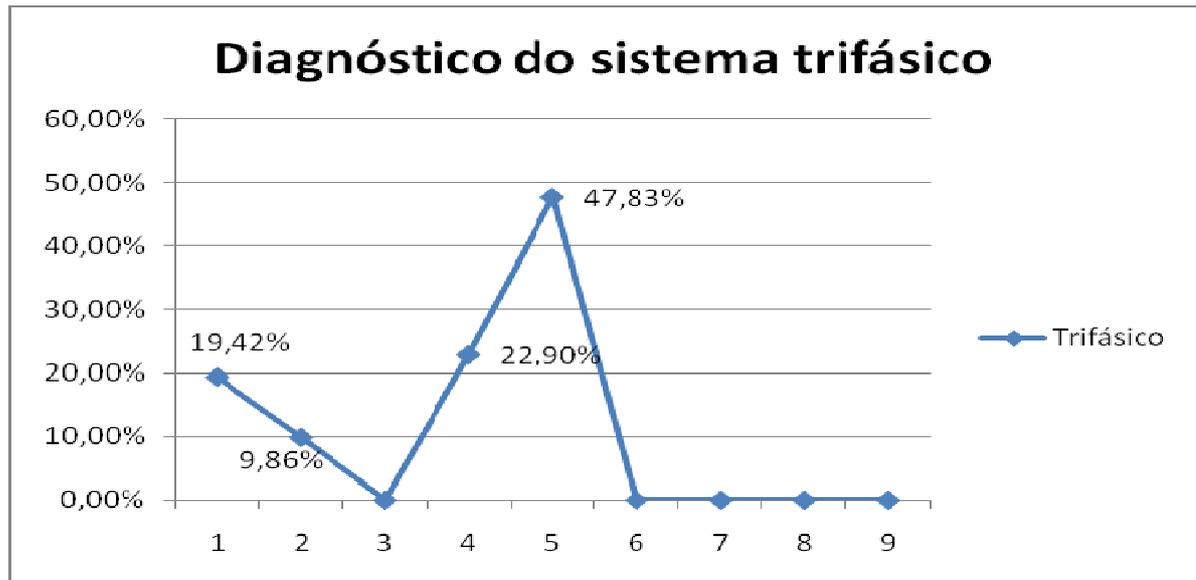


Gráfico 12 - Diagnóstico do sistema trifásico.

Após a análise do Gráfico 12 observa-se:

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 47,83%
- Faixa do THD (%): $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
- Tipo de Diagnóstico: [5] - THD de corrente e de tensão significativo.
- Característica do diagnóstico: para corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão quaisquer disfuncionamento são possíveis.

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 22,90%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $5 \leq \text{THD}_U < 8$
- Tipo de Diagnóstico: [4] - THD de corrente normal e THD de tensão significativo.
- Característica do diagnóstico: para corrente algum disfuncionamento não é temido. Para tensão: quaisquer disfuncionamento são possíveis.

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 19,42%
- Faixa do THD(%): $\text{THD}_I < 10$ e $\text{THD}_U < 5$
- Tipo de Diagnóstico: [1] - THD de corrente e tensão normais.
- Característica do diagnóstico: algum disfuncionamento não é temido.

- Porcentagem de participação do tipo de diagnóstico: 9,86%
- Faixa do THD: $10 \leq \text{THD}_I < 50$ e $\text{THD}_U < 5$
- Tipo de Diagnóstico: [2] - THD de corrente significativo e THD de tensão normal.
- Característica do diagnóstico: para a corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para a tensão: algum disfuncionamento não é temido.

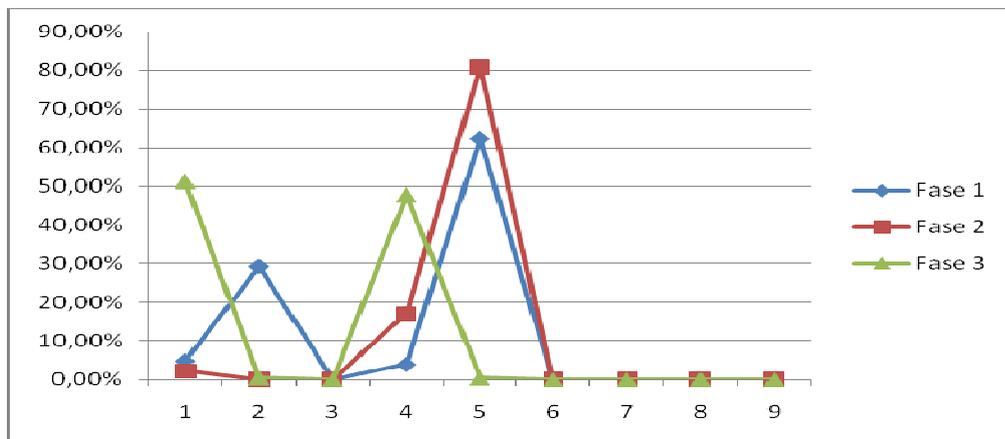


Gráfico 13 - Visão do diagnóstico do THD de corrente e tensão das três fases.

O Gráfico 13 apresenta uma visão simultânea do diagnóstico do THD de tensão e corrente, neste gráfico pode-se verificar que a fase 2 apresenta o diagnóstico com o nível de THD de tensão e corrente mais elevado seguido da fase 1 e a fase 3 apresenta a maior porcentagem do nível do THD de tensão e da corrente dentro do limite da recomendação IEEE 512-1992. A consequência do nível significativo do THD das fases 1 e 2 reflete em todo sistema trifásico conforme o Gráfico 14.

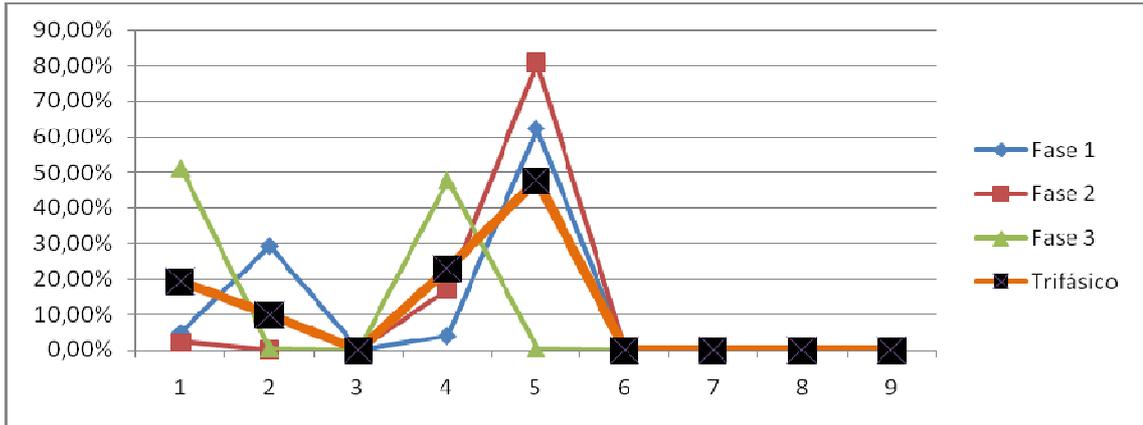


Gráfico 14 - Diagnóstico do sistema trifásico em relação as fases.

A partir da análise de todos os gráficos pode-se definir um diagnóstico final do arquivo (demo_t.ims) de leitura da rede elétrica do sistema trifásico a partir da maior porcentagem do tipo do diagnóstico calculada. Analisando os tipos de diagnóstico avaliados do sistema trifásico pode-se afirmar que:

Na análise do arquivo (demo_t.ims) 47,83% do conjunto dos pares de THD de corrente e tensão apresenta: THD de corrente e tensão significativo conseqüentemente para corrente existe risco de aquecimento, implica o sobre dimensionamento dos cabos e das fontes. Para tensão quaisquer disfuncionamento são possíveis conforme o Gráfico 15.

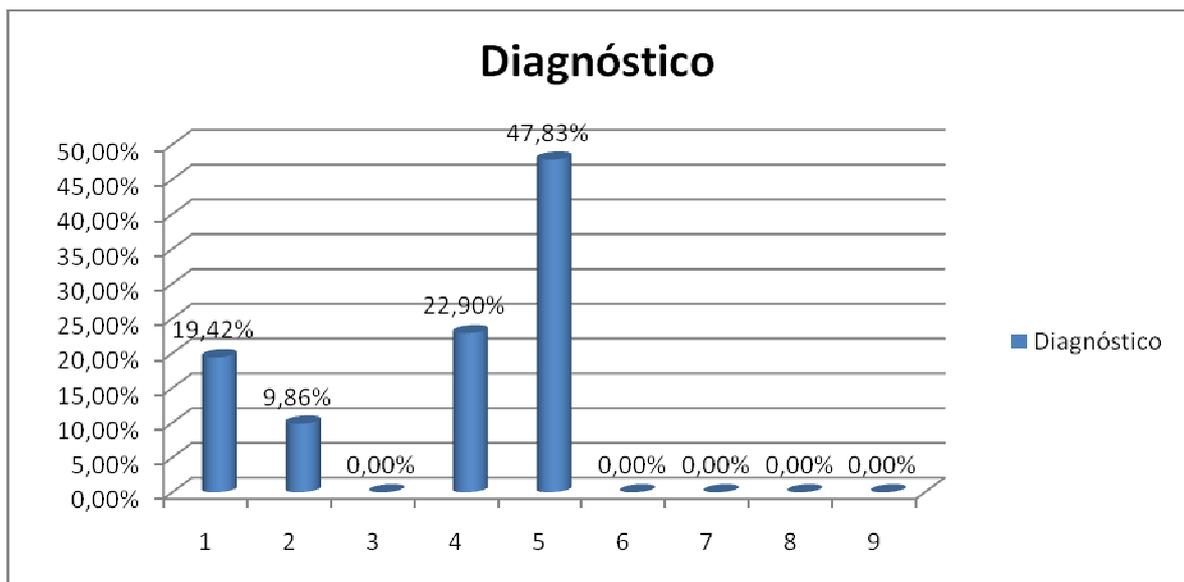


Gráfico 15 - Diagnóstico final do sistema trifásico.

A metodologia proposta apresentou eficiência na análise e diagnóstico dos dados contidos no arquivo de leitura referente à medição de uma determinada rede elétrica referente a um sistema trifásico.

Com a comparação entre os resultados apresentados pela metodologia e os gráficos exibidos pela ferramenta da IMS (Smart Analisador T), podemos concluir que são equivalentes, contribuindo, dessa forma, para a convalidação do modelo proposto.

CAPÍTULO VI

6.1 - CONCLUSÃO

O estudo apresentado contempla um conjunto de etapas que permitem o monitoramento e o diagnóstico da qualidade de energia através da análise do indicador THD (total de distorções harmônicas) em sistema trifásico de baixa tensão através de um sistema de inferência Fuzzy.

Com a utilização de um sistema de inferência fuzzy que agrega a visão do especialista baseado na recomendação do IEEE 519-1992 e das sugestões feita por SCHNEIDER (2005), contribuíram para uma avaliação do diagnóstico de forma eficiente contemplando as recomendações regulamentadoras vigentes.

O estudo realizado sobre a qualidade de energia elétrica agregou um conhecimento importante sobre os fundamentos da qualidade de energia, seus indicadores, bem como na delimitação dos tipos de distúrbios inerente a qualidade de energia focalizando nas distorções harmônicas, na análise do indicador total de distorção harmônica (THD), bem como nas normas e recomendações regulamentadoras.

Outro ponto relevante deste trabalho foi o estudo realizado sobre a lógica Fuzzy, onde foram apresentados os seus fundamentos, conjuntos e operações, principalmente o sistema de inferência Fuzzy constituídos dos elementos de fuzzyficação, base de regras, método de inferência e defuzzyficação que contribui para agregar o conhecimento do especialista na metodologia proposta.

Finalmente a apresentação da metodologia em estudo composta de 7 etapas, cada uma com um objetivo bem específico formulada em um conjunto de passos para proporcionar a definição do diagnóstico da qualidade de energia referente as distorções harmônica analisando o indicador THD (total de distorção harmônica).

Com a comparação do modelo proposto com uma ferramenta comercial desenvolvida pela IMS (Indústria de Micro Sistemas Eletrônicos Ltda.), além de convalidar o modelo, observa-se os seguintes benefícios:

1. Formulação de um diagnóstico sem a presença do especialista, isto se deve ao sistema de inferência Fuzzy agregado à metodologia;
2. Armazenar todos os dados lidos (medidos) e analisado em um banco de dados, com o objetivo de acompanhar a evolução das distorções harmônicas através do histórico;
3. Demonstrar o resultado, através de gráficos estatísticos, de forma direta e clara, os níveis dos respectivos THD de corrente e tensão da rede elétrica;
4. Padronização dos tipos de diagnósticos. Com isso evita várias formulações de diagnóstico com grau de detalhes diferentes elaborados por diversos especialistas;
5. Outra vantagem é que graças à base de regras do sistema Fuzzy foi possível realizar uma análise dos dois indicadores de THD de tensão e corrente simultaneamente, já que os que especializam o fazem de forma separada por se tratar de grandezas distintas.

Dessa forma o referido trabalho pretende contribuir no processo de acompanhamento e diagnóstico da qualidade de energia elétrica.

6.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o estudo e a evolução deste trabalho foi possível prever como trabalhos futuros as seguintes idéias:

1. Criação de um dispositivo compostos de sensores que faça a leitura (medição) com os dados relevantes ao processo de forma automática (on-line), isto iria permitir um acompanhamento *on-line* do indicador THD (total de distorção harmônica) na rede elétrica;
2. Como a metodologia propõe o uso de banco de dados com o objetivo de armazenar os dados lidos (medidos) e analisados mantendo um histórico, a partir deste pode-se fazer um módulo de previsão sobre a qualidade da energia para um tempo futuro;
3. Agregar ao sistema de inferência Fuzzy novas normas, recomendações e novos indicadores, com o objetivo de tornar a metodologia o mais especialista possível;

6.3 – REFERÊNCIAS

AFONSO, J. L. e MARTINS, L. S. **Qualidade de Energia Eléctrica na Indústria**. Ciclo de Seminários – As Oportunidades das Ameaças: A Qualidade da Energia Eléctrica, EUVEO, ISBN: 972-8063-15-6, pp. 1-35 (Capítulo de Livro). Guimarães, Portugal : s.n., 2003.

ANEEL. **CEDOC – Centro de Documentação**. Disponível em :<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/cedoc.cfm>. Acessado em: 08 de março de 2010.

ARRILAGA J and N.R. Watson, **Power Systems Harmonics**, Wiley, 2nd Edition, 2003.

BAGGINI A., **Handbook of Power Quality**. Wiley, 2008.

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

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

CRUZ, L. F. **Sistematizações da teoria fuzzy**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1996.

DAIREL, F. de C. L. **Eficiência energética x qualidade de energia** . Educ. Tecnol. jan/jun , Vols. 8, n.1, 2003.

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

DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T.E. **Operanting conflits for distributed generation on distribution systems**. IEEE. 2001.

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

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.

IEC 1000-2-2 **ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY (EMC) Section 2: Compatibility levels for lowfrequency conducted disturbances and signalling in public lowvoltage power supply systems**

IEC (IEC 61000-4-7, 61000-4-30) **International Electrotechnical Commission**

IEEE Standard 519-1992 (**Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in electrical Power Systems**). 1992.

IVANQUI, J. **Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica fuzzy**. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2005. 104p.

JANG, J.S. and C. T. SUN. **Neuro-fuzzy modeling and control**, Proceedings of the IEEE, March, 1995

JÚNIOR, O. e AGUIAR, H., “**Lógica difusa: aspectos práticos e aplicações**”, Rio de Janeiro: Interciência, 1999.

KLIR, George; YUAN, Bo. **Fuzzy sets and logic fuzzy:theory and applications**. Los Angeles : Prentice Hall, 1995.

KRUSE, Rudolf; KLAWONN, Frank; NAUCK, Detlef. **Fuzzy sets, fuzzy controllers and neural networks**. Braunschweig. Artigo (Departamento de ciências da computação) Universidade Técnica de Braunschweig, 1992.

MANDANI, E. H. and S. ASSILIAN. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller**. International Journal of Man-Machine Studies. Vol 7 n° 1, pp. 1-13, 1975.

MARÇAL, Rui Francisco Martins, SUSIN, Altamiro A. **O emprego de inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial**. In: III Seminário Catarinense – ABRAMAN. Joinville/SC. 2005

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

MENDEL, Jerry M. **Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial**. Proceedings of the IEEE, Los Angeles, v. 83, n. 3, p. 345-377, 1995.

MORENO, Hilton. **Hamônicas nas Instalações Elétricas, . Causas, efeitos e soluções**. São Paulo : PROCOBRE, 1ª Edição, 2001.

NUNES, Renato VINHAL. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP**. Dissertação de Mestrado, PPGEE, UFMG. 2007.

OLIVEIRA, C. G. et al. **Estudo de caso de eficiência energética e qualidade de energia elétrica**. 6p. Anais do VIII Induscon Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas/MG, 2008.

PROCOBRE, Schneider. **Qualidade de Energia - Harmonicas. Workshop Instalações**. Elétricas de Baixa Tensão. 2003.

SANKARAN, C. **Power Quality**, CRP Press, 2002.

SCHNEIDER. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Qualidade de Energia – Harmônicas**. 2005

SHAW, Ian S.; Simoes, Marcelo G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Editora Edgar Blucher Ltda, 1999.

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

WANG, Li-Xin. **A course in Fuzzy Systems and Control**. Prentice – Hall Inc., International Edition, 1997.

USER'S GUID, **Fuzzy Logic Toolbox for use with MATLAB**, The Mathworks Inc. 3a ed, 1998.

VIEIRA, V. P. P. B. **Avaliação Quantitativa de Riscos Econômicos e Ambientais. Sistemas Inteligentes**. Aplicações a Recursos Hídricos e Sistemas Ambientais. Porto Alegre. 1999.

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

ZIMMERMANN H., **Fuzzy Set Theory–and Its Applications**. Kluwer Academic Publishers, 2001.