



PAULO DA SILVA SOARES

SISTEMA DE AVALIAÇÃO PREDITIVA DE FALHAS EM MÁQUINAS
ELÉTRICAS USANDO LÓGICA *Fuzzy* COM ANÁLISE DOS PARÂMETROS
DE VIBRAÇÃO, CORRENTE E TEMPERATURA

CAMPINAS
2014



Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

PAULO DA SILVA SOARES

SISTEMA DE AVALIAÇÃO PREDITIVA DE FALHAS EM MÁQUINAS
ELÉTRICAS USANDO LÓGICA *Fuzzy* COM ANÁLISE DOS PARÂMETROS
DE VIBRAÇÃO, CORRENTE E TEMPERATURA

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

Esse exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pelo aluno Paulo da Silva Soares, e orientada pelo Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias

CAMPINAS
2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Soares, Paulo da Silva, 1966-
So11s Sistema de avaliação preditiva de falhas em máquinas elétricas usando lógica fuzzy com análise dos parâmetros de vibração, corrente e temperatura. / Paulo da Silva Soares. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: José Antonio Siqueira Dias.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Monitoramento online. 2. Controle preditivo. 3. Manutenção preditiva. 4. Manutenção (Engenharia). 5. Lógica fuzzy. I. Dias, José Antonio Siqueira, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Predictive evaluation of failures in electric machines using fuzzy logic system to analyze the parameters of vibration, current and temperature.

Palavras-chave em inglês:

On line monitoring

Predictive control

Predictive maintenance

Maintenance (Engineering)

Fuzzy logic

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

José Antonio Siqueira Dias [Orientador]

Felipe Walter Dafico Pfrimer

Vicente Idalberto Becerra Sablón

Lee Luan Ling

Marco Anotônio Robert Alves

Data de defesa: 21-03-2014

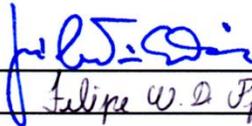
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

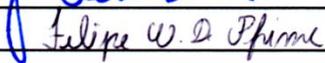
COMISSÃO JULGADORA - TESE DE DOUTORADO

Candidato: Paulo da Silva Soares

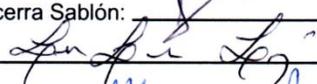
Data da Defesa: 21 de março de 2014

Título da Tese: "Sistema de Avaliação Preditiva de Falhas em Máquinas Elétricas Usando Lógica Fuzzy com Análise dos Parâmetros de Vibração, Corrente e Temperatura"

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias (Presidente): 

Prof. Dr. Felipe Walter Dafico Pfrimer: 

Prof. Dr. Vicente Idalberto Becerra Sablón: 

Prof. Dr. Lee Luan Ling: 

Prof. Dr. Marco Antônio Robert Alves: 

Resumo

Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitoração e acompanhamento de equipamentos industriais com vistas à manutenção preditiva. O sistema desenvolvido monitora a vibração do elemento em estudo, e faz o registro da mesma comparando-se a um padrão de vibração considerado nominal, ou seja, uma condição de operação satisfatória da máquina. Quando uma variação na vibração do dispositivo monitorado é identificada, há de se observar seu comportamento, não só de amplitude mas também no espectro de frequência, pois geralmente a incidência de falhas ou anomalias apresentam vibrações em frequências diferentes da nominal de trabalho de um dispositivo. A Transformada de Fourier do sinal e os registros de leituras frequentes nos permitem um acompanhamento contínuo do equipamento monitorado. Adicionalmente ao acompanhamento da vibração mecânica, faz-se o monitoramento da corrente elétrica do motor de acionamento do elemento para observância de eventual sobrecarga, desequilíbrio das fases e análise do espectro de frequência do sinal elétrico de corrente, que nos permite avaliar as alterações na alimentação do mesmo, indicando alguma anomalia de natureza elétrica ao motor em estudo. Por fim ainda monitora-se a temperatura dos elementos em estudo, pois a vida útil destes depende das temperaturas a que são submetidos em regime de operação que têm impacto direto em isolamentos de bobinas e lubrificantes das partes mecânicas. Este sistema permite uma avaliação de uma máquina, sem intervenção humana para as medições de vibração e elétricas, aliado ao histórico levantado, torna-se uma ferramenta poderosa para a implementação de um programa de manutenção preditiva.

Palavras-chave: Monitoração de máquinas, Manutenção preditiva, Lógica *Fuzzy*, Transformada de Fourier, Microcontroladores, Circuitos eletrônicos, *Software* de avaliação de dados.

Abstract

This work aims to develop a low-cost system for monitoring and tracking of industrial equipment with a view to predictive maintenance. It presents a system that monitors vibration of the recording studied element comparing the same to a vibration pattern considered nominal. When it detects a change in the vibration of the device is to observe their behavior, not only amplitude but in the frequency spectrum, usually because the incidence of faults or anomalies exhibit vibrations at different frequencies of nominal working of a device. The Fourier transform of the signal and records of frequent readings allow to close monitoring of the element under study. In addition to monitoring the mechanical vibration, it is monitoring the electrical current of the motor drive element for compliance with any overload, phase imbalance and even the analysis of spectro signal frequency electric current, which allows us to evaluate changes feeding the same, indicating an abnormality of the electric motor in nature study. Finally even monitor the temperature of the elements under study, because the life of these depends on the temperatures to which they are subjected in operation regime that have direct impact on coil insulation and lubricants of the mechanical parts. This system permits an automatic evaluation of the condition of a machine, without human intervention for measurement of vibration and electrical therein, together with the historical raised, becomes a powerful tool for industry implementation of a predictive maintenance program.

Keywords: Machinery Monitoring, Predictive Maintenance, *Fuzzy* Logic, Fourier Transform, Electronic Circuits, Microcontrollers, data evaluation Software.

Sumário

Resumo	vii
Abstract.....	ix
Sumário.....	xi
Agradecimentos	xv
Lista de figuras	xix
Lista de abreviaturas e siglas	xxiii
Capítulo 1	1
Introdução.....	1
1.1 Motivação	1
1.2 Tecnologia atualmente disponível	2
1.3 Objetivo deste trabalho	3
1.4 Estrutura do trabalho.....	4
Capítulo 2	5
Defeitos em máquinas industriais.....	5
2.1 Defeitos mecânicos	6
2.1.1. Desbalanceamento de rotores.....	6
2.1.2. Desalinhamento.....	7
2.1.3. Roçamento.....	8
2.1.4. Folgas mecânicas.....	8
2.2 Defeitos elétricos em motores trifásicos	9
2.2.1. Falta de fase.....	9
2.2.2. Curto-circuito entre fases ou espiras	9
2.2.3. Bobina em curto-circuito.....	10
2.2.4. Travamento do rotor.....	10
Capítulo 3	11
Parâmetros de análise preditiva	11
3.1 Avaliação de motores.....	11

3.1.1.	Temperatura em motores	11
3.1.2.	Medição do valor eficaz e tensão em circuito trifásico	17
3.1.3.	Medição no domínio da frequência e tecnologia MCSA (<i>Motor Current Signature to Analysis</i>).....	20
3.2	Avaliação de elementos mecânicos.....	22
3.2.1.	Temperatura em redutores mecânicos	22
3.2.2.	Análise preditiva de falhas em sistemas mecânicos	25
3.2.2.1.	Análise espectral, médias e frequências mecânicas	25
Capítulo 4	.....	27
Aplicação de um sistema de inferência <i>Fuzzy</i>	.....	27
4.1	Sistema <i>Fuzzy</i>	27
4.2	Regras “se-então” para um sistema difuso	29
4.3	Metodologia para avaliação do sinal medido	32
4.4	<i>Fuzificação e defuzificação</i>	35
4.4.1.	Grandezas mensuradas para motor elétrico	40
4.4.2.	Grandezas mensuradas para redutor e mancal.....	42
Capítulo 5	.....	45
Topologia do sistema	.....	45
5.1	Sensor de vibração.....	46
5.2	Montagem do sensor 3D utilizado.....	47
5.3	Amplitude do sinal do transdutor	51
5.4	Sensor de corrente e tensão	52
5.5	Sensor de temperatura	54
5.6	Sistema microcontrolado de leitura de dados.....	55
5.6.1.	Circuito eletrônico de coleta de dados.....	55
5.7	Estação de análise de dados.....	61
Capítulo 6	.....	65
Implementação do programa de computador	.....	65
6.1	Protocolo implementado.....	66
6.2	Tratamento de falha na comunicação	67
6.3	Recebimento dos dados	67
6.4	Implementação de rede para vários módulos de leitura	68
6.5	Deteção de desequilíbrio de corrente e tensão.....	69
6.6	Medida da diferença do padrão de vibração.....	71
6.6.1.	Metodologia convencional de análise de vibração	72

6.6.2.	Aplicação de um sistema inteligente de análise	74
6.6.3.	Utilização de vários padrões de vibração.....	75
Capítulo 7	.....	79
Coleta de dados em campo	.....	79
7.1	Procedimentos.....	79
7.2	Instalação da rede de comunicação.....	80
7.3	Medição de corrente dos motores	81
7.4	Registros das medições de corrente temperatura e vibração	82
7.5	Instalação dos sensores	82
7.6	Resultados obtidos	87
7.6.1.	<i>Hardware</i> implementado.....	87
7.6.2.	<i>Software</i> implementado.....	87
7.6.3.	Avaliação do sinal medido	96
7.6.4.	Benefícios auferidos na implementação do sistema.....	97
Capítulo 8	.....	99
Conclusão e trabalhos futuros.....		99
8.1	Sugestão para trabalhos futuros	101
Anexo 1 – Catálogo Inarmeg.....		103
Anexo 2 – Manual do redutor MACOPEMA.....		105
Apêndice 1 – Análise de sinais no domínio da frequência.....		107
1.1	Análise de sinais no domínio da frequência (FFT)	107
1.1.1.	Transformada discreta de Fourier (DFT)	107
1.1.2.	Análise de sinais com transformada discreta de Fourier (DFT).....	108
1.1.3.	Implementação da transformada rápida de Fourier (FFT)	116
1.1.4.	Frequência fundamental de amostragem.....	118
1.1.5.	Verificação da rotina computacional.....	119
Apêndice 2 – Combinação de variáveis das regras <i>Fuzzy</i>		123
Referências		129

Agradecimentos

À Deus, autor e consumidor da minha fé.

À minha amada esposa Maria Antônia pelo apoio constante.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Antônio Siqueira Dias, pela orientação, confiança, ensinamentos pessoais e profissionais e apoio às minhas decisões.

Aos funcionários da CPG e FEEC em especial nossa secretária Estér, pela dedicação, carinho e apoio.

Ao meus amigos Flávio, Alex, Rodrigo, Pedro pelo apoio e companheirismo nesta jornada.

À Bag Cleaner de Iracemápolis - SP pelo apoio nas implementações práticas de nosso trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo financiamento.

“Louvado seja o nome de Deus para todo o sempre; a sabedoria e o poder a ele pertencem.”

(Daniel 2:20)

Lista de figuras

Figura 1 - Classes de isolamento e vida útil [15].	12
Figura 2- Perfil típico de dissipação térmica do interior do motor até a superfície [5]......	14
Figura 3-Tela de leitura de corrente que ilustra o formato do sinal lido e apresenta os valores RMS, médio, máximo, mínimo e amplitude do sinal medido no tempo.....	19
Figura 4 - Cadastro de 3 fases para comparação de desequilíbrio de fases.....	20
Figura 5 – Padrão de falhas no estator MCSA.	22
Figura 6 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista estacionária [26].	26
Figura 7 – Tela de leitura do sinal medido, com ilustração da forma do sinal no domínio do tempo e frequência (FFT) e apresentação dos valores lidos.....	26
Figura 8 - Sistema de inferência básico.....	28
Figura 9 – Tela de leitura de medidas e gravação de padrões da variável monitorada.	28
Figura 10 - Estrutura de um sistema de inferência difuso.	29
Figura 11 – Termos linguísticos das funções de pertinências.	30
Figura 12 – Conjunto de regras <i>Fuzzy</i> , valores nominais, $Z_n = 0,11$ (11 %).	32
Figura 13 – Medida de vibração no domínio do tempo, curva azul motor balanceado, curva vermelha motor desbalanceado.	34
Figura 14 – FFT das medidas do motor, curva azul motor balanceado, curva vermelha motor desbalanceado.....	34
Figura 15 - Histórico de medidas do sinal de corrente e níveis de alarmes.	35
Figura 16 – Sensor piezoelétrico de vibração.....	47
Figura 17 – Dimensões mecânicas do acelerômetro.	48
Figura 18 – Fotografia do sensor de vibração.	48
Figura 19 – Placa eletrônica com sensor de vibração.....	49
Figura 20 – Orientação dos eixos X, Y e Z na instalação de um mancal de motor.....	49
Figura 21 – Esquema de ligação do acelerômetro.....	50
Figura 22 – Esquema de ligação da placa do acelerômetro.....	51
Figura 23 – Erro de linearidade da garra amperimétrica.	52

Figura 24 - Garra para medição de corrente.	53
Figura 25 – Esquema de ligação do sensor de corrente (IA,IB,IC) e tensão (VA,VB,VC).....	53
Figura 26 – Circuitos típicos do sensor de temperatura.....	54
Figura 27 – Esquema eletrônico de entradas do ATMEGA32.	55
Figura 28 – Foto da placa montada.....	56
Figura 29 – Regulador de tensão.....	57
Figura 30 – Indicadores de funcionamento.....	57
Figura 31 – Multiplexador de entradas de tensão.	58
Figura 32 – Conector de comunicação.....	58
Figura 33 – Conector para programação “ <i>in-circuit</i> ” do <i>firmware</i>	59
Figura 34 – Conector dos sinais analógicos de vibração, temperatura, corrente e tensão.	60
Figura 35 – Circuito completo do sistema.	61
Figura 36 - Tela de coleta de dados.	62
Figura 37 - Tela de leitura de sinal de corrente e respectiva FFT, que ilustra a forma do sinal e medidas dos valores RMS, média, máximo, mínimo e amplitude.....	63
Figura 38 – Tela que ilustra as formas do sinal com valor RMS, média, máximo, mínimo, amplitude e formato da onda do sinal medido.	70
Figura 39 - Tabela eletrônica que relaciona o modelo de rolamento e suas frequências características de vibração.	72
Figura 40 - Tela de entrada de características mecânicas para um redutor.....	73
Figura 41 - Tela de <i>software</i> comercial para análise de espectro de sinal.	74
Figura 42 – Gravação de vários padrões de sinais para um mesmo sensor.	76
Figura 43 - Formato da onda para elevador sem carga.	77
Figura 44 - Formato da onda para elevador carregando HONDA CIVIC.	77
Figura 45 - Formato da onda para elevador carregando um HONDA FIT.....	78
Figura 46 – Esquema de ligação da rede.....	80
Figura 47 – Tela de acionamento de alarmes de vibração.	82
Figura 48 – Diagrama de conexões do módulo.....	83
Figura 49 – Fotografia do módulo de coleta de dados.	83
Figura 50 - Detalhe da instalação de sensor de vibração no motor do ventilador.	84
Figura 51 - Instalação do sensor de vibração no motor e mancal do ventilador.....	84
Figura 52 - Instalação dos sensores na lavadeira 42.	85
Figura 53 - Detalhe do sensor de vibração e temperatura instalados no motor da lavadeira 42....	85
Figura 54 - Detalhe do sensor de vibração e temperatura instalados no redutor da lavadeira.	86

Figura 55 - Módulo de leitura de dados no painel da máquina.	86
Figura 56 – Primeira versão do <i>software</i> tela de seleção das entradas dos módulos.	88
Figura 57 – Primeira versão do <i>software</i> , tela de leitura do sensor e FFT do sinal.....	88
Figura 58 – Primeira versão do <i>software</i> , tela para visualizar histórico em tabela.	89
Figura 59 – Na segunda versão, programa mais intuitivo e fácil de usar.	90
Figura 60 – Na segunda versão possibilita-se cadastro e endereçamento para vários módulos....	90
Figura 61 – Na segunda versão além do relatório tabelado mostra o gráfico da evolução do sinal.	91
Figura 62 – Na segunda versão pode-se escolher um determinado padrão e compará-lo ao sinal lido.....	91
Figura 63 – Programa de acompanhamento remoto de alarmes.....	93
Figura 64 – Programa remoto mostra alarmes e habilita botão para visualização gráfica das leituras.	93
Figura 65 – Tela da terceira versão com visualização de mais dados do sinal lido.	94
Figura 66 – As telas que não sejam apenas de visualização requerem senhas.	94
Figura 67 – Tela de calibração, onde vê-se as características do sinal medido.....	95
Figura 68 – A nova tela gráfica permite selecionar o histórico de medidas ou o histórico da FFT.	95
Figura 69 - Erro de leitura harmônica corrigido e falta de padrão para a situação de alarme.....	96
Figura 70 – Repetição de leituras acima dos limites de alarmes.	97
Figura 71 – Ilustração dos alarmes de temperatura do mancal do redutor da estufa.....	97
Figura 72 – Primeiro estágio de dizimação.	113
Figura 73 – Segundo estágio de dizimação.	114
Figura 74 – Terceiro estágio de dizimação.....	115
Figura 75 – Conjunto de operações para dizimação de N=8 amostras.....	116
Figura 76 – Espelhamento do espectro.....	118
Figura 77 – Espelhamento do espectro do sinal medido.	119
Figura 78 – Espectro com o espelhamento característico eliminado.....	119
Figura 79 – Gráficos de onda quadrada padrão de 30 Hz e respectiva FFT calculada (cursor no 7o harmônico = 210 Hz).....	120

Lista de abreviaturas e siglas

CEP	Controle estatístico de processo
DFT	Transformada discreta de Fourier (<i>Discrete Fourier Transform</i>)
FFT	Transformada Rápida de Fourier (<i>Fast Fourier Transform</i>)
GND	Terra (<i>Ground</i>)
IA	Corrente alternada fase A
IB	Corrente alternada fase B
IC	Corrente alternada fase C
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional (<i>International Electrotechnical Commission</i>)
MISO	Mestre entrada, Escravo saída (<i>Master in, Slave out</i>)
MOSI	Mestre saída, escravo entrada (<i>Master out, Slave in</i>)
MSCA	Análise de assinatura de corrente em motor (<i>Motor Current Signature to Analysis</i>)
PC	Computador pessoal (<i>Personal computer</i>)
RMS	Valor quadrático médio (<i>root mean square</i>)
RST	Resete
SCK	Relógio de dado serial (<i>Serial data clock</i>)
THD	Distorção harmônica total (<i>Total Harmonic Distortion</i>)
VA	Tensão alternada fase A
VB	Tensão alternada fase B
VC	Tensão alternada fase C
UART	Receptor/Transmissor universal assíncrono (<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>)
UNIFEI	Universidade Federal de Engenharia de Itajubá

Capítulo 1

Introdução

Com o aumento da necessidade de serem mais competitivas, as indústrias se veem forçadas a incorporar à seus processos fabris tecnologias para otimização de custos e aumento de produtividade e eficiência.

Com o advento de novas tecnologias de hardware, em especial microcontroladores, atualmente há uma grande disponibilidade de componentes eletrônicos para uso na indústria de projetos eletrônicos, seja para grandes volumes de produção ou as de projetos específicos com produções limitadas a poucas unidades ou que implementam projetos específicos e dedicados.

Neste trabalho buscou-se a implementação e utilização de microcontroladores para a criação e otimização de um sistema que possa fazer a coleta autônoma de sinais e análise do comportamento de máquinas e a criação de um *software* que permita ao usuário estimar a ocorrência de falha no dispositivo monitorado a tempo de seu reparo ou troca, de forma a evitar ser surpreendido por uma quebra inesperada.

O gerenciamento de manutenção e disponibilidade de máquinas passam a ter grande importância neste contexto.

1.1 Motivação

O que motivou este trabalho é a possibilidade do desenvolvimento de uma ferramenta e tecnologia que permita a implementação de um sistema para análise e avaliação das condições e estado dos elementos mecânicos e elétricos monitorados.

A concepção de um equipamento completo composto por sensores, circuito

microcontrolado, *firmware* e *software* para este projeto, se traduz num desafio e consolida o conhecimento de engenharia adquirido e materializado num produto útil e produtivo à sociedade, em particular à indústria onde tem sua maior aplicabilidade e se beneficia de seu principal resultado; a possibilidade de obter uma ferramenta que possa estabelecer uma previsibilidade de quebra e condições de uso de um determinado equipamento ou sistema produtivo

1.2 Tecnologia atualmente disponível

As tecnologias mais difundidas atualmente para análise e manutenção preditiva consistem no uso de sensoriamento por captadores piezoelétricos (vibração), imagens térmicas (termografia) e medidores de tensão/corrente (qualidade de energia elétrica) que são operados por um leiturista munido de coletores de dados além do uso de sensores, câmeras especiais e medidores de rede, instrumentos de complexa utilização que requerem investimentos nem sempre possíveis de serem absorvidos por uma empresa, principalmente de pequeno porte.

Usualmente o processo de coleta de dados depende da operação do leiturista e posterior análise dos dados e apresentação à manutenção para apreciação, uma grande desvantagem desta metodologia é a demora em se obter os parâmetros de vibração e sua avaliação num curto espaço de tempo, sendo comum uma demora de 15 a 30 dias entre a leitura da vibração e o recebimento da respectiva análise e comparação com o histórico deste elemento medido.

Em casos especiais em que o risco de acidente do leiturista é grande e/ou o investimento se mostra economicamente viável, há a instalação fixa de um sensor de vibração no mancal a ser monitorado, deixando um cabo para conexão ao coletor de dados.

Como o investimento em equipamento "tradicional" (sensor, coletor, alimentação) é alto (da ordem de US\$ 30.000,00), esta instalação "adicional" é pouco utilizada.

As medições de temperatura por câmera termográfica (US\$ 5.000,00) e de parâmetros da rede elétrica (US\$ 8.000,00/analizador) embora demandem altos custos em equipamentos tendem a serem mais fáceis e seguros na sua coleta, entretanto não estão livres de dificuldades seja por causa da necessidade de remoção de proteções, acesso à painéis e/ou dificuldade em se acessar a máquina propriamente dita.

De acordo com Almeida [1], que pesquisou 500 fábricas com programas de manutenção

preditiva, haviam ainda centenas de outras empresas, onde a implementação de programas de manutenção preditiva não obtiveram o sucesso esperado. Muito embora a manutenção preditiva seja uma filosofia comprovada, muitos programas falham. A razão predominante é a falta de planejamento e suporte de gerência que são críticos para um programa bem sucedido.

As tecnologias atualmente disponíveis, requerem em grande parte a presença de leituristas e analistas para obter as informações de comportamento da máquina e sua interpretação, para só então poder indicar à empresa e equipe de manutenção quais procedimentos executar na preservação da máquina ou equipamento.

1.3 Objetivo deste trabalho

Nosso objetivo é o desenvolvimento de uma nova técnica para implementação de um equipamento autônomo para monitoramento e análise de vibração em dispositivos mecânicos (motores, redutores, etc), monitoramento de corrente e tensão de motor trifásico, monitoramento de temperatura e elaboração de uma ferramenta para auxílio à manutenção preditiva de elementos monitorados.

Um levantamento feito em 1988 em 500 fábricas, que implementaram com sucesso métodos de manutenção preditiva, indicou melhorias substanciais na contabilidade, disponibilidade, e custos operacionais [1].

Este projeto permite a sua instalação em um sistema de manufatura sem a necessidade de se fazer alterações elétricas e/ou mecânicas nos equipamentos instalados. Com exceção da fixação mecânica dos sensores de vibração e térmicos nenhuma outra intervenção ou alteração na máquina ou linha de produção deverá ocorrer. O sistema desenvolvido não altera as características elétricas e de projeto do equipamento em estudo, não interferindo em seu funcionamento ou projeto construtivo.

Sua utilização de vários sensores para a coleta de dados automático destinados à análise em manutenção preditiva através de uma rede industrial que interliga diretamente os módulos e sensores microcontrolados a um microcomputador, numa configuração mestre-escravo de fácil construção e grande flexibilidade.

Geralmente medição de vibração, temperatura e alimentação elétrica são aspectos tratados

por agentes/processos separados em manutenção preditiva, neste projeto estes aspectos são tratados de forma conjunta.

A aplicação de lógica *Fuzzy* às análises destes parâmetros na manutenção preditiva tornam singular a abordagem e uso desta tecnologia ainda cara e de baixa difusão na indústria.

Não faz parte do escopo deste trabalho fazer estudo profundo de análise de vibração ou melhor método para avaliar a temperatura de um motor, mas sim de desenvolver uma tecnologia e equipamento que possa se estabelecer parâmetros de trabalho e padrões a serem analisados, bem como acompanhar sua evolução, buscando uma previsibilidade de falha neste elementos em análise.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 apresenta-se os principais defeitos em motores e máquina rotativas, principal alvo de aplicação deste trabalho.

No capítulo 3 aborda-se os principais parâmetros de análise em motores, redutores e rolamentos aplicados à manutenção preditiva em motores elétricos: temperatura, desequilíbrio da alimentação, harmônicos da rede, e vibração, onde trata-se da transformada de Fourier dos sinais analisados e avaliados.

Na sequência, capítulo 4, é apresentada a lógica *Fuzzy* e variáveis linguísticas utilizadas neste trabalho.

Trata-se do *hardware* desenvolvido no capítulo 5, apresenta-se desde a escolha do tipo de sensor até o sistema de coleta de dados microcontrolados.

O *software* desenvolvido, que é o cérebro do sistema, é abordado no capítulo 6, onde mostra-se outra inovação que é a utilização de vários padrões, que com auxílio da lógica *Fuzzy*, elimina a necessidade de consulta de tabelas de frequências específicas de rolamentos e partes de máquinas, trazendo grande vantagem operacional no sentido de redução de tempo e custo de implantação deste sistema em comparação aos métodos tradicionais.

No capítulo 7 aborda-se os aspectos de instalação e operação do sistema em ambiente industrial.

O capítulo 8 trata da conclusão deste trabalho e sugestão para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Defeitos em máquinas industriais

Atualmente, de um modo geral, a indústria faz uso em grande escala de máquinas rotativas em várias etapas de sua produção. As máquinas quando em funcionamento estão sujeitas a diferentes formas de esforços devido à movimentação de seus componentes mecânicos.

Segundo Bezerra [2], cada vez mais, vão surgindo novas técnicas e procedimentos que buscam possibilitar uma detecção rápida e confiável das falhas de componentes, diminuindo o tempo de hora parada dos equipamentos. As máquinas que têm maior velocidade, em geral, utilizam mancais de rolamento que são responsáveis por muitas paradas não planejadas quando sua falha não é detectada a tempo.

Em sua revisão sobre detecção de falhas em rolamentos, Tandon [3] faz uma divisão das técnicas de acordo com a grandeza física usada para aquisição do sinal, quais sejam: medidas de vibração, de pressão acústica, de temperatura, e, análise de desgaste. Os métodos que envolvem medidas de vibração são os mais usados. Esses métodos são subdivididos em: técnicas no domínio do tempo, da frequência e no domínio tempo-frequência.

Ainda de acordo com Almeida [4], existem vários tipos de transdutores para medição de ruído e vibração em máquinas, mas a medição da aceleração da carcaça da máquina é o método mais comum usado para detecção de falhas em rolamentos.

Desta forma, é possível determinar pela medição da vibração de uma máquina o seu estado de funcionamento, bem como avaliar a presença de defeitos e desgaste.

Este tipo de análise é feito pela manutenção preditiva usando análise de vibrações além de técnicas como termografia para análise do aquecimento de componentes mecânicos e/ou elétricos

ou ainda acompanhamento da corrente/tensões nos motores que podem indicar uma situação de sobrecarga e/ou desequilíbrio elétrico que reduz a vida útil do motor.

Além dos defeitos na estrutura mecânica em máquinas rotativas, tem-se avarias em motores que as acionam e o efeito da temperatura que afeta os lubrificantes e isolamentos dos enrolamentos em motores, reduzindo drasticamente sua vida útil, contribuindo para ocorrência de falhas [5, 6].

2.1 Defeitos mecânicos

Neste campo da manutenção a avaliação do estado geral de funcionamento de uma máquina é feita medindo-se a vibração da mesma e associando ao sinal medido, possíveis falhas mecânicas podem ser detectadas por esta metodologia.

É importante destacar que a chave do diagnóstico de falhas, por meio da análise espectral é a associação do defeito à frequência de vibração, ou ainda à comparação da evolução do espectro de frequências da vibração ao longo do tempo.

A seguir, apresenta-se uma descrição resumida dos principais defeitos em máquinas rotativas.

2.1.1. Desbalanceamento de rotores

De acordo com Santos [7], o desbalanceamento de rotores é considerado uma das maiores causas de vibrações em máquinas. Este fenômeno caracteriza-se pela existência de desequilíbrios de massa, em relação aos eixos de rotação.

Almeida [8] explica que tais desequilíbrios são originados das inevitáveis assimetrias, das tolerâncias e dos desvios de forma. Contando ainda as imperfeições da matéria prima e da montagem. Cada erro de massa que ocorre provoca mudanças de posição do centro de gravidade da seção transversal, que contém o erro, o somatório desses desvios é o afastamento do centro de massa em relação ao eixo de rotação.

As causas mais comuns de desbalanceamento são:

- Configurações assimétricas;
- Inclusões ou vazios;

- Fundação ou usinagem excêntrica;
- Mancais ou acoplamentos não concêntricos;
- Distorções permanentes;
- Incrustações.

A quantificação do desbalanceamento é medida em unidades como g.mm e é igual ao produto da massa desbalanceadora pela distância do eixo de rotação ao centro de massa. A força centrífuga da massa desbalanceadora produz esforços dinâmicos no rotor, que por sua vez são transmitidos aos mancais. E esta força é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação.

A vibração devido ao desbalanceamento acontece em uma frequência igual a uma vez a velocidade de rotação do rotor e sua amplitude é proporcional à quantidade de desbalanceamento existente. Em geral as maiores amplitudes são medidas na direção radial, contudo, pode acontecer de rotores em balanço apresentarem grandes amplitudes na direção axial [8].

2.1.2. Desalinhamento

O desalinhamento constitui-se um problema quase tão comum quanto ao desbalanceamento. Segundo Santos [7] em referência ao The Vibration Institute USA (1989), o desalinhamento e o desbalanceamento, são considerados responsáveis por cerca de 90 % das falhas existentes nas máquinas rotativas.

Nas estruturas onde existem montagens mecânicas, é comum ter-se vários eixos, mancais e acoplamentos cujas características dinâmicas são diferentes. Quando o conjunto é acionado, aparecem forças de interação que acabam provocando vibrações.

São conhecidos três tipos de desalinhamento:

- Paralelo, em que as linhas de centro dos eixos são paralelas, porém deslocadas uma da outra;
- Angular, onde as linhas de centro dos eixos aparecem formando um determinado ângulo;
- Combinado, este desalinhamento é a associação dos dois anteriores.

Geralmente o desalinhamento possui uma frequência de vibração de uma vez a rotação, contudo quando o desalinhamento é severo, a frequência passa a ser de duas vezes a rotação.

2.1.3. Roçamento

Ainda em seu trabalho, Santos [7] explica que o roçamento é o contato entre partes rotativas e estacionárias de uma máquina. São conhecidos dois tipos principais de roçamento, a saber: roçamento parcial e roçamento total ou anular.

No roçamento parcial o eixo toca a parte estacionária de modo ocasional e mantém o contato por apenas uma pequena parte do período de rotação do mesmo.

No roçamento total o eixo permanece em contato com a parte estacionária durante todo o período de precessão. A parte da estrutura que permanece em contato com a estacionária sofre um empenamento pelo aquecimento devido ao atrito. As forças desenvolvidas durante o contato fazem o rotor orbitar em sentido contrário ao da rotação e ao mesmo tempo são responsáveis pelo aparecimento de vibrações em alta frequência, que pode causar fadiga e como consequência, a formação de trincas no eixo.

2.1.4. Folgas mecânicas

As folgas excessivas nos mancais, entre outras coisas, causam o aparecimento de vibrações em máquinas rotativas.

O efeito da folga que venha surgir sobre o funcionamento do rotor é descrito de forma semelhante ao efeito do roçamento parcial, mesmo no seu estado de trabalho, o que acontece normalmente com o eixo na maior parte do tempo.

Mas durante uma fração do período de precessão, o rotor sofre uma diminuição da rigidez causada pela fixação inadequada em algum elemento. Segundo Lima [9], a demonstração analítica deste fenômeno é semelhante à do roçamento, considerando o efeito da rigidez como negativo, havendo uma redução temporária na rigidez do sistema. Pode-se concluir que folgas mecânicas causam vibrações na estrutura geralmente numa frequência duas vezes à rotação da parte folgada e também em altas ordens. Por outro lado, as folgas funcionam como amplificadoras de vibração. Pode-se então afirmar que não existiria vibração em um mecanismo com folga, caso não existissem forças, (tais como desbalanceamento e desalinhamento) excitando o sistema.

2.2 Defeitos elétricos em motores trifásicos

Condições operacionais desfavoráveis, elétricas, mecânicas ou ambientais, podem reduzir drasticamente a vida de um enrolamento de um motor. Uma sobrecarga de corrente pode provocar aquecimento e deterioração dos vernizes de isolamento do enrolamento ou ainda fuga de corrente entre as fases e/ou a carcaça do motor, reduzindo sua vida útil.

Segundo Reis [10] o defeito de um componente em uma máquina elétrica significa um indício de capacidade reduzida para atender aos requisitos mínimos especificados. Caso este defeito não seja identificado, ou caso seja permitido o prosseguimento da operação, isto pode conduzir a uma falha. Logo, essas falhas, e não o defeito de um componente, são registradas como causa que conduziram a um colapso ou a uma parada não planejada da máquina [11]

A seguir, apresenta-se uma descrição resumida dos principais defeitos em motores elétricos [12, 13].

2.2.1. Falta de fase

A falha em uma única fase de um enrolamento é o resultado da interrupção de uma fase de alimentação do motor.

A falta de fase é geralmente ocasionada pela interrupção de um fusível, contator com contatos interrompidos, falta de fase na linha de alimentação ou mal contato provocado por conexões danificadas e inadequadas.

2.2.2. Curto-circuito entre fases ou espiras

Este tipo de falha no isolamento é tipicamente causado por contaminação do enrolamento, abrasão, vibração ou surtos de tensão.

Pode também ser consequência da ineficiência na execução do isolamento entre fases, quando do enrolamento do estator, ou mesmo do emprego de materiais inadequados, incompatíveis com a classe térmica e de tensão do equipamento

2.2.3. Bobina em curto-circuito

Semelhantemente ao curto-circuito entre bobinas, pode-se ter o enrolamento danificado por sobrecarga no motor, uso do mesmo em tensão incompatível com a classe de isolamento das bobinas, ineficiência na execução do isolamento entre fases, quando do enrolamento do estator, ou mesmo do emprego de materiais inadequados.

2.2.4. Travamento do rotor

Deterioração térmica severa em todas as fases do enrolamento, causada por correntes muito elevadas no enrolamento do estator devido à condição de travamento ou bloqueio do rotor.

Esta falha também pode ocorrer devido ao número excessivo de partidas ou reversões, incompatíveis com o regime para o qual o motor foi projetado.

Capítulo 3

Parâmetros de análise preditiva

Os principais parâmetros que impactam na vida útil de componentes de máquinas elétricas, são:

- Temperatura
- Corrente e tensão elétrica e desequilíbrio entre fases
- Vibrações mecânicas devido ao desbalanceamento e/ou desalinhamento
- Análise dos sinais no domínio da frequência

3.1 Avaliação de motores

A análise da temperatura dos elementos em estudo se mostra relevante para o acompanhamento e determinação da durabilidade esperada do mesmo, ou seja, sua vida útil tem relação direta com a temperatura de operação.

3.1.1. Temperatura em motores

Segundo Filho [5], a vida útil dos motores de indução é normalmente muito longa. Os fatores que influenciam a duração desta vida são: umidade, vibração, ambientes corrosivos e temperatura.

O fator mais importante é a temperatura. Um aumento de 8 a 10° C na temperatura do sistema de isolamento, formados pela combinação de vários materiais, pode reduzir a vida útil do

motor pela metade.

O sistema de isolamento tem uma vida praticamente ilimitada se a sua temperatura for mantida dentro dos limites especificados de operação. Este limite de temperatura é inferior à temperatura de queima do sistema e depende do tipo e materiais utilizados como isolantes, e a classificação térmica do motor.

Conforme o trabalho de Silva [14], a vida útil de um rolamento está intrinsecamente ligada à temperatura de operação do motor e que com uma variação de 8 a 10° C acima da condição nominal terem-se uma alteração pelo fator dois na vida útil do isolamento (redução da vida útil) e consequentemente vida útil do motor.

Em seu trabalho, Tissot [6], apresenta a mesma relação; ou seja a temperatura 10° C acima do limite de classe de um motor reduz sua vida útil em 50 %, ilustrado no gráfico da Figura 1.

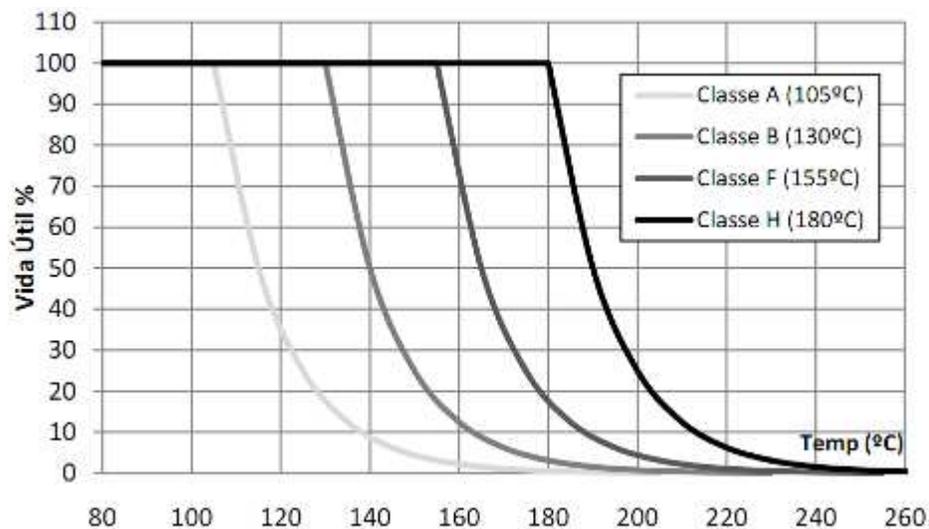


Figura 1 - Classes de isolamento e vida útil [15].

Semelhantemente tem-se que a vida útil de rolamentos de mancais sofre degradação relativa às condições de temperatura à ele impostas, além de cargas mecânica aplicadas aos elementos rolantes.

O trabalho de Leles [15], sobre proteção contra sobrecargas em motores assíncronos onde apresenta na Tabela 1 uma correlação do efeito da temperatura da vida útil do isolamento em motores e a temperatura; ilustra a importância em se monitorar a temperatura de motor de indução trifásico, como parte importante num sistema de manutenção preditiva.

Consultados os principais fabricantes de motores sobre quais os limites de temperatura de um motor de indução trifásico, eles se limitam a apresentar a norma (NBR-7094) que rege as classes de temperatura (A, E, B, F e H) e disponibilizam um perfil típico de dissipação térmica da carcaça do motor. Filho[5] afirma que o calor gerado no motor é dissipado para o ambiente por condução através da carcaça. Em motores fechados, continua explicando que esta dissipação normalmente é auxiliada por um ventilador, na Figura 2 é apresentado um perfil típico de dissipação de calor em motor de indução trifásico.

Tabela 1 - Redução da vida útil em função do aumento adicional de temperatura [15].

Elevação de Temperatura - $\Delta\theta$ [°C]	Tempo de vida [anos]	Tempo de vida [PU]	Redução da vida útil [%]
0	20,00	1,00	0,0
1	18,46	0,92	7,7
2	17,04	0,85	14,8
3	15,73	0,79	21,4
4	14,54	0,73	27,3
5	13,43	0,67	32,8
6	12,42	0,62	37,9
7	11,49	0,57	42,5
8	10,63	0,53	46,8
9	9,84	0,49	50,8
10	9,11	0,46	54,4
15	6,24	0,31	68,8

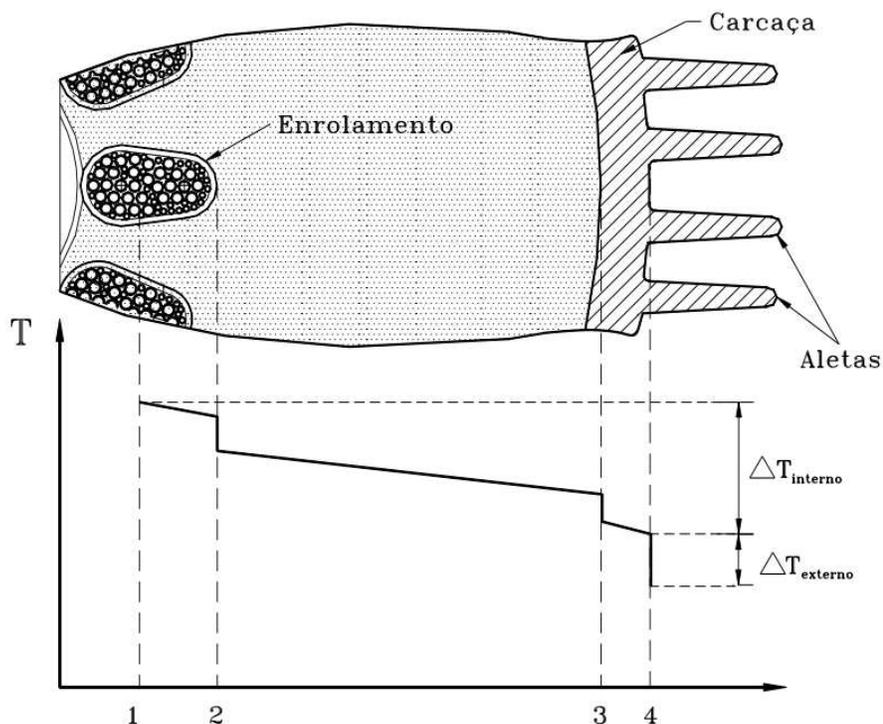


Figura 2- Perfil típico de dissipação térmica do interior do motor até a superfície [5].

Os fabricantes de motores elétricos não fornecem dados ou informações para cálculo das quedas de temperatura dos trechos do referido perfil de dissipação da temperatura interna do motor, Figura 2, alegando que muitos fatores (material da carcaça, temperatura interna/externa, ventilação, etc.) influem no cálculo destes deltas de temperatura [16]. Como alternativa para este problema os fabricantes vendem como opcional, sensores de temperatura instalados em motores com carcaças especialmente projetadas para sua instalação, que por sinal nem está disponível para todos tamanhos e dimensões de motores. Ou ainda pode-se utilizar do método de se medir a temperatura de um enrolamento através da variação de sua resistência ôhmica, conforme proposto por Oliveira [17]. Este método tem o inconveniente de se estabelecer parâmetros controlados de ensaio para se determinar, por exemplo, resistência com o motor antes do ensaio, após ensaio, temperaturas ambiente, do refrigerante, do enrolamento, etc. O que torna um método impraticável em ambiente industrial em regime de produção.

Em seu trabalho sobre a avaliação da temperatura do motor de indução trifásico submetido a desequilíbrio de tensão, Almeida [18], destaca que o limite de temperatura admissível para um motor depende de sua classe de isolamento; na Tabela 2, tem-se as temperaturas envolvidas para a determinação do ponto mais quente nos enrolamentos de um

estator.

A temperatura do enrolamento do motor, durante o seu funcionamento, é resultado da soma de duas parcelas: a primeira, representada pela temperatura ambiente do local em que o motor está instalado; a segunda, pela elevação de temperatura, acima da temperatura ambiente, provocada principalmente pelas perdas por efeito Joule e correntes de Foucault no motor. Assim, se a temperatura do motor é 120° C e a temperatura ambiente do local da instalação 30° C, a sua elevação de temperatura terá sido de 90° C. A elevação de temperatura se define, portanto, como a diferença entre a temperatura do motor e a temperatura ambiente.

A Norma Brasileira NBR-7094, estabelece como temperatura ambiente de referência o valor de 40° C, portanto desde que quando não houver informações específicas de temperatura ambiente de operação de um motor, assume-se que a temperatura ambiente seja de 40° C.

Tabela 2 – Temperaturas admissíveis, em função da classe de isolamento [18].

Classe de Isolamento	A	E	B	F	H
Elevação de temperatura média admissível, calculada pelo método da resistência [° C]	60	75	80	100	125
Diferença de temperatura entre o ponto mais quente e a temperatura média [° C]	5	5	10	15	15
Temperatura ambiente [° C]	40	40	40	40	40
Temperatura admissível do ponto mais quente [° C]	105	120	130	155	180

A validação exigiu um equacionamento empírico para se determinar os limites de temperatura do motor nas medições a partir de sua superfície. Para tanto assume-se as seguintes premissas:

a) Na apostila do curso de Manutenção Industrial II da Fundação Liberato, Estupiñan e Saavedra [19], no capítulo que trata de manutenção de motores elétricos, item 2.2 sobre manutenção preventiva, recomenda-se medir a temperatura da carcaça do motor com um pirômetro para constatar que a superfície do mesmo não esteja acima de 70° C. O critério para este nível de temperatura é que, exceto especificação em contrário, a graxa utilizada nos rolamentos operam até esta temperatura, pois acima de 70° C o óleo se separa do sabão.

b) Empiricamente, em ambiente industrial, através de medições no motor em estudo,

observa-se que a temperatura da carcaça do motor, ao longo de algumas horas de funcionamento e com medições em vários pontos, apresentou valores entre 65 e 75° C, juntamente com estas medições foram feitas medições automáticas de temperatura, onde observa-se que a temperatura máxima registrada foi de 77,7° C,

Diante do comportamento de variação da temperatura observada, assume-se empiricamente como temperatura nominal aplicada à carcaça do motor no ambiente de fábrica em teste como sendo 75° C, o que leva a seleção como nível de alarme 1 o valor de 80° C e alarme 2 (crítico) o valor de 95° C, vide Tabela 3.

Tabela 3 – Histórico de medição de temperaturas do motor de uma máquina de lavar industrial.

Histórico de: AV001-1		
Data	Hora	Medida (°C)
19/10/12	09:34:39	65,4
19/10/12	08:34:39	64,6
19/10/12	07:34:16	63,8
19/10/12	06:33:56	59,7
19/10/12	05:33:39	45,7
19/10/12	04:34:34	44,9
19/10/12	03:34:39	45,7
19/10/12	02:34:39	47,4
19/10/12	01:34:34	53,9
19/10/12	00:34:39	63,8
18/10/12	23:34:39	76,9
18/10/12	22:34:35	69,5
18/10/12	21:34:35	63,8
18/10/12	20:34:35	64,6
18/10/12	19:34:31	70,3
18/10/12	18:34:13	76,9
18/10/12	17:34:35	76,9
18/10/12	16:34:39	77,7
18/10/12	15:55:52	72,8
18/10/12	15:50:12	71,2

3.1.2. Medição do valor eficaz e tensão em circuito trifásico

Segundo Belchhior [16], a relação entre a variação de tensão e corrente: “um pequeno desequilíbrio de tensão - da ordem de 2,3 % - é responsável por um desequilíbrio de corrente - da ordem de 17,7 %” - juntamente com uma elevação de temperatura de 30° C, ilustrado pela Tabela 4.

Tabela 4 – Efeitos dos desequilíbrios de tensão em motores elétricos.

Característica	Desempenho		
	Tensão média (V)	230	230	230
% Deseq. Tensão	0,3	2,3	5,4
% Deseq. Corrente	0,4	17,7	40
Elevação Temperatura (°C)	0	30	40

Para a medida da corrente e tensão do motor trifásico foram feitas as medidas dos sinais correspondentes através de TP's e TC's instalados na alimentação do motor.

O cálculo do valor eficaz das grandezas medidas foi calculado através da seguinte fórmula:

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (X_n)^2}{N}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde X_n é a n ésima amostra medida.

Os cálculos apresentados foram feitos por uma rotina de software, escrita em linguagem delphi versão 5.0.

Além desta grandeza, foram registrados para o sinal lido, o valor médio, valor máximo, mínimo e amplitude (valor pico a pico) do sinal lido, conforme ilustra a Figura 3.

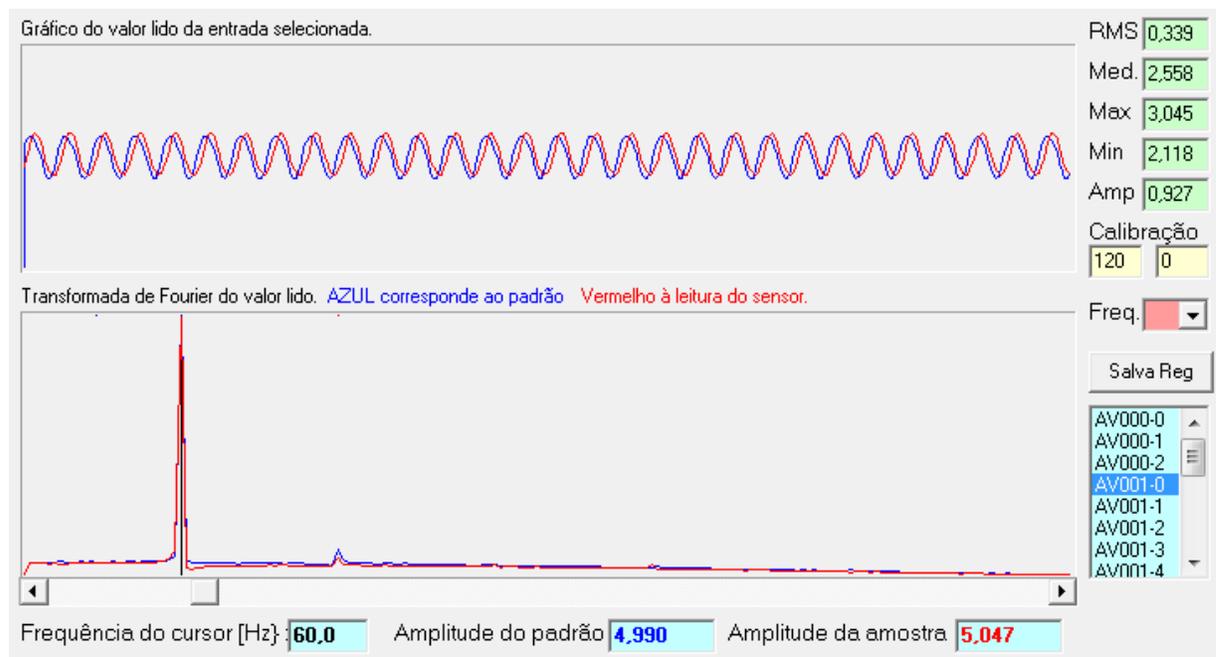


Figura 3-Tela de leitura de corrente que ilustra o formato do sinal lido e apresenta os valores RMS, médio, máximo, mínimo e amplitude do sinal medido no tempo.

Imediatamente após a leitura da corrente de fase tem-se a visualização da curva do sinal lido no domínio do tempo e a visualização da correspondente transformada discreta de Fourier.

A análise deste sinal (FFT) nos possibilita visualizar a presença de harmônicos na corrente.

Uma vez que o sistema têm cadastrado as três fases de um motor, o procedimento de leitura de uma fase se dá de forma automática pois o *software* de controle faz a leitura das outras fases correspondentes deste motor, para a comparação de eventual desequilíbrio das correntes entre as fases. Na Figura 4, tem-se cadastrado o sinal AV000-0 como fase A da Bomba submersa, e, no sistema de leitura estão registrados os sinais AV000-1 e AV000-2, fase B e fase C respectivamente, como Comp.1 e Comp.2, ou seja sinais a serem comparados entre si para verificação de desequilíbrio na alimentação do motor, chamada de Rede 3F (3 fases).

Sensor	Máquina	Descrição/Identificação		
AV000-0	Bomba Submersa Exaustor da Estufa Lavadeira 42	Fase A		
		Tipo: Rede 3F		
TFL1	Alarme 1	Comp.1	Constante a	Freq
1	40	AV000-1	120	2
TFL2	Alarme 2	Comp.2	Constante b	
2	50	AV000-2	0	

Figura 4 - Cadastro de 3 fases para comparação de desequilíbrio de fases.

Foram estabelecidos dois alarmes de desequilíbrio entre as fases, o primeiro alarme, que dá nível “atenção” é acionado quando tem-se um desequilíbrio de 5 % nas correntes, o segundo nível “crítico” é acionado quando tem-se um desequilíbrio maior que 17,7 %, para as correntes medidas. Os níveis de alarmes variam em função do equipamento monitorado.

Ao parâmetros aplicados à cada sensor são: Descrição, tipo de sinal, se corrente, vibração, tensão ou temperatura, os limites de distorção harmônica da FFT do sinal (TFL1 2 TFL2), alarmes limites dos valores RMS das medidas (Alarme 1 e Alarme 2), identificação de outros sensores para comparação de desequilíbrio entre tensões e correntes (Comp.1 e Comp.2), constantes de multiplicação dos transdutores, utilizados para ajustes de escalas (Constante a e Constante b) e resolução no eixo da frequência na FFT (Freq).

3.1.3. Medição no domínio da frequência e tecnologia MCSA (*Motor Current Signature to Analysis*)

Segundo Assunção [20], nos motores de indução, os problemas elétricos muitas vezes são os vilões de paradas não programadas, que poucas são as ferramentas de análise preditiva disponíveis no mercado. Esta técnica, hoje bastante discutida nas duas últimas décadas, nasceu da observação do comportamento da corrente elétrica em função da existência de um problema, seja ele elétrico ou mecânico, e ainda das particularidades de se avaliar falhas em motores inacessíveis fisicamente. Foi quando na década de 80 alguns pesquisadores dentre eles, H. Okitsu, C. Hargis e W. T. Thomson, perceberam ao avaliar também a assinatura da corrente do estator, bandas

laterais em torno da frequência fundamental que correspondiam ao aparecimento de barras trincadas ou quebradas no rotor.

A técnica MCSA procede da modulação capaz de sensibilizar o *air-gap*, numa frequência característica e ainda do conteúdo harmônico adquirido por esta em função de outras falhas, como por exemplo, problemas no estator bem como problemas com o sistema de alimentação no qual o motor está inserido. Esta técnica tem como característica, e assim também uma vantagem, o número reduzido de transdutores empregados, onde se utiliza apenas um transdutor de corrente, instalado no painel de alimentação. Outra grande vantagem está no fato desta não ser invasiva, ou seja, não necessita a abertura e nem a parada do motor para análise e ainda não necessita estar próximo à máquina, reduzindo riscos de acidentes e deslocamentos excessivos.

A análise do espectro do sinal constitui da transformação do sinal do domínio do tempo, para o domínio da frequência, onde se obtém a assinatura da corrente. Este processamento é realizado a partir da *Fast Fourier Transform* (FFT) que constitui um algoritmo que acelera a *Discrete Fourier Transform* (DFT). A DFT transforma um sinal do domínio do tempo a um conjunto de senos e cossenos com amplitudes e frequências diferentes que podem ser somados para formar o sinal no domínio do tempo original.

A análise compreende localizar a frequência de interesse (de falha) e comparar a tendência de aumento da magnitude desta componente no tempo para verificar se há ou não um processo de falha em progresso.

Para o acompanhamento da falha a partir da assinatura de corrente, tem sido estabelecido por diversos autores, um conjunto de padrões de falha, que procuram orientar a busca das componentes de interesse. No caso de falhas elétricas que geram um desequilíbrio elétrico no motor, tem-se que a componente relativa ao terceiro harmônico, Figura 5, que vai indicar a presença ou não deste desequilíbrio [21].

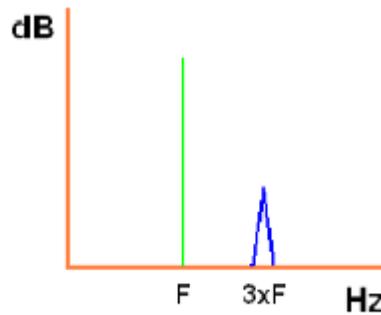


Figura 5 – Padrão de falhas no estator MCSA.

Uma vez estabelecido um padrão de funcionamento e sinais do motor o acompanhamento do sinal no domínio da frequência observa-se o surgimento de harmônicos característicos de falhas no sinal, gerando-se um alerta para a necessidade de manutenção do referido equipamento.

3.2 Avaliação de elementos mecânicos

Semelhantemente ao motor elétrico que têm sua vida útil afetada por sobreaquecimento, os redutores mecânicos também apresentam degradação da vida útil em função de sobreaquecimento de suas partes, sobretudo e principalmente pela degradação do óleo e/ou graxa lubrificante, necessária à sua operação.

O monitoramento térmico das máquinas se mostra relevante, principalmente para se determinar as condições dos lubrificantes utilizados.

Também o acompanhamento do sinal de vibração em elementos mecânicos é relevante para se determinar o desgaste ou falha das partes componentes de um sistema, uma falha ou ruptura estrutural destes componentes aparecerá como nova frequência ou amplitude de uma frequência no espectro do sinal medido.

3.2.1. Temperatura em redutores mecânicos

Para determinar a temperatura de operação de redutores, recorre-se à manuais de fabricantes, e segundo o fabricante INARMEG (Anexo 1), a temperatura de trabalho de um redutor ou moto-redutor, a plena carga, não deve exceder 40° C da temperatura ambiente, tendo como a máxima temperatura interna de 95° C, e explica que a temperatura externa da caixa do redutor é de aproximadamente 15° C a menos que a temperatura interna do mesmo.

Semelhantemente ao consultar o manual do fabricante MACOPEMA (Anexo 2), o fabricante determina que a temperatura medidas na carcaça do redutor são em média 10° C mais baixas do que a temperatura do óleo.

Os próprios fabricantes em seus manuais trazem uma grande variedade de opções de lubrificantes para atendimento à várias temperaturas de trabalho.

Na prática, o redutor utilizado têm lubrificante especificado para trabalhar em 70° C e considerando a recomendação do fabricante de que a temperatura da carcaça seja 10° C a menos, estabeleceu-se o alarme de temperatura para este elemento em 60° C. Entretanto o *software* de supervisão tem a opção de configurar estes limites de acordo com os dados de cada redutor ou ainda para cada tipo de lubrificante utilizado no redutor.

A ação da temperatura tem influência direta na vida útil do redutor, conforme mostra a Tabela 5, onde o intervalo de troca de óleo do redutor decresce com o aumento da temperatura de operação do mesmo.

Tabela 5 – Intervalo de troca de óleo x Temperatura de operação.

Temperatura do óleo (°C)	Intervalos de trocas de óleo em horas (valores médios de referência)	
	Óleo mineral	Óleo permanente
70	8000	18000
85	3000	9000
100	1500	4500
Vida útil	18 meses	48 meses

Semelhantemente ao estudo de temperatura do motor, observa-se que a temperatura da carcaça do redutor, ao longo de algumas horas de funcionamento e com medições em vários pontos, apresentou valores entre 42 e 70° C, juntamente com estas medições foram feitas medições automáticas de temperatura, vide Tabela 6, onde observa-se que a temperatura máxima registrada foi de 70,7° C. Diante do comportamento de variação da temperatura observado, assume-se empiricamente como temperatura nominal aplicada à carcaça do redutor no ambiente de fábrica em teste como sendo 65° C, o que leva a selecionar como nível de alarme 1, o valor de 70° C e alarme 2 (crítico), o valor de 80° C.

Tabela 6 – Histórico de medição de temperatura do redutor da lavadeira industrial.

Histórico de: AV001-4		
Data	Hora	Medida (°C)
19/10/12	09:35:04	63,6
19/10/12	08:35:04	60,0
19/10/12	07:34:41	55,5
19/10/12	06:34:21	56,4
19/10/12	05:34:03	45,6
19/10/12	04:34:59	42,0
19/10/12	03:35:04	42,0
19/10/12	02:35:04	45,6
19/10/12	01:34:59	51,0
19/10/12	00:35:04	58,2
18/10/12	23:35:04	68,0
18/10/12	22:35:00	64,5
18/10/12	21:35:00	57,3
18/10/12	20:35:00	59,1
18/10/12	19:34:56	63,6
18/10/12	18:34:38	65,4
18/10/12	17:35:00	67,1
18/10/12	16:35:04	70,7
18/10/12	15:50:34	61,8

Ainda em seu trabalho Moura [22] salienta que é importante saber que a uma temperatura de 40° C, a vida útil de um rolamento de esferas em funcionamento contínuo pode ser de 3 a 4 anos ou mais. No entanto, para cada 10° C de elevação da temperatura de trabalho a vida útil diminui, em média, 50 %.

3.2.2. Análise preditiva de falhas em sistemas mecânicos

Um dos componentes críticos das máquinas são os rolamentos. Os defeitos desses componentes podem ser causados durante o processo de fabricação ou uso. Caso essas falhas não sejam detectadas a tempo, podem levar a um mau funcionamento da máquina e até comprometer outros componentes, podendo inutilizá-la. A pesquisa de técnicas adequadas para o monitoramento das falhas em rolamentos mostra-se, portanto, imprescindível.

3.2.2.1. Análise espectral, médias e frequências mecânicas

Segundo Estupiñan e Saavedra [19], os rolamentos atuam como uma fonte de ruído e vibração devido tanto a variação de medida como a presença de defeitos neles, mesmo que geometricamente perfeitos [23, 24].

Dependendo da localização do defeito no rolamento, gera-se vibrações de diferentes frequências. Quando uma área defeituosa faz contato com a sua superfície, produz-se pulsos periódicos de curta duração. Os períodos com que se produzem tais pulsos é em função da geometria do rolamento, da velocidade de rotação e da localização do defeito [25, 26].

A análise de frequência (ou espectral) é a técnica mais comumente utilizada para diagnóstico de falhas através da análise de vibração. Você pode identificar falhas típicas como rotor desbalanceado, desalinhamento, frouxidão e defeitos mecânicos em rolamentos. A ideia básica da análise de frequência é encontrar a relação existente entre a frequência discreta dos componentes presentes no espectro e a frequência de forças dinâmicas que geram as vibrações.

Ainda de acordo com Bezerra [27] Quando a falha em uma superfície do rolamento golpeia outra superfície, um impulso é gerado, o qual excita ressonâncias do rolamento e da máquina. Como o rolamento gira, estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que depende unicamente da posição do defeito [28], vide Figura 6.

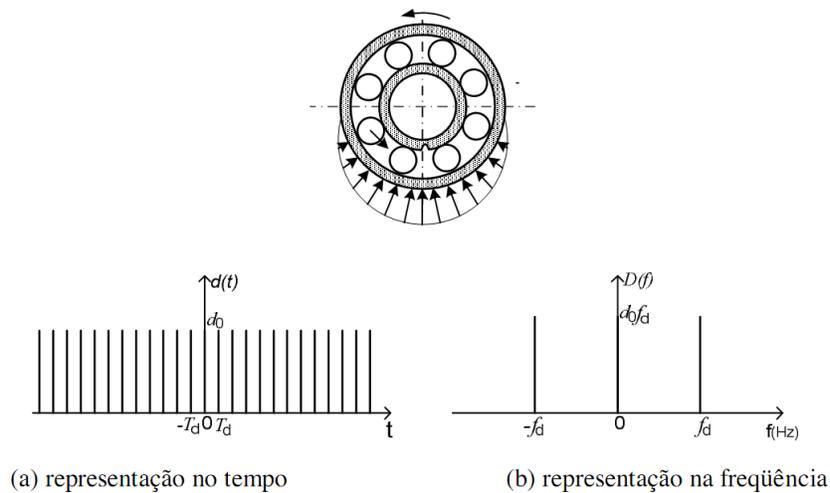


Figura 6 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista estacionária [26].

Na Figura 7 tem-se um exemplo prático da medição de vibração em um motor colocado numa bancada para teste do sensor e avaliação do sinal de vibração coletado; de onde tem-se a visualização da forma de onda no domínio do tempo e sua respectiva FFT. As informações de medida do sinal, tais como valor RMS, média, máximo, mínimo e amplitude são mostradas no canto superior direito. As unidades das medidas variam de acordo com a grandeza medida, sendo volts quando tensão, amperes quando corrente, g quando vibração e °C quando temperatura.

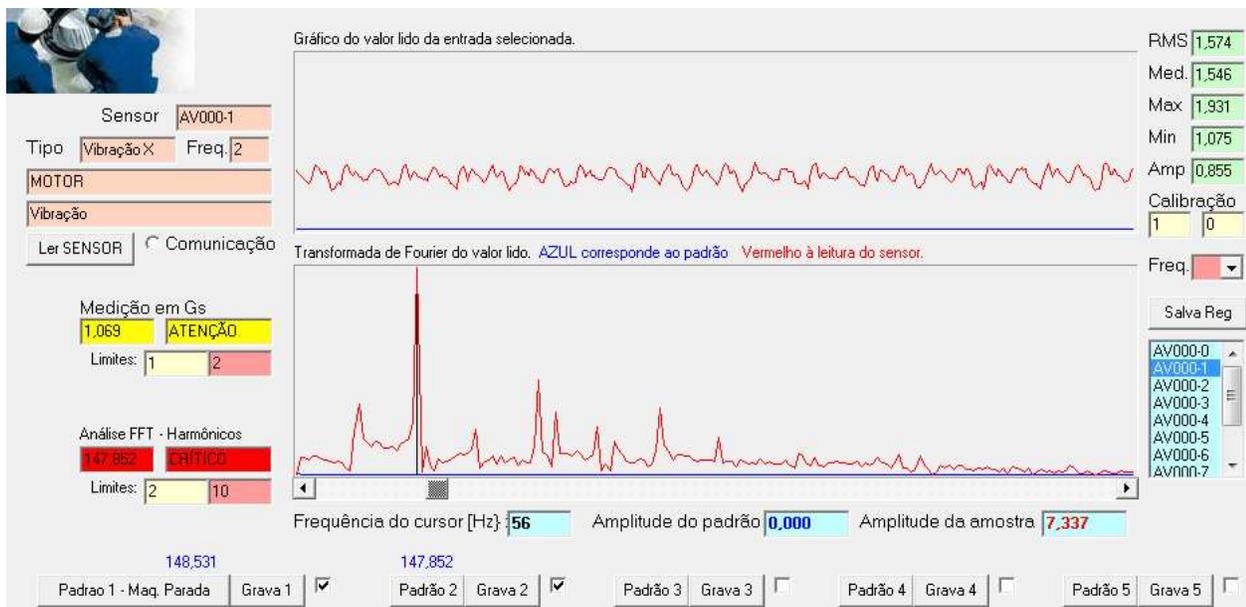


Figura 7 – Tela de leitura do sinal medido, com ilustração da forma do sinal no domínio do tempo e frequência (FFT) e apresentação dos valores lidos.

Capítulo 4

Aplicação de um sistema de inferência *Fuzzy*

4.1 Sistema *Fuzzy*

É desevel a aplicação de um sistema de inferência para lidar com a variação do comportamento e modelagem do sistema [32]. Através da análise de sinais de vibração e suas características é possível diferenciar e estabelecer diferentes características de operação de um elemento.

A Lógica *Fuzzy* é baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy* e difere da teoria clássica do filósofo grego Aristóteles. A lógica *Fuzzy* é uma tentativa de se aproximar a precisão característica da matemática à inerente imprecisão do mundo real, nascida no desejo profundo de se conhecer melhor os processos mentais do raciocínio [34].

Um sistema de inferência *Fuzzy* (difuso) com regras se-então pode qualificar aspectos quantitativos e qualitativos com grande precisão dispensando a necessidade de informação complementar ou específica que pode não estar disponível, no nosso exemplo a utilização de grande base de dados e tabelas de elementos das máquinas em estudo.

Conforme ilustra Sanz [35] em seu trabalho sobre sistema *Fuzzy* aplicado na análise de vibrações, num caso de falha de um rolamento, o fenômeno de vibração alterada na máquina será mínimo, contrário a uma quebra de eixo ou de maior gravidade; numa primeira observação uma análise superficial pode resultar em uma análise falha.

A modelagem *Fuzzy* foi primeiramente explorado e proposto por Takagi e Sugeno [36], onde destacam-se dois aspectos desta abordagem:

1 – O sinal de vibração em máquinas elétricas têm informações que podem ser utilizadas para prever o estado de uma máquina. A Figura 8 mostra a composição de um sistema de inferência básico.

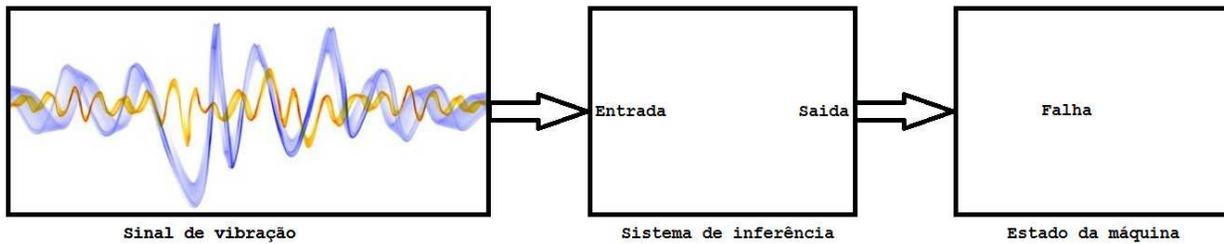


Figura 8 - Sistema de inferência básico.

2 – Padrões capturados sob diferentes condições podem ser similares, entretanto se faz necessário um sistema de inferência que facilite a identificação do processo. A Figura 9 ilustra cinco padrões coletados em situações determinadas pelo operador do sistema, como por exemplo, padrão de vibração da máquina parada (padrão 1) e outras situações nominais de funcionamento como por exemplo, máquina em condição de *set-up*, operação nominal, sobre ou sub carga, operação de limpeza, etc. (padrões 2 a 5). Adicionalmente à estes cinco padrões, o *software*, após início de funcionamento, a cada leitura feita, nas próximas 24 leituras, a cada leitura feita estabelecerá mais 24 padrões de sinal.

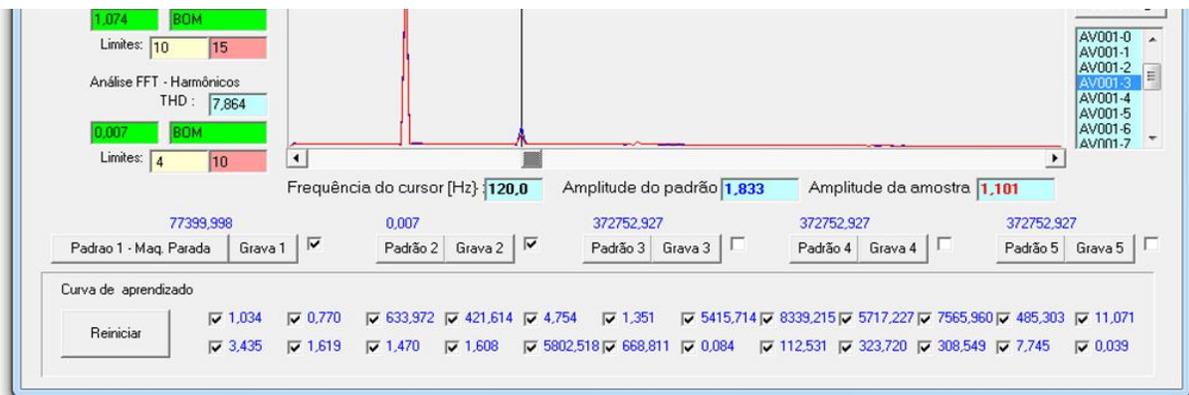


Figura 9 – Tela de leitura de medidas e gravação de padrões da variável monitorada.

4.2 Regras “se-então” para um sistema difuso

Sistema de inferência difuso também conhecidos como sistemas baseados em regras *Fuzzy*, modelagem *Fuzzy*, ou controladores *Fuzzy*, são basicamente compostos por cinco blocos funcionais, Figura 10.

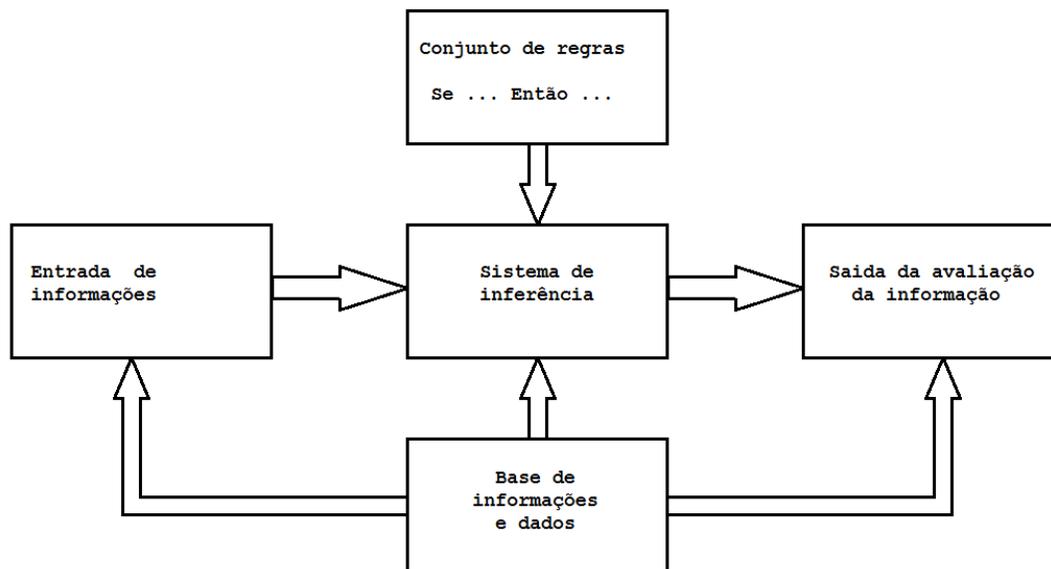


Figura 10 - Estrutura de um sistema de inferência difuso.

Tal sistema é constituído pela seguinte estrutura funcional:

- a) Uma base de regras para decisão do tipo se-então.
- b) Uma base de dados que define o funcionamento e operação dos parâmetros de difusão utilizados em conjunto com a base de regras.
- c) Uma unidade entrada que transforma o sinal coletado em informação possível de tratamento e aplicação de regras avaliativas.
- d) Uma interface de inferência que aplica à informação coletada as regras aplicáveis aos dados e determina graus de compatibilidade com a base de informações disponíveis.
- e) Interface de saída que transforma o resultado da avaliação e comparação do sinal medido em informação tratada de forma clara e direta.

O sistema proposto têm a implementação de 141 regras se-então que envolvem os aspectos principais e relevantes na análise de falha de um motor, englobando as medições de valores RMS de tensão, corrente, vibração e temperatura e os valores das transformadas de Fourier, para detecção da presença de harmônicos que indicam alteração de características de máquina, como por exemplo quebra de gaiola de um motor de indução trifásico [21].

As funções de pertinência das variáveis de entrada e as partições dos universos em discurso em termos linguísticos foram determinados utilizando o processo intuitivo, doravante para as variáveis temos os termos linguísticos para cada grandeza mensurada, Figura 11.

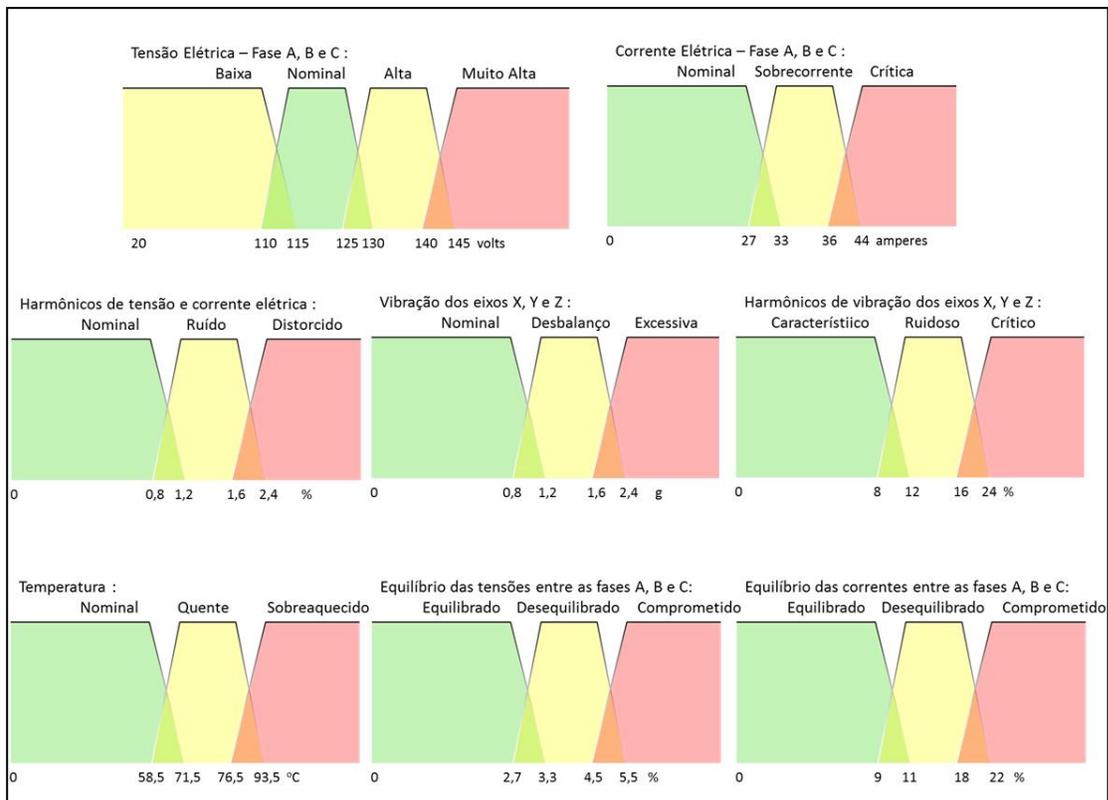


Figura 11 – Termos linguísticos das funções de pertinências.

Conforme vê-se nos gráficos dos termos utilizados, o valor de cada termo se situa entre 0 e 1 conforme a situação da variável estudada, sendo que é possível que seja diferente de 0 (zero) para mais de um termo, como por exemplo o termo temperatura se situar na intersecção dos termos nominal e quente, neste caso podem-se ter 70 % (0,7) nominal e 30 % (0,3) quente, mas a soma dos estados possíveis não deve ser superior a 100 % (1,0).

A interface de *defuzzyficação* gera a variável de saída à partir de um conjunto de regras de controle derivadas das operações de inferência. As regras de avaliação e as respectivas ações decorrentes são determinadas a partir de conjuntos nebulosos de entrada considerando a representação a cada termo linguístico de entrada de um peso (0, 1 ou 2).

O cálculo da variável de saída (Z_n) se dá pela somatória dos níveis das funções de pertinências das variáveis de entrada (μ_{xy}) e seus respectivos pesos (ω_{xy}) elevados ao quadrado:

$$Z_n = \sum_{x=1}^k \sum_{y=1}^l \mu_{xy} \cdot \omega_{xy}^2 \quad \text{Equação 2}$$

Para a elaboração de cada regra, gerou-se uma matriz com as funções de pertinência das grandezas inter-relacionadas, vide Tabela 7 e Tabela 8:

A variável de saída resultante desta interação entre as entradas resulta numa combinação normalizada em 1 (100 %), ou seja ao valor 0 atribui-se a não ocorrência de dano ou degradação ao elemento em estudo e 1 (100 %) tem-se a situação de eminente quebra do elemento, conforme a Tabela 9.

Tabela 7 - Regra 1: Interação de Corrente da fase A com o Harmônico da corrente da fase A.

Regra 1	Harmônicos ->	Normal	Ruído	Distorcido
Corrente (Fase A)	Nominal	Ok	Alerta	Atenção
	Sobrecorrente	Alerta	Atenção	Grave
	Crítica	Atenção	Grave	Quebra

Tabela 8 - Regra 70: Interação de Tensão da fase A com o Harmônico da tensão da fase A.

Regra 70	Harmônicos ->	Normal	Ruído	Distorcido
Tensão (Fase A)	Baixa	Alerta	Atenção	Grave
	Nominal	Ok	Alerta	Atenção
	Alta	Alerta	Atenção	Grave
	Muito Alta	Atenção	Grave	Quebra

Tabela 9 – Relação numérica da variável de saída x valor atribuído.

Relação numérica da saída Zn	
Termo Linguístico	Valor Zn
Ok	0,00
Alerta	0,25
Atenção	0,50
Grave	0,75
Quebra	1,00

O conjunto de 141 regras foi implementada num *software* implementado em linguagem computacional delphi, versão 5.0, que mostra, para cada regra o valor calculado de Zn, mostrado no canto inferior direito, numa escala de 0 a 100 %, Figura 12.

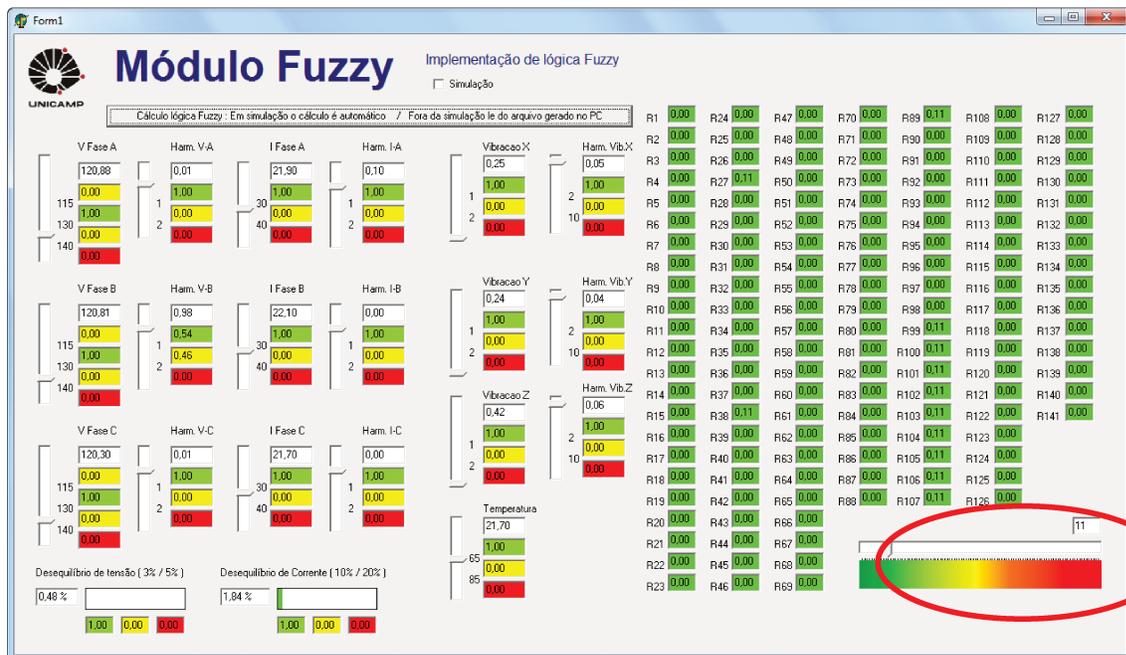


Figura 12 – Conjunto de regras *Fuzzy*, valores nominais, Zn = 0,11 (11 %).

4.3 Metodologia para avaliação do sinal medido

O sistema têm a sua principal aplicação na determinação quantitativa e qualitativa na comparação do sinal medido com um sinal previamente esperado, que seria o correspondente ao funcionamento nominal da máquina para uma determinada condição.

Uma forma de se determinar se houve alguma alteração no sinal padrão e no sinal medido num momento posterior é a medida do valor das amplitudes dos componentes de frequências dos sinais, obtidos pela FFT do sinal medido, ou seja a medição da taxa de distorção harmônica.

A distorção harmônica total (THD) é a quantificação numérica dos harmônicos, de tensão ou corrente, para um dado ponto da rede. Segundo a norma IEEE 519, adotada neste trabalho, esta quantificação representa a relação entre os valores eficazes da componente fundamental e dos harmônicos.

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \cdot 100\% \quad \text{Equação 3}$$

Que pode ser representada ainda pela equação equivalente,

$$THD = \sqrt{\left(\frac{Y_{ef}}{Y_1}\right)^2 - 1} \quad \text{Equação 4}$$

Esta forma de quantificar a taxa de distorção harmônica permite obter distorções acima dos 100 % o que quer dizer nesses casos que a componente harmônica é superior à componente fundamental.

O surgimento de novas harmônicas alterará o valor das amplitudes de determinadas frequências da onda acusando sua alteração de forma, para tanto a detecção é feita pelo módulo da diferença do valor de amplitudes do sinal espectrográfico padrão e do sinal espectrográfico medido a ser comparado.

Na Figura 13 tem-se a medida de vibração no eixo X de um motor ao longo do tempo, sendo que a curva azul corresponde ao motor em condições nominais de uso e a curva vermelha corresponde à leitura do motor com eixo desbalanceado.

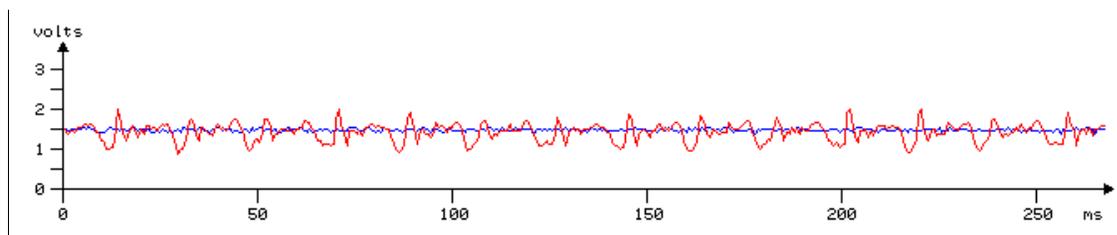


Figura 13 – Medida de vibração no domínio do tempo, curva azul motor balanceado, curva vermelha motor desbalanceado.

Na Figura 14, tem-se as medidas da Figura 13 no domínio da frequência (FFT dos sinais), sendo a curva azul o sinal correspondente ao motor em condição de operação balanceado e a curva vermelha a operação desbalanceado. Pode-se notar que fica evidente a diferença entre os sinais.

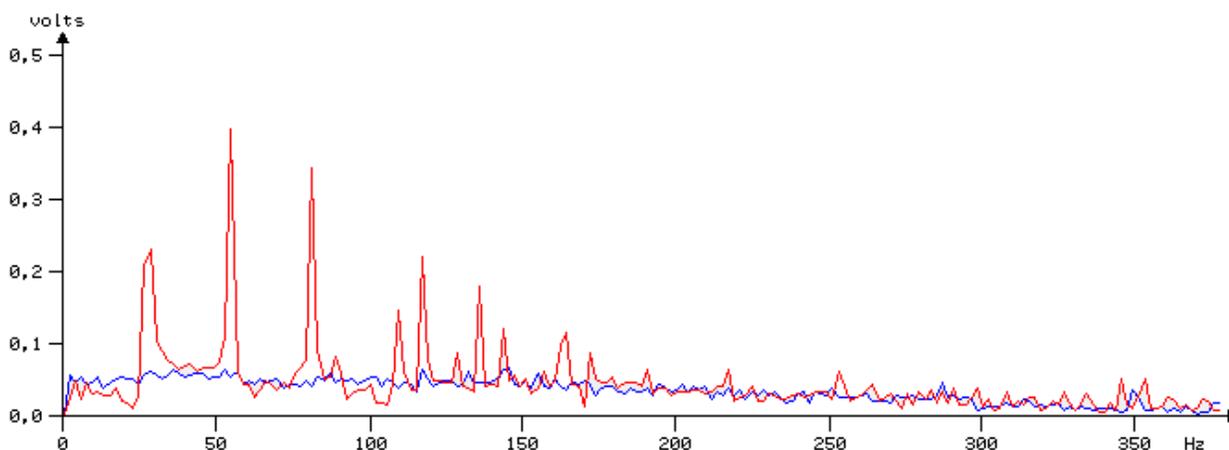


Figura 14 – FFT das medidas do motor, curva azul motor balanceado, curva vermelha motor desbalanceado.

É evidente a alteração das medidas nos dois exemplos, no domínio da frequência fica muito mais intensa e visível a diferença das condições de operação do motor.

Uma vez que detecta-se que as transformadas dos sinais foram alterados, neste momento exige-se a intervenção de um técnico que fará a comparação das ondas, e determinará a manutenção ou substituição do rolamento analisado.

Desta forma fica fácil ver, pela diferença do valor das amplitudes das frequências dos sinais, que houve alteração significativa no ponto medido, evidenciado pelas curvas dos sinais medidos.

Outro aspecto importante na avaliação de um determinado componente é o acompanhamento histórico da evolução do desvio do sinal medido pelo sinal avaliado. Com o acompanhamento do sinal vê-se que, num determinado momento o elemento monitorado começa a apresentar níveis da variável medida acima dos limites, conforme ilustrado na Figura 15. É importante observar que a aplicação da tecnologia *Fuzzy*, não apenas o nível do sinal de vibração será avaliado mas o conjunto de fatores como vê-se adiante.

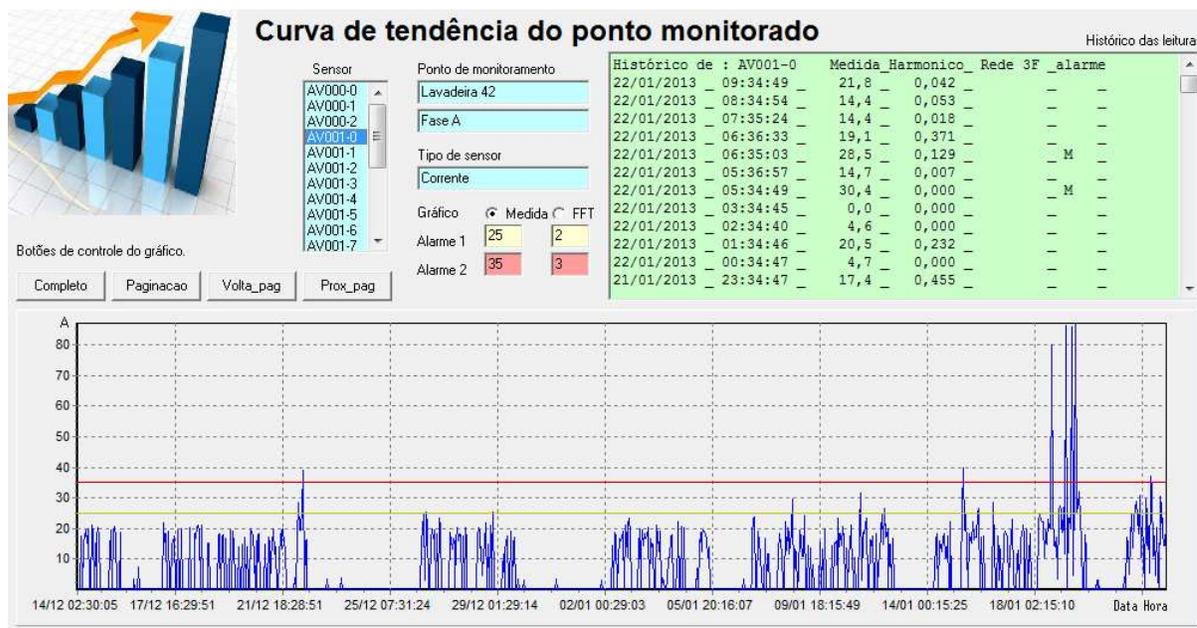


Figura 15 - Histórico de medidas do sinal de corrente e níveis de alarmes.

4.4 Fuzificação e defuzzyficação

Como a proposta deste trabalho é apresentar um sistema inteligente para manutenção preditiva, com o conhecimento do processo a ser modelado, pude-se escolher as variáveis que representam as informações necessárias para a implementação do trabalho. Com base neste estudo foram determinadas as variáveis de entrada: tensão elétrica e corrente elétrica de cada fase, desequilíbrio da tensão e das corrente de alimentação, temperatura e vibração do elemento em estudo.

Com exceção ao desequilíbrio das tensões e correntes de fase e da temperatura, os sinais de Tensão elétrica, Corrente e Vibração têm além da intensidade a análise da respectiva transformada de Fourier (sinal no domínio da frequência) avaliado.

As funções de pertinência das variáveis de entrada e as partições dos universos em discurso em termos linguísticos foram determinados utilizando o processo intuitivo, doravante para as variáveis temos os seguintes termos linguísticos:

a) Tensão elétrica: Baixa, Nominal, Alta e Muito Alta. O termo baixa representa subtensão na alimentação do motor o que se traduz na submagnetização do mesmo dada pela relação V/f da alimentação do motor, resultando em perda de torque do motor, condição não desejada. O termo nominal refere-se à condição de trabalho desejada para o motor. Alta tensão resulta na sobremagnetização do mesmo resultando no aumento de perdas por aquecimento e Muito alta resulta em maiores perdas e sobreaquecimento do motor podendo ocasionar danos ao mesmo, vide Tabela 10.

Tabela 10 - Termos linguísticos: Tensão elétrica.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Tensão Elétrica (Fase A, B,C)	V1	1	Baixa
	V2	0	Nominal
	V3	1	Alta
	V4	2	Muito Alta

b) Corrente elétrica : Nominal, Sobrecorrente e Crítica; sendo que o termo nominal indica que o motor está trabalhando dentro dos parâmetros esperados e especificados, o termo sobrecorrente denota que está havendo um esforço acima do esperado para o motor e, nesta faixa, tem-se o comprometimento de sua vida útil, o termo crítico denota que há excesso de corrente no mesmo, excetuando-se o momento de partida, o motor está prestes a entrar em colapso ou queima devido ao efeito joule sobre suas bobinas. Novamente evita-se o termo alto para potencializar ao usuário a importância de se observar eventual sobrecorrente no motor, vide Tabela 11.

Tabela 11 - Termos linguísticos: Corrente elétrica.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Corrente elétrica (Fase A, B,C)	I1	0	Nominal
	I2	1	Sobrecorrente
	I3	2	Crítica

c) Harmônicos da tensão e corrente elétrica: Normal, Ruído e Distorcido, sendo que o termo Normal, refere-se à forma de onda senoidal em 60 Hz, sem nível de ruído perceptível, o termo Ruído refere-se à uma fonte de tensão/corrente onde observa-se algum nível de interferência de baixa intensidade que não descaracteriza a forma senoidal do sinal, o termo Distorcido refere-se à forma de onda com elevado nível de ruído onde pode-se distinguir, na FFT, a presença de harmônicos de elevada intensidade, como no caso de motores com rompimento de gaiola, vide Tabela 12.

Tabela 12 - Termos linguísticos: Harmônicos de tensão e corrente.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Harmônico de V e I	Harm.1	0	Normal
	Harm.2	1	Ruído
	Harm.3	2	Distorcido

d) Vibração X, Y e Z: Nominal, Desbalanceamento, Excessivo, onde o termo Nominal não denota a ausência de vibração mas a condição de operação do elemento em estudo onde a vibração esteja nas condições nominais de trabalho; o termo Desbalanceamento denota que houve uma alteração do padrão de vibração anteriormente estabelecido como “normal”, como por exemplo deslocamento de massa de algum eixo, desbalanceamento da carga, interferência em mancais, etc. Por Excessivo credita-se à alteração do padrão de vibração da máquina onde a intensidade e/ou a presença de novas frequências de vibração resultem na alteração significativa de sua amplitude e/ou amplitude de harmônicos e novas frequências não presentes anteriormente, resultantes de quebra de elementos rolantes e/ou desbalanceamentos mecânicos da máquina, vide Tabela 13.

Tabela 13 - Energia de vibração X, Y ou Z.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Vibração X, Y, Z	Vib. 1	0	Nominal
	Vib. 2	1	Desbalanceamento
	Vib. 3	2	Excessivo

e) Harmônicos de vibrações: Característica, Ruidosa e Crítica, onde o termo Característica se refere à condição nominal de trabalho esperada para a máquina/elemento em estudo. Ruidosa refere-se à condição onde observa-se a presença de harmônicos de frequências não desejadas que indica desbalanceamento e/ou comprometimento estrutural dos elementos mecânicos, tais como pistas, e gaiolas em rolamentos. Crítica denota-se que a intensidade destes harmônicos são significativa e comprometem a integridade dos elementos em testes, vide

Tabela 14.

Tabela 14 - Harmônicos de vibração X, Y ou Z.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Harmônico de vibração X, Y, Z	Harm.Vib. 1	0	Característica
	Harm.Vib. 2	1	Ruidosa
	Harm.Vib. 3	2	Crítica

f) Temperatura: Nominal, Quente e Sobreaquecido. O termo nominal ilustra a medida da temperatura da máquina quando em uso onde se espera um aquecimento mas dentro dos parâmetros operacionais e esperados para o mesmo, o termo Quente é indicado quando a temperatura do elemento medido está acima do parâmetro especificado pelo fabricante como operacional mas que não impede a operação imediata do elemento, embora haja comprometimento de sua vida útil e Sobreaquecido indica que a temperatura está demasiadamente elevada e compromete a integridade do elemento em estudo podendo sua falha ser eminente. Os níveis de valores de cada elemento (motor, redutor, mancal, etc.) em estudo são configurados de acordo com os dados do fabricante, vide Tabela 15.

Tabela 15 - Temperatura de operação.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Temperatura	Temp. 1	0	Nominal
	Temp. 2	1	Quente
	Temp. 3	2	Sobreaquecido

g) Equilíbrio entre tensões e correntes: Equilibrado, Desequilibrado, Comprometido, o termo Equilibrado refere-se à uma alimentação trifásica com diferença entre as tensões inferior à 3% para tensão e 10% para corrente, Desequilibrado é o termo em que tem-se uma diferença entre 3 e 5% para tensões ou 10 a 20% para correntes e Comprometido é a situação onde a diferença entre as tensões seja superior à 5% e corrente superior à 20%, que denota falha do sistema de alimentação elétrico do motor, seja do elemento de chaveamento (contatores, relês térmicos, soft-starter, etc.) da alimentação da rede ou ainda a falta de uma fase de alimentação, pois pode-se estar numa condição de queima do motor, vide Tabela 16.

Tabela 16 - Equilíbrio entre tensões e correntes.

Variável de entrada	Variável Cartesiano Y	Peso associado W	Termo linguístico
Equilíbrio entre tensões e correntes	Equil.1	0	Equilibrado
	Equil.2	1	Desequilibrado
	Equil.3	2	Comprometido

Na sequência da elaboração do controlador *Fuzzy* tem-se a representação do conhecimento dos termos e a elaboração de uma base de regras utilizada pelo sistema de inferência.

O valor de cada termo se situa entre 0 e 1 conforme a situação da variável estudada, sendo que é possível que seja diferente de 0 (zero) para mais de um termo, como por exemplo o termo temperatura se situar na intersecção dos termos nominal e quente, neste caso pode-se ter 70% (0,7) nominal e 30% (0,3) quente, mas a soma dos estados possíveis não deve ser superior a 100% (1,0).

A interface de *defuzzyficação* gera a variável de saída à partir de um conjunto de regras de controle derivadas das operações de inferência. As regras de avaliação e as respectivas ações decorrentes são determinadas a partir de conjuntos nebulosos de entrada considerando a representação a cada termo linguístico de entrada de um peso (0, 1 ou 2).

Como variável de saída tem-se os níveis linguísticos: Ok, Alerta Atenção, Grave e Quebra, onde o termo Ok, denota que o equipamento está dentro dos parâmetros nominais de funcionamento e ainda que não existem influências externas que comprometam sua integridade, como por exemplo operação com falta de fase elétrica.

O termo Alerta denota que existem anomalias no sistema e que embora não comprometam sua operação podem evoluir para uma situação de dano ou inoperabilidade da máquina.

Por Atenção define-se que existem condições em que a integridade de operação da máquina esteja comprometida e uma intervenção de manutenção é necessária, pois existe possibilidade de degradação da máquina, como por exemplo, alta temperatura do motor associada à alta corrente de alimentação.

O termo Grave denota que existe comprometimento do equipamento, embora o mesmo esteja à funcionar, como por exemplo um desbalanceamento de tensão de alimentação mas não a falta de uma fase, tal sinal requer a parada do equipamento para manutenção e/ou inspeção da causa do alerta e Quebra é o termo que designa falha iminente do equipamento, seja por grande desequilíbrio de tensão, aquecimento intenso de motor ou mancal, grande vibração devido à quebra de estrutura e/ou suporte, etc.

Uma vez feita a combinação das variáveis de entrada, vide apêndice 2, e a definição das variáveis de saída tem-se a elaboração das tabelas das regras propostas, que totalizaram 141. A quantidade de regras propostas considerou a interação de duas variáveis. Se considerarmos a interação de mais variáveis entre si, a quantidade de regras possíveis aumentará.

4.4.1. Grandezas mensuradas para motor elétrico

Para motores, onde se mede corrente, temperatura e harmônicos da alimentação, tem-se três níveis de alerta, vide Tabela 17:

a) Ok – Motor está dentro das condições nominais de trabalho.

b) Alerta – O motor apresenta alguma anomalia em qualquer dos itens monitorados, requer cuidado e monitoramento do parâmetro que gerou o alerta, a urgência da intervenção deve ser avaliada de acordo com o tipo de anomalia, repetibilidade e tempo que vem ocorrendo.

c) Perigo – Nesta situação tem-se condições adversas no funcionamento do motor podendo ocasionar falha eminente do mesmo, seja, por exemplo, falta de fase da rede ou aquecimento excessivo.

Tabela 17 – Níveis de alerta para motor.

Motor	Ok	Alerta	Perigo
-------	----	--------	--------

Avaliação do grau de interação entre desequilíbrio entre as fases e temperatura, Tabela 18

Tabela 18 – Interação temperatura x Desequilíbrio entre as fases.

		Desequilíbrio entre as fases		
		Baixa	Nominal	Crítica
Temperatura	Ambiente	Ok	Ok	Alerta
	Nominal	Ok	Ok	Perigo
	Alerta	Alerta	Alerta	Perigo
	Sobreaquecimento	Perigo	Perigo	Perigo

Avaliação do grau de interação entre harmônicos na corrente e temperatura, vide Tabela 19.

Tabela 19 – Interação temperatura x Harmônico na corrente.

		Harmônico na corrente		
		Nominal	Atenção	Interferência
Temperatura	Ambiente	Ok	Alerta	Perigo
	Nominal	Ok	Alerta	Perigo
	Alerta	Alerta	Perigo	Perigo
	Sobreaquecimento	Perigo	Perigo	Perigo

Avaliação do grau de interação entre harmônicos na corrente e valor RMS da corrente, vide Tabela 20.

Tabela 20 – Interação harmônico na corrente x Valor RMS da corrente.

		Harmônico		
		Nominal	Atenção	Interferência
Corrente	Baixa	Ok	Alerta	Perigo
	Nominal	Ok	Alerta	Perigo
	Crítica	Perigo	Perigo	Perigo

4.4.2. Grandezas mensuradas para redutor e mancal

Semelhantemente para elementos mecânicos (redutores e mancais) onde se mede temperatura e vibração mecânica, tem-se três níveis de alerta, vide Tabela 21.

a) Ok – O redutor/ mancal está dentro das condições nominais de trabalho.

b) Alerta – O redutor/mancal apresenta alguma anomalia em qualquer dos itens monitorados, e requer cuidado e monitoramento do parâmetro que gerou o alerta, a urgência da intervenção deve ser avaliada de acordo com o tipo de anomalia, repetibilidade e tempo que vem ocorrendo.

c) Perigo – Nesta situação tem-se condições adversas no funcionamento do redutor/mancal podendo ocasionar falha eminente do mesmo, seja, por exemplo, aquecimento excessivo que induz à falta de lubrificação ou excesso de vibração que pode indicar quebra de algum elemento mecânico de suporte.

Tabela 21 – Níveis de alerta para motor.

Redutor	Ok	Alerta	Perigo
---------	----	--------	--------

Avaliação do grau de interação entre harmônicos de vibração e temperatura do redutor/mancal, vide Tabela 22.

Tabela 22 – Interação harmônico de vibração x Temperatura.

		Harmônico		
		Nominal	Atenção	Interferência
Temperatura	Ambiente	ok	Alerta	Perigo
	Nominal	ok	Alerta	Perigo
	Alerta	Alerta	Alerta	Perigo
	Sobreaquecimento	Perigo	Perigo	Perigo

Capítulo 5

Topologia do sistema

O sistema automatizado de coleta de dados é composto por cinco partes:

a) Sensor de vibração:

Transdutor composto por acelerômetros que transformarão as vibrações mecânicas do motor, rolamento ou elemento a ser monitorado em tensão elétrica, proporcional à aceleração sofrida pelo elemento em estudo.

b) Sensor de corrente:

Um transformador de corrente, ligado à alimentação elétrica do motor a ser monitorado, que gerará um sinal proporcional à corrente de cada fase do motor para que, seja através do histórico ou da leitura momentânea da corrente, haja a detecção de eventual anomalia no motor pelo desbalanceamento das fases do mesmo ou a variação de amplitude fora dos parâmetros estabelecidos.

c) Sensor de temperatura:

Composto por dispositivos semicondutores onde monitora-se a tensão de junção PN e seu comportamento em função da temperatura estabelecendo-se uma equação do tipo tensão x temperatura.

d) Unidade eletrônica de medição:

Trata-se de uma placa com microcontrolador onde tem-se a alimentação dos sensores e adequação dos sinais lidos.

e) Microcomputador e *software* de análise dos dados:

Este componente é responsável pelo gerenciamento dos módulos eletrônicos de medição e armazenamento dos padrões de leitura a serem comparados bem como do histórico das leituras para análise do comportamento dos elementos em estudo.

5.1 Sensor de vibração

Trata-se do transdutor desenvolvido para conversão dos sinais mecânicos de vibração em sinais analógicos para análise.

Inicialmente foi-se cogitada e experimentado a utilização de sensores piezoelétricos para coleta dos sinais em questão, principalmente por serem utilizados na indústria de análise de vibração, tais como SKF CM552110/3 (Figura 16), ou similares. Entretanto sua utilização foi descartada, por que além de necessitar de circuito eletrônico para amplificação, condicionamento de sinal e adequação para o microcontrolador, aliado ao fato do mesmo fazer a leitura do sinal apenas no sentido longitudinal do eixo do sensor, sendo necessário três sensores para uma leitura dos eixos x, y e z do mancal em estudo.

Optou-se pelo uso de um dispositivo mais versátil; um acelerômetro eletrônico (CI-MMA7260Q), de dimensões reduzidas, fácil tratamento do sinal pois gera um sinal de tensão de boa amplitude para o microcontrolador, aliado ao baixo custo e que possibilitou a sua montagem num suporte fácil de ser fixado em praticamente qualquer mancal ou superfície a ser analisada sem comprometimento de funcionalidade e/ou segurança ao motor ou máquina onde o mesmo será instalado.

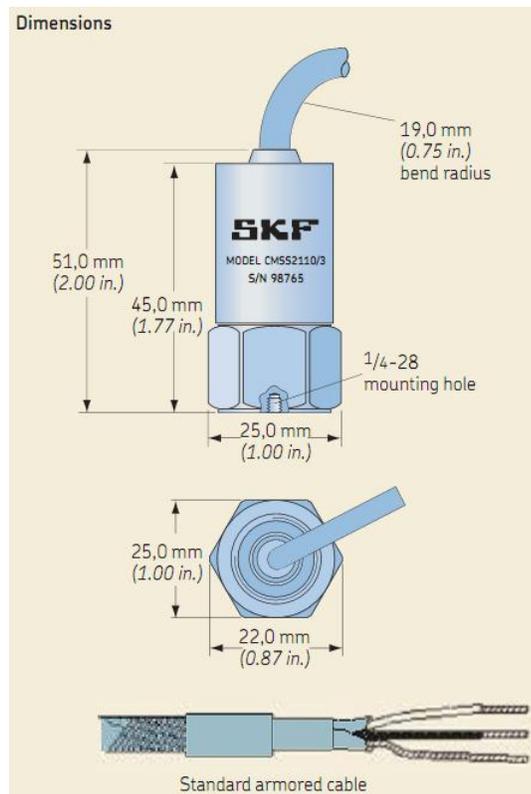


Figura 16 – Sensor piezoelétrico de vibração.

Conforme especificação técnica do fabricante, para este sensor conta-se com uma saída analógica de 10 a 90 % de Vdd (3,6 volts) para os limites de g aplicados ao sensor, sendo possível determinar sua sensibilidade de trabalho de 1 a 6 g's positivos ou negativos.

Sua conexão com o circuito do microcontrolador é bem simples, dispensando condicionamento especial do sinal do sensor ao processador.

5.2 Montagem do sensor 3D utilizado

Conforme vê-se na Figura 17, medindo apenas 6 x 6 mm, o sensor é suficientemente pequeno para sua montagem em um recipiente estanque e protegido e intempéries a ser fixado junto ao elemento mecânico (mancal, estrutura, etc.) a ser monitorado.

A montagem do sensor foi feita fixando-o num conector de aço que serviu de suporte mecânico à placa do acelerômetro e que seria colado à estrutura (mancal) do motor a ser monitorado, bem como proteção do circuito de intempéries em ambiente industrial, na Figura 18 vê-se uma foto do sensor montado neste encapsulamento; na Figura 19 a foto da placa eletrônica

do sensor e na Figura 20 um esquema de montagem no motor que mostra o sentido utilizado para direcionamento dos eixos X, Y e Z.

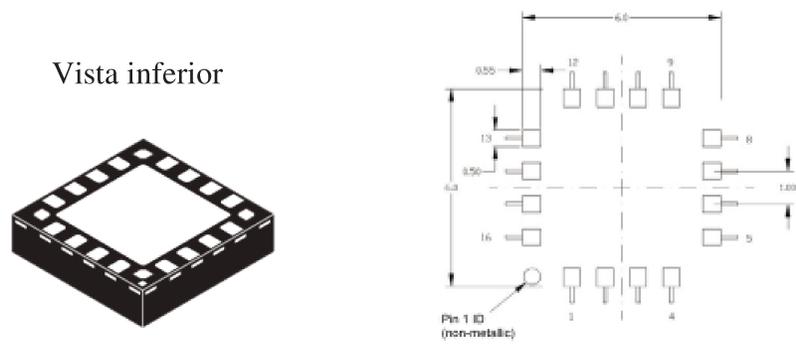


Figura 17 – Dimensões mecânicas do acelerômetro.



Figura 18 – Fotografia do sensor de vibração.

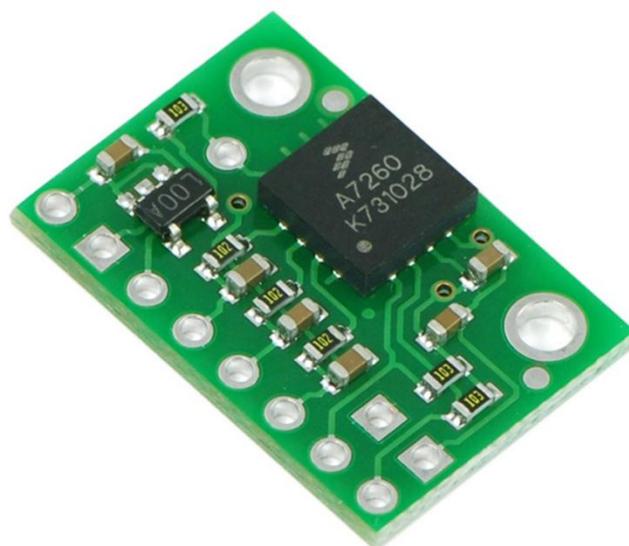


Figura 19 – Placa eletrônica com sensor de vibração.

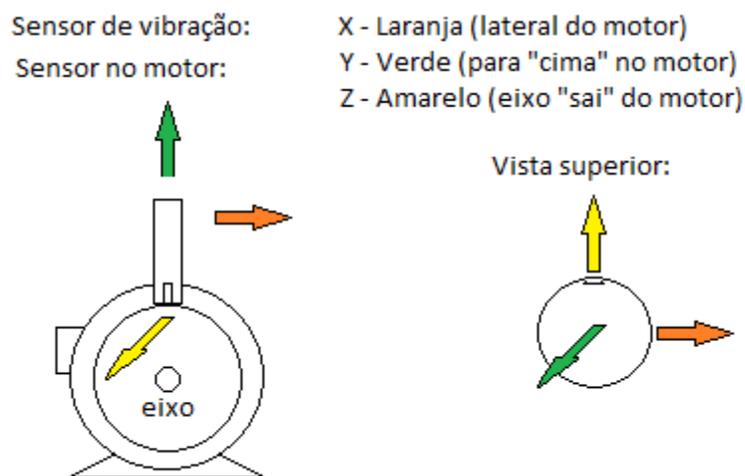


Figura 20 – Orientação dos eixos X, Y e Z na instalação de um mancal de motor.

O esquema de ligação do sensor seguiu a própria recomendação do fabricante, conforme ilustrada na Figura 21.

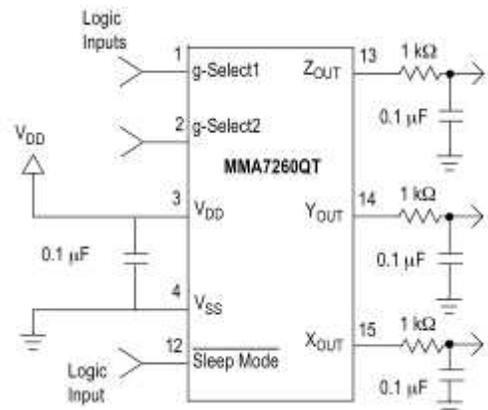


Figura 21 – Esquema de ligação do acelerômetro.

O esquema para o acelerômetro tri-axial utilizado neste trabalho é mostrado na Figura 22, este dispositivo pode ser alimentado diretamente através do pino Vcc/3,3 V usando uma fonte que esteja dentro da faixa de tolerância do CI de 2,2 a 3,6 V. De modo alternativo, a placa pode ser alimentada por tensões mais elevadas, até 16V, utilizando o pino VIN que é conectado a um regulador de 3,3 V. Nesta configuração o pino Vcc/3,3 V pode servir como uma saída de referência de tensão ou como fonte de alimentação para outros dispositivos (até 50 mA, dependendo da tensão da alimentação).

Os pinos de seleção de sensibilidade GS1 e GS2 são elevados à linha de VCC, fazendo com que a sensibilidade padrão seja 6 g.

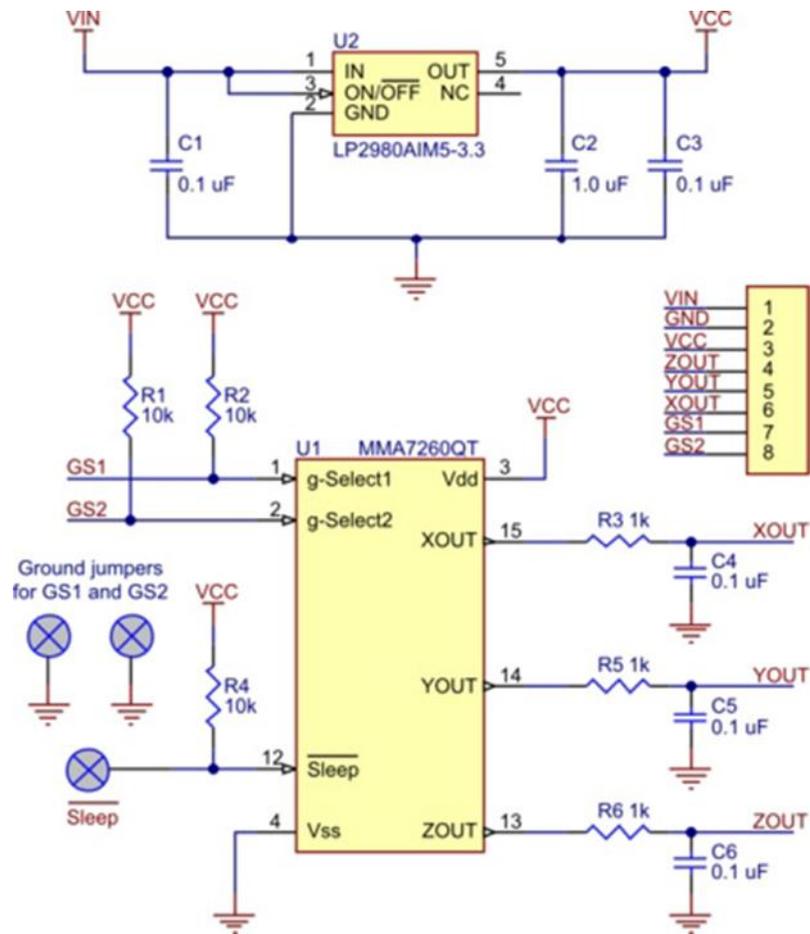


Figura 22 – Esquema de ligação da placa do acelerômetro.

5.3 Amplitude do sinal do transdutor

Conforme especificação do fabricante do sensor, para uma alimentação de 3,5 volts, tem-se uma variação do sinal de 0,335 a 3,15 volts (10 a 90% de V_{ss}), sendo que o centro da medição, seja de 1,75 volts ($V_{ss}/2$). Portanto teremos uma variação da amplitude do sinal de 2,815 volts.

A leitura dos sinais medidos pelos sensores foram feitas com um microcontrolador ATMEGA32 da ATMEL cuja entrada analógica, de 10 bits provê uma resolução melhor que 1/1000 (1/1024) para a faixa de 0 a 5 volts (0 a 1023).

Considerando a variação prevista de 2,815 volts, descrita acima, tem-se uma variação de leitura do conversor AD de 580 passos de variação máxima do sinal. Ou seja, a resolução das leituras serão de 0,17% (1/580), satisfatória para nossa aplicação proposta.

5.4 Sensor de corrente e tensão

Aproveitando da técnica desenvolvida por Moraes [37], para a medida de corrente elétrica do motor foi utilizada uma garra tipo *clamp* de corrente, que, sem interrupção do circuito, “abraça” o cabo de alimentação do motor e provê um sinal correspondente à corrente que passa pelo cabo de alimentação da referida fase do motor.

A garra atende a norma internacional IEC 60044-1 e possui as seguintes características que são relevantes no projeto do módulo medidor: baixo custo, dimensões reduzidas, grande segurança no momento da instalação e erro de linearidade bastante reduzido, na ordem de 0,2%, como mostra a Figura 23.

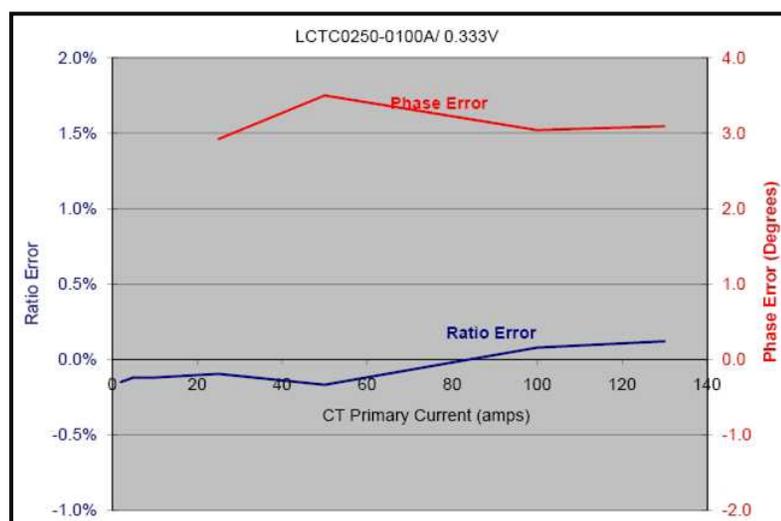


Figura 23 – Erro de linearidade da garra amperimétrica.

Conforme descrito no trabalho de Moraes [37] a garra, Figura 24, tem uma relação de 10000:5, ou seja para cada 100 A de corrente no primário tem-se uma corrente de 50 mA no secundário, ao colocarmos um resistor de 50 Ohm na saída do TC resulta uma tensão de 5,0 volts pico a pico sobre o mesmo, ao ligar no conversor AD do microcontrolador, o valor máximo do conversor analógico-digital (1023).



Figura 24 - Garra para medição de corrente.

Como o microcontrolador utilizado não efetua medições com valores negativos, foi implementado, nos circuitos de tensão e corrente, um circuito adicional com amplificador operacional (LM358) para elevação do sinal em 2,5 volts a fim de que as medidas efetuadas tivessem um “off-set” de $V_{cc}/2$, desta forma, um sinal medido poderá ter excursão negativa de 2,5 volts.

Na Figura 25, tem-se o circuito eletrônico do referido amplificador operacional e suas entradas de sinais de corrente e tensão providos dos respectivos TC's e TP's.

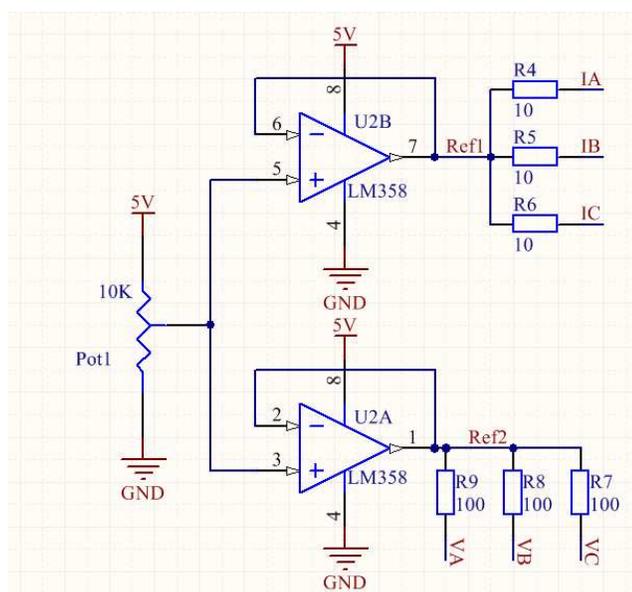


Figura 25 – Esquema de ligação do sensor de corrente (IA,IB,IC) e tensão (VA,VB,VC).

5.5 Sensor de temperatura

Para a medida da temperatura dos elementos a serem analisados, optou-se por utilizar o CI LM35, que é um sensor de temperatura de precisão cuja saída da tensão é linearmente proporcional à temperatura, com uma conveniente saída “escalada” em graus centígrados, seguem suas principais características:

- Saída linear de $+ 10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$
- Precisão garantida de $0,5^\circ\text{C}$ (em 25°C)
- Alcance de trabalho de -60 a 150°C (invólucro $T_0 = 0-92$)
- Operação com tensões de 4 a 30 volts
- Não linearidade típica de $0,25^\circ\text{C}$

Na Figura 26, vê-se o esquema típico de ligação do referido sensor.

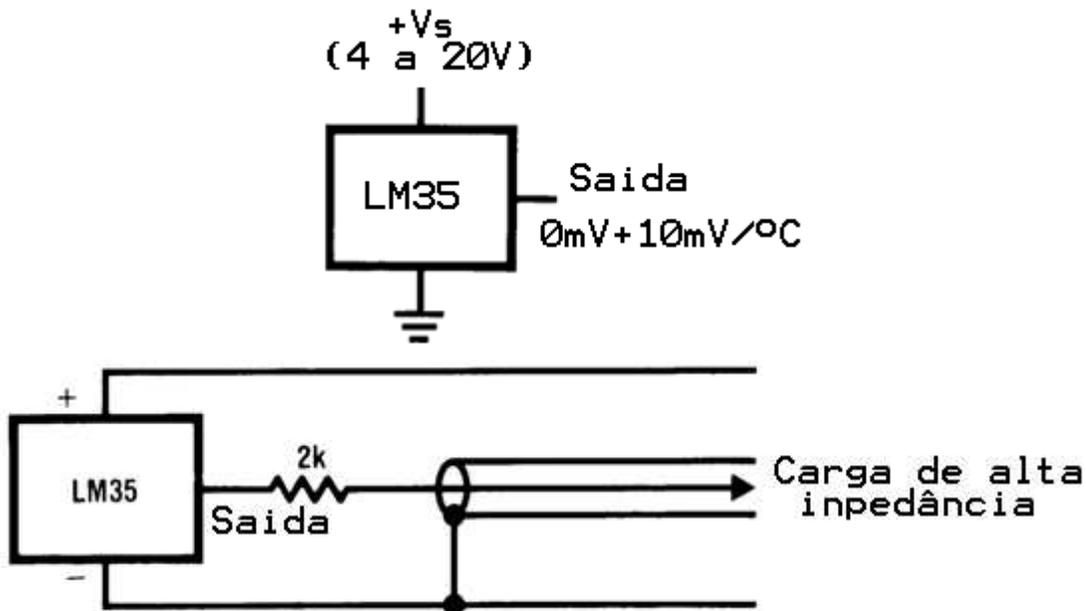


Figura 26 – Circuitos típicos do sensor de temperatura.

A não linearidade do transdutor, mesmo que somado o erro de precisão de $0,5^\circ\text{C}$ dado pelo fabricante, se apresenta satisfatório para a aplicação e suficiente preciso para acompanhamento da temperatura de um motor, ou mancal monitorado.

5.6 Sistema microcontrolado de leitura de dados

As leituras dos sensores de vibração (eixo X, Y e Z) e sensores de corrente (fases A, B e C) são feitas por um circuito microcontrolado baseado no microcontrolador ATMEGA32 da ATMEL, cujo diagrama em blocos está apresentado na figura 42.

O microcontrolador ATMEGA32 tem 8 entradas de conversor AD (A0 a A7) de 10 bits, sendo que A0, A1 e A2 serão utilizadas para leitura das correntes das fases do motor e A3, A4 e A5 para a leitura dos eixos do acelerômetro.

5.6.1. Circuito eletrônico de coleta de dados

O diagrama das entradas de medições dos sinais, através do ATMEGA32 pode ser visto na Figura 27 e sua placa montada na Figura 28, é composto pelas seguintes partes:

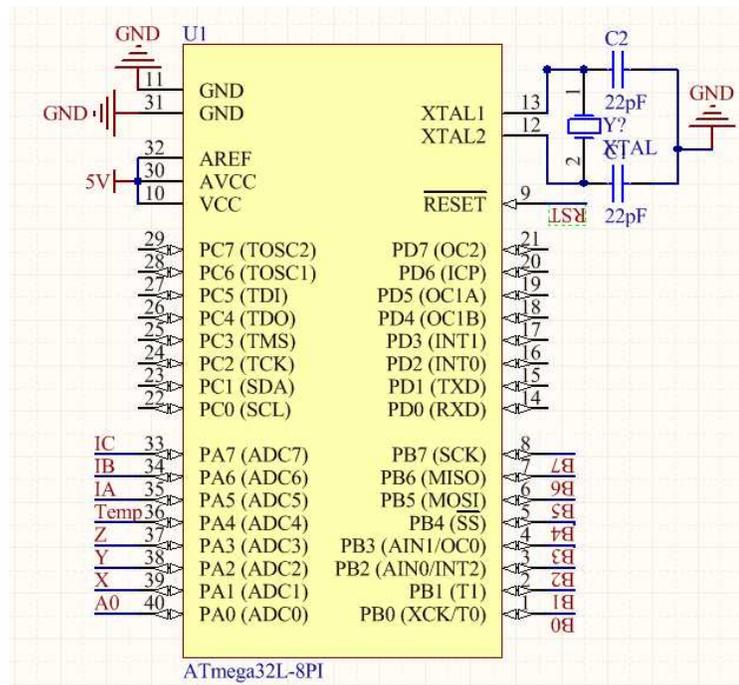


Figura 27 – Esquema eletrônico de entradas do ATMEGA32.

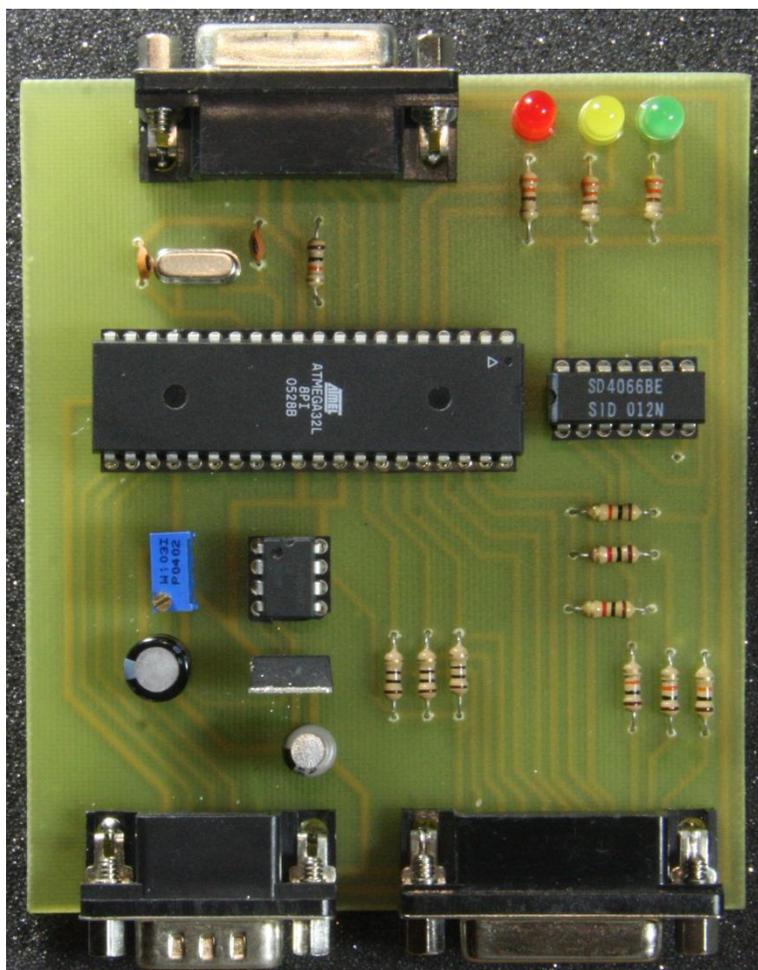


Figura 28 – Foto da placa montada.

a) Estabilizador de tensão:

Composto pelo CI7805 que é um regulador de tensão integrado com entrada de tensão de 7 a 35 volts e saída de 5 volts e corrente de até 1 amper, suficiente para alimentação do microcontrolador e sensores que venham a ser instalados no dispositivo, Figura 29.

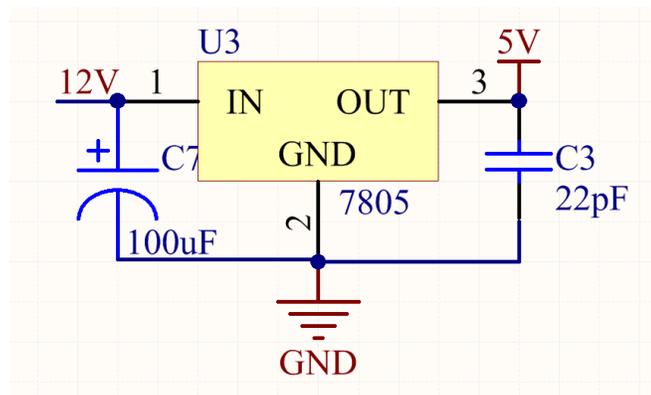


Figura 29 – Regulador de tensão.

b) Indicadores de estado de funcionamento do *firmware*/hardware

Composto de três LED's (verde amarelo e vermelho), Figura 30, que servem para que o operador/instalador do sistema possa visualizar se o mesmo está devidamente energizado (LED verde), comunicando (LED amarelo) ou em situação de programação/*stand-by* (LED vermelho).

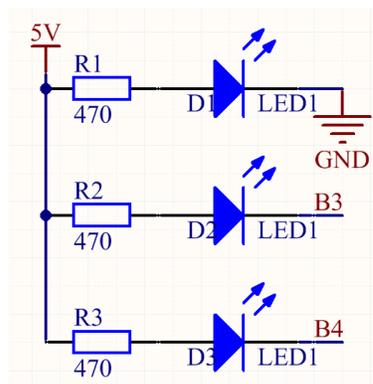


Figura 30 – Indicadores de funcionamento.

c) Circuito multiplexador do sinal de entrada (Conexão dos sensores de tensão).

No sistema apresentado tem-se um total de 10 grandezas medidas, vibração X, Y, Z, temperatura, Corrente fase R, S, T e tensões das fases R, S e T. Todavia o microcontrolador utilizado possui somente 8 entradas analógicas disponíveis (multiplexadas internamente). Para resolver este problema utiliza-se um circuito de multiplexação adicional composto de uma chave eletrônica (CI LM4066), onde, através das saídas digitais do ATMEGA32 pode-se selecionar qual entrada de tensão será direcionada para a entrada A0 do conversor AD, desta forma ampliamos a possibilidade de coleta de 8 para 11, sendo que utilizamos $\frac{3}{4}$ das chaves do referido CI, Figura 31.

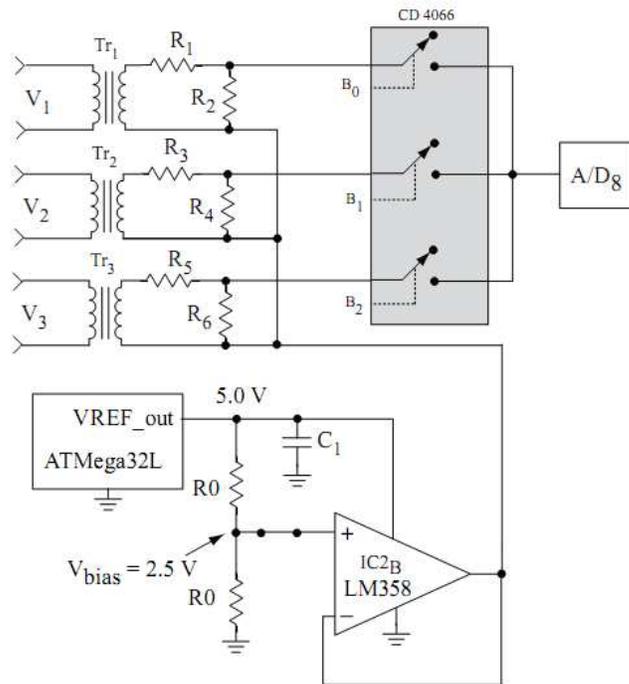


Figura 31 – Multiplexador de entradas de tensão.

d) Entrada de comunicação (Conector de comunicação)

Para prover a comunicação entre o dispositivo e o microcomputador, tem-se um conector, Figura 32, que dá acesso à UART do microcontrolador cujos parâmetros de comunicação, velocidade, tamanho de palavra, paridade, etc. são programados pelo *firmware* do dispositivo. Adicionalmente tem-se mais algumas linhas de controle para interfaceamento com outros dispositivos de comunicação, tais como conversores RS232-RS485, RS232-Ethernet, RS232-Rádio, etc.

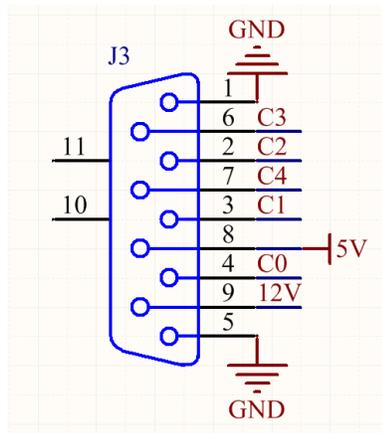


Figura 32 – Conector de comunicação.

e) Entrada para programador de *firmware* (Conector de programação)

Esta entrada foi disponibilizada para poder se efetuar a conexão do circuito com um programador para programação do microcontrolador sem que haja a necessidade de sua retirada da placa o que facilita para execução testes e atualização/alteração do *firmware* do dispositivo de forma mais prática e eficiente, Figura 33.

Neste conector tem-se os sinais necessários à programação do microcontrolador:

- 5 V: Alimentação
- RST: Sinal de reset do processador
- GND: Terra do circuito de gravação
- B5: MOSI, *Master Out, Slave In*
- B6: MISO, *Master In, Slave Out*
- B7: SCK, *Serial Data Clock*

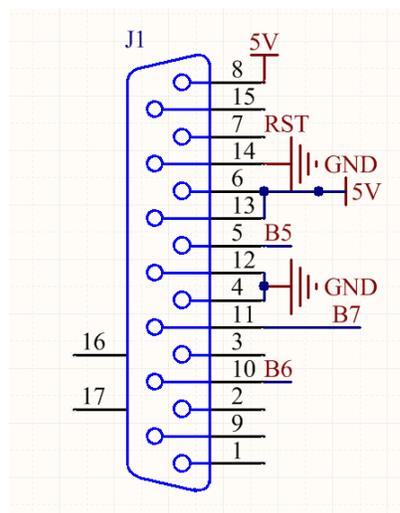


Figura 33 – Conector para programação “*in-circuit*” do *firmware*.

f) Entradas de sinais (Conector de entradas)

Este terceiro conector do circuito, provê os sinais analógicos de entradas das grandezas a serem monitoradas pelo circuito eletrônico, Figura 34.

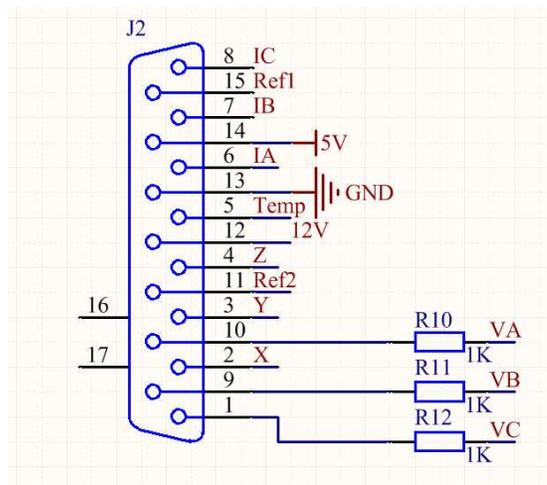


Figura 34 – Conector dos sinais analógicos de vibração, temperatura, corrente e tensão.

g) Diagrama de conexões com microcontrolador ATMEGA32

O microcontrolador utilizado é muito versátil o que simplifica o projeto e execução do circuito, que, como visto, foi implementado com poucos componentes adicionais, o que torna o sistema bem robusto à falhas, pelo baixo número de componentes.

Uma visão geral de todo o circuito é mostrado na Figura 35.

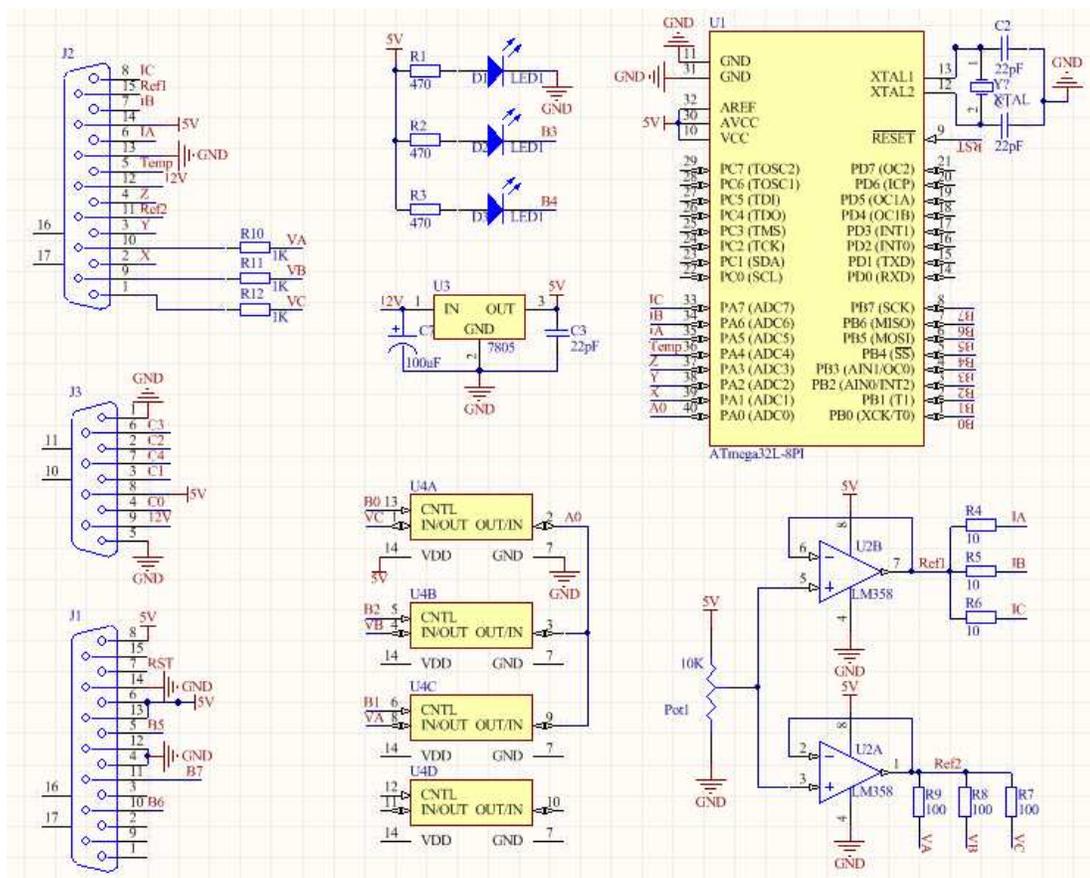


Figura 35 – Circuito completo do sistema.

5.7 Estação de análise de dados

Para proceder com o armazenamento e tratamento dos sinais medidos, faz-se necessário além de poder de processamento para cálculo complexo (FFT) grande quantidade de memória para o armazenamento de dados dos históricos das medidas e padrões gravados para comparação da evolução das medidas de vibração dos rolamentos.

Utilizou-se um microcomputador como estação de análise e armazenamento dos dados, por atender às necessidades apresentadas acima.

Para tanto, faz-se a implementação de uma rede RS485 de comunicação entre o microcomputador e o dispositivo de coleta de dados.

Uma vez que o microcomputador faz a interrogação ao dispositivo, o mesmo determina qual canal do conversor analógico/digital do sinal, ou seja qual sensor será utilizado, a

capacidade de realizar uma leitura, faz-se a FFT do sinal e sua comparação com um padrão pré-estabelecido, carregado da memória do microcomputador.

Operando a leitura através do microcomputador, tem-se a vantagem de programá-lo à fazer as leituras a certos intervalos, Figura 36, sem a necessidade de intervenção de um operador.

Outra inovação deste trabalho está na implementação desta estação que faz a análise e acompanhamento dos sensores sem necessitar de intervenção humana, ou seja, uma vez programado os sensores e parâmetros a serem analisados, automaticamente tem-se as leituras, análise e criação do histórico evolutivo da condição dos sistemas monitorados, Figura 37.



Figura 36 - Tela de coleta de dados.

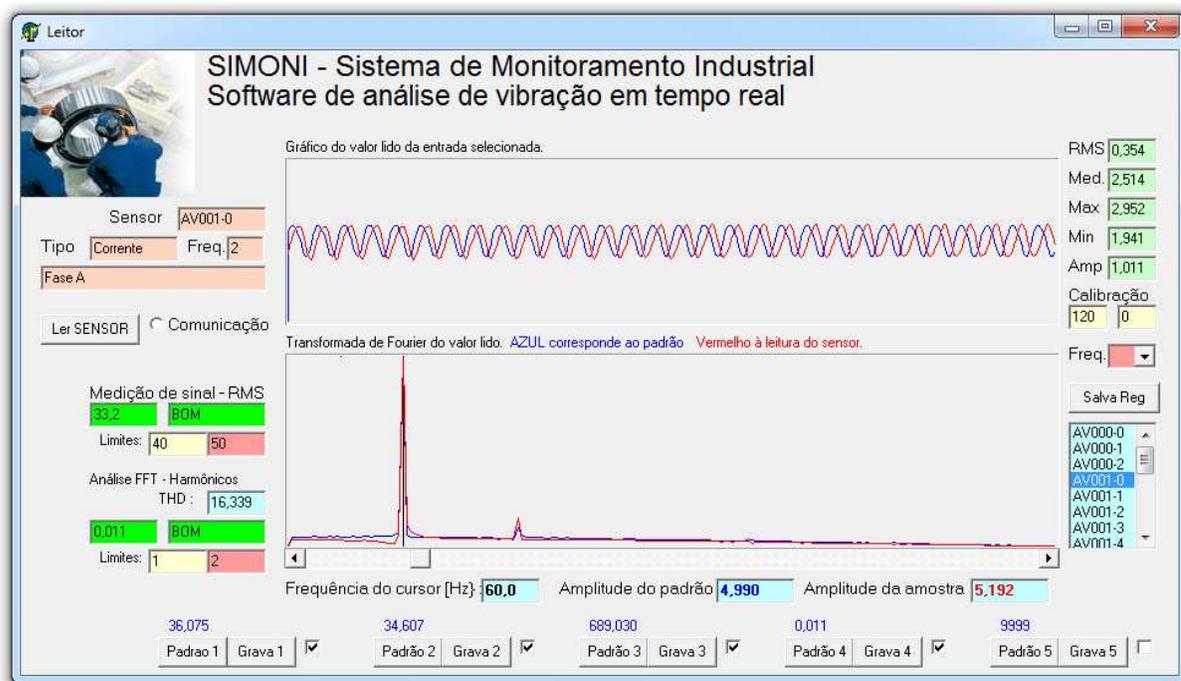


Figura 37 - Tela de leitura de sinal de corrente e respectiva FFT, que ilustra a forma do sinal e medidas dos valores RMS, média, máximo, mínimo e amplitude.

Capítulo 6

Implementação do programa de computador

Para a coleta de dados e gerenciamento das informações e medidas feitas, foi escrito um programa de computador microcomputador que faz a comunicação entre os dispositivos e o armazenamento em disco rígido dos históricos das medidas feitas.

As redes de comunicação industriais são utilizadas para que os dispositivos possam trocar informações entre si, tais como leituras de sensores e transmissão de comandos para dispositivos remotos e de monitoramento.

No caso deste trabalho, optou-se pela utilização de um protocolo simples de comunicação na topologia mestre-escravo entre o terminal de processamento e armazenamento (PC) e dispositivos de coleta de leituras dos sensores (“medidores”).

6.1 Protocolo implementado

Durante a comunicação em uma rede do tipo mestre-escravo, o protocolo determina como o dispositivo conhecerá seu endereço, como reconhecerá uma mensagem endereçada para ele, como determinar o tipo de ação a ser tomada e como extrair o dado ou outra informação qualquer contida na mensagem. Se uma resposta é necessária, como o dispositivo construirá uma mensagem e a enviará.

O Mestre pode endereçar mensagens para um escravo individual ou enviar mensagens para todos (broadcast). Os escravos retornam uma mensagem somente para as consultas endereçadas especificamente para ele. As mensagens broadcast não geram respostas.

Na mensagem de consulta, o código de função informa ao dispositivo escravo com o respectivo endereço, qual a ação a ser executada. Os bytes de dados contêm informações para o escravo, por exemplo, qual o registrador inicial e a quantidade de registros a serem lidos.

A mensagem de resposta, nesta aplicação, por trata-se de leitura dos dados dos sensores de vibração, o escravo a ser consultado enviará uma resposta padrão, com sua identificação e os dados lidos dos sensores a ele conectados.

Neste protocolo tem-se o seguinte conteúdo:

Mestre inicia a comunicação com um dispositivo;

a) Identifica o equipamento a ser interrogado: AV000 a AV999

b) Determina qual de leitura do sinal analógico ligado ao sensor de vibração (0 a 7) para o dispositivo interrogado.

Escravo selecionado retorna as leituras requisitadas pelo Mestre, no seguinte formato:

a) Identificação do dispositivo

b) Informação lida ou sequência de dados coletados

c) Identificação de final de envio de dados.

Após tal procedimento o *software* do mestre (microcomputador) fará o processamento do sinal colhido, sua apresentação e armazenamento para um arquivo de histórico de medidas para posterior consulta.

O *hardware* do módulo contém, além dos sinais Rx e Tx, várias entradas e saídas disponíveis para controle de conversores RS232-RS485, RS232-Ethernet, RS232-Rádio, etc. que facilita a criação de uma rede de comunicação entre o módulo de leitura e o microcomputador. Em nosso laboratório foi feita uma conexão direta do módulo com o microcomputador através de um cabo “*null-modem*” devido à proximidade entre os equipamentos.

6.2 Tratamento de falha na comunicação

Se após 5 segundos do envio da identificação do equipamento pelo mestre não houver resposta do dispositivo escravo correspondente, o *software* do micro identificará como erro e passará à leitura do próximo canal de leitura (entrada analógica/digital), neste momento é criada uma lista de sinais que não foram lidos ou apresentaram anomalias para nova leitura logo após o cumprimento de leituras das entradas analógica/digital programadas.

Por exemplo, se o sistema tem a sequência de leituras a ser feita nos seguintes canais: AV000-0, AV000-1, AV001-0, AV001-1 e AV001-2; e caso a leitura AV000-1 apresente algum valor de alarme ou não receba a leitura solicitada, o sistema coloca este canal numa segunda lista de leituras que será executada após a leitura do último canal da lista original.

Tal procedimento foi criado pois existia a possibilidades, de por exemplo, se fazer uma leitura de corrente no momento de partida de um motor, neste caso, o valor lido seria apresentado como sobrecorrente, devido à corrente de partida, dando uma falsa avaliação da condição do motor. Com este procedimento, há um intervalo de algumas dezenas de segundos entre uma leitura “errada” e sua repetição (confirmação).

6.3 Recebimento dos dados

A transmissão dos dados (medição da forma de onda do sensor) se dá na forma de uma sequência de valores lidos pelo conversor analógico/digital.

Uma vez que é feita a leitura do sinal, o microcontrolador extrai do sinal lido os seguintes parâmetros:

- Valor de pico
- Valor de pico a pico

- Valor médio
- Valor RMS do sinal
- Número de picos (derivadas positivas)
- Número de vales (derivadas negativas)
- Escala interna utilizada na divisão de tempo das amostras

Estes parâmetros, são calculados pelo microcontrolador para adequar a melhor forma de coleta do sinal, pois antes de coletar a amostra do sinal a ser enviada, faz-se uma primeira leitura para adequação da escala de tempo e amplitude para medição do sinal.

Alguns destes dados não terão relevância pois serão recalculados pelo *software* do microcomputador, uma vez que o envio do sinal lido pelo microcontrolador é, após este processamento interno, inteiramente transmitido ao microcomputador, que fará a sua reconstituição.

Com base no sinal recebido, tratado, ao recebê-lo o *software* do microcomputador iniciará a análise do mesmo.

6.4 Implementação de rede para vários módulos de leitura

Embora o sistema possa funcionar à partir de uma unidade de coleta, a estrutura de comunicação tipo mestre-escravo foi implementada, pois facilita a implementação de vários módulos de leitura ligados em uma rede RS485, ou rádio, sem a necessidade de reescrever as rotinas de identificação de módulos e gerenciamento de rede.

Doravante todas as grandezas medidas são identificadas de acordo com o módulo e sua “entrada analógica” correspondente nos módulos, conforme exemplo:

Módulo 0: AV000-0 a AV000-9, entradas 0 a 9 do módulo “0”.

Módulo 1: AV001-0 a AV001-9, entradas 0 a 9 do módulo “1”.

Módulo n: AV n -0 a AV n -9, entradas 0 a 9 do enésimo módulo.

A comunicação é gerenciada pelo microcomputador (mestre) que faz a solicitação de leitura de um canal simplesmente enviando o endereço do canal desejado, por exemplo, o valor

da tensão no primeiro canal do conversor analógico/digital do microcontrolador do módulo número 10, termos o envio “AV010-0” na rede pelo mestre.

Em resposta, o módulo 10 (AV010) enviaria a reposta do valor analógico lido no primeiro canal do conversor (0).

Para maior conveniência e praticidade de uso do sistema, no *software* do mestre, tem-se uma tabela de adequação das grandezas analógicas lidas e sua adequação às grandezas físicas correspondentes. Se no exemplo acima o sinal correspondesse à uma temperatura, no mestre conta-se com uma tabela de conversão do valor AD lido e o correspondente valor convertido em temperatura.

6.5 Detecção de desequilíbrio de corrente e tensão

Quando se inicia a operação do sistema para medida de corrente das fases de um motor, basicamente basta a verificação de uma anomalia ou discrepância das correntes entre as fases para se poder determinar que há alguma deficiência na parte elétrica do motor.

Para tanto simplesmente o acompanhamento das medidas das correntes e sua comparação simples fornece uma boa perspectiva da saúde das bobinas no motor; ou seja, se houver diferença superior a 5% nas correntes do motor deve-se inspecioná-lo para busca do porquê do desbalanceamento de correntes no mesmo; objetivando sua manutenção ou revisão da instalação elétrica do motor.

A rotina de determinação do valor do sinal medido foi implementada no *software* do microcomputador, onde após a coleta o programa extrai as seguintes informações do sinal, Figura 38, valor RMS, média, máximo, mínimo e amplitude, além da forma ilustrada do sinal lido no domínio do tempo e da frequência (FFT).

A ilustração da forma do sinal lido tem por finalidade facilitar sua verificação quando se conecta um osciloscópio na entrada do microcontrolador.

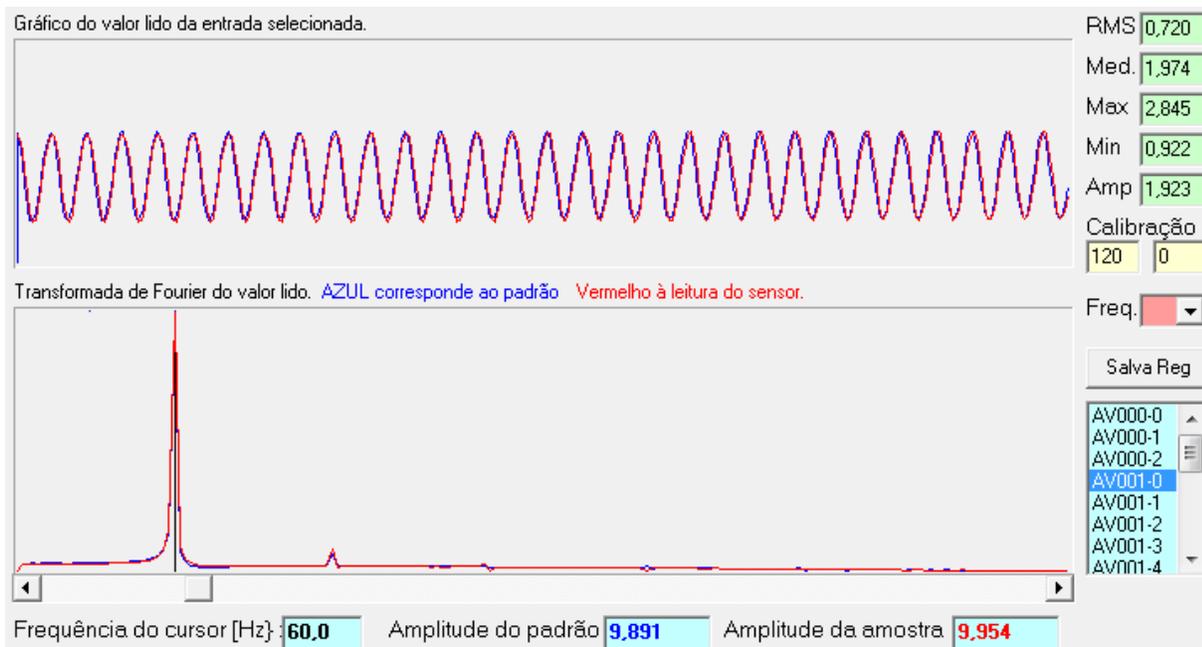


Figura 38 – Tela que ilustra as formas do sinal com valor RMS, média, máximo, mínimo, amplitude e formato da onda do sinal medido.

Deste sinal coletado faz-se a transformada rápida de Fourier para obter a frequência e eventuais harmônicas presentes.

Após a determinação do valor eficaz pode-se compará-lo com o valor medido pelo instrumento do painel da bomba e um alicate amperímetro ligado a cada fase.

Na aplicação em questão, foram feitas medições em bancada com geração de corrente de 30 amperes para comparação com as medições efetuadas pelo equipamento deste estudo, mostrados na Tabela 23.

Vê-se que o maior erro relativo foi de 1,27 % (diferença de 400 mA), que considera-se aceitável para os fins a que se destinam este monitoramento, que é a detecção de falha na bomba por falta de fase que leve à sua queima ou impossibilidade de uso.

Um indicador importante de falha elétrica no motor é o desequilíbrio das correntes de fase do mesmo, o que em casos extremos poderá acarretar na sua queima, entretanto a análise do histórico de leituras e observância de seu comportamento será indicativo, da evolução de eventuais anomalias e avarias no motor da bomba.

Adicionalmente a análise dos harmônicos pode indicar problemas no sinal que alimenta o motor, ou até, eventualmente, ruído elétrico proveniente de conexão elétrica avariada.

Tabela 23 – Leituras de correntes de motor trifásico: Medidor vs *Software*, erro relativo.

Medida (fase)	Corrente (A)		Erro %
	Painel	<i>Software</i>	
F1	30,2	30,5	0,99
F2	29,5	29,7	0,68
F3	30,4	30,3	-0,33
F1	29,4	29,6	-0,68
F2	28,9	28,7	-0,69
F3	30,1	30,2	0,33
F1	30,2	30,4	0,66
F2	29,6	29,4	-0,68%
F3	30,5	30,2	-0,98%
F1	31,4	31,8	1,27%
F2	29,7	30,0	1,01%
F3	30,9	30,9	0,00%

6.6 Medida da diferença do padrão de vibração

Para a determinação da variação do sinal de vibração entre dois momentos distintos de um mancal ou rolamento, não basta apenas observar a amplitude da vibração, mas também se há alteração na transformada de fourier do sinal, ou seja o surgimento de novos harmônicos ou a alteração de harmônicos anteriormente presentes, gravados no “sinal padrão” [38].

Ora o aparecimento de novos harmônicos mostra que houveram novas fontes de “ruído” no elemento medido, ou seja, no caso de um rolamento, pode-se dizer que a pista em que as esferas rolam, por exemplo, está a apresentar irregularidades que não existiam na época da gravação do “sinal padrão” daquele rolamento.

6.6.1. Metodologia convencional de análise de vibração

Tradicionalmente a análise de vibração se dá em comparação dos aspectos mecânicos dos componentes analisados, por exemplo, os fabricantes de rolamentos tem pré-determinado as frequências esperadas para cada componente do dispositivo, que varia conforme seu tipo e modelo, conforme vê-se na Figura 39, reprodução de um tabela eletrônica de rolamentos SKF que associa o modelo de rolamento às frequências características esperadas no componente selecionado [39].

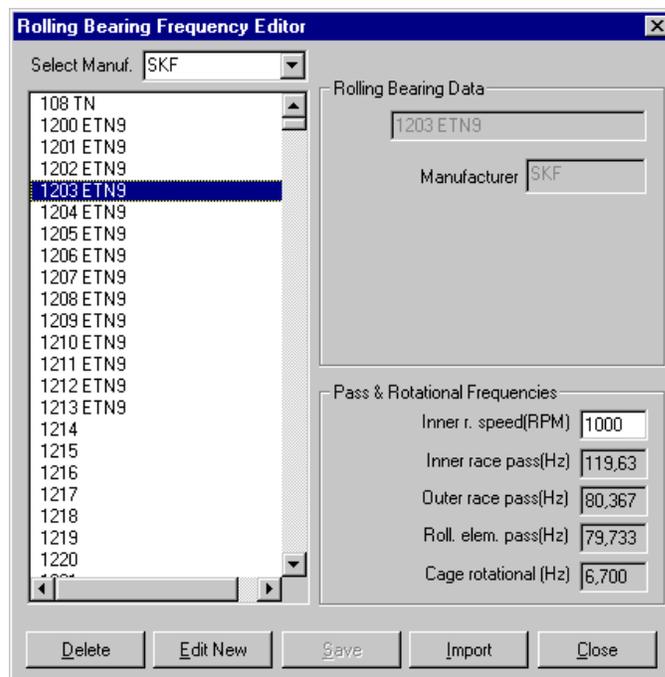


Figura 39 - Tabela eletrônica que relaciona o modelo de rolamento e suas frequências características de vibração.

Semelhantemente a estrutura de uma máquina e seus mecanismos internos contribuem para a geração de novas frequências e harmônicas que somarão ao sinal medido pelo sensor de vibração. Tradicionalmente, o *software* de análise de vibração costuma ter a necessidade de inclusão detalhada das características mecânicas da máquina [40], conforme vê-se na Figura 40, tela de entrada de relação de redução e características mecânicas de um redutor.

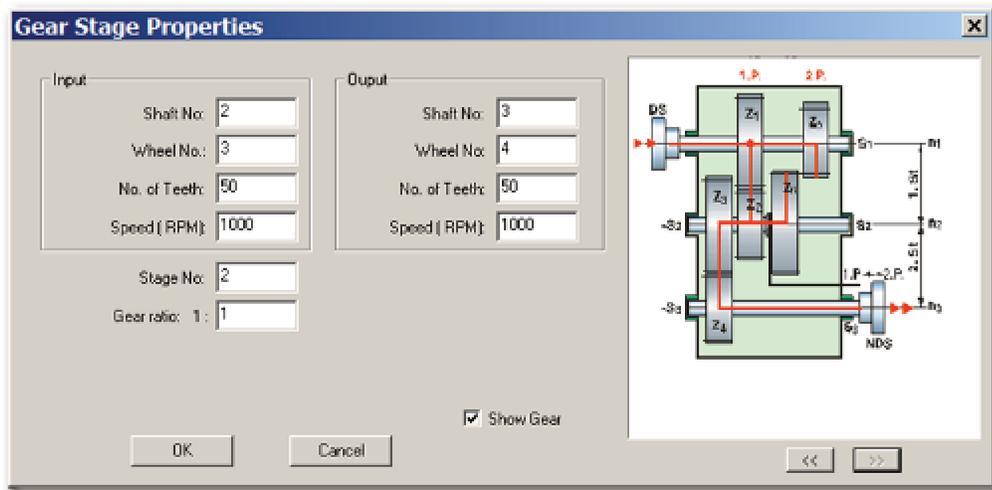


Figura 40 - Tela de entrada de características mecânicas para um redutor.

O inconveniente deste processo é a necessidade de se conhecer detalhadamente cada parte e composição de uma máquina para poder embutir no *software* que fará análise ou ao analista que fará a avaliação do sinal.

Tal processo de análise constitui na comparação do espectro de frequência do sinal medido com os componentes de frequência esperados, bem como suas amplitudes. Para ilustrar este procedimento vê-se na Figura 41 uma tela de análise de um sistema comercial onde evidencia-se as frequências e amplitudes do sistema mecânico analisado, os quais serão comparados com o sinal esperado para este sistema.

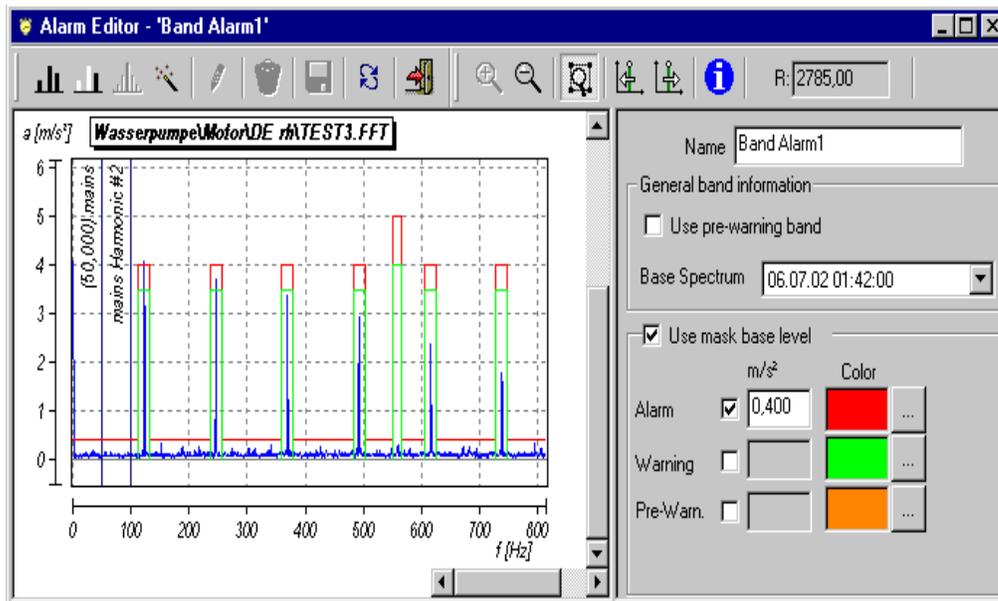


Figura 41 - Tela de *software* comercial para análise de espectro de sinal.

Em seu trabalho Kühleis [40], ao discorrer sobre problemas de harmônicos em rolamentos, destaca que para efeitos de comparação, é possível utilizar o padrão internacional ISO 10816-3 (Vibrações Mecânicas – Avaliação da vibração mecânica por medidas em partes não-rotativas – Parte 3: Máquinas industriais com potência normal acima de 15kW e velocidades nominais entre 120 rpm e 15000 rpm quando medidas em situ).

6.6.2. Aplicação de um sistema inteligente de análise

A técnica convencional de análise apresenta dois inconvenientes que interferem na análise e avaliação do sinal amostrado, a saber:

a) Se houver manutenção na máquina e alteração de suas características originais (ou cadastradas) tais como alteração do tipo/marca de um rolamento, mudança de uma relação de polias, inclusão/alteração de algum suporte e ou fixação, entre outros fatores. Todo ou uma parte do trabalho de cadastramento deve ser refeito para contemplar as alterações na máquina. Na prática é comum que a empresa proprietária de uma máquina implemente reformas, alterações e adequações nas máquinas para adequação à novos layouts e necessidades de atendimento à novos processos, o que nem sempre é bem documentado ou informado ao agente de análise de vibração. Até mesmo uma simples manutenção onde um mecânico troca a marca de um rolamento por

outro que esteja disponível, pode ocasionar uma alteração do espectro do sinal esperado para a máquina.

b) Se houver alteração do estado de trabalho do elemento em estudo, como por exemplo características de operação tais como carga do sistema, velocidade, ou variação de seu comportamento (máquina carregada/vazia), observa-se uma alteração do espectro de frequência, seja na amplitude, seja deslocamento da frequência ou ainda o surgimento ou desaparecimento de um determinado harmônico do sinal medido.

O sistema proposto tem como grande inovação a capacidade de “aprender” vários padrões de leitura e fazer uma comparação entre o sinal gerado com uma base de dados que contempla vários estados de funcionamento da máquina e o comportamento de seus vários componentes, sem a necessidade de especificação individual de cada um.

6.6.3. Utilização de vários padrões de vibração

A comparação da vibração do elemento em estudo com um padrão determinado serve para detecção da alteração do elemento, seja por causa de uma falha seja por causa da alteração do funcionamento da máquina em que ele está instalado, situação que foi observada experimentalmente; por exemplo na máquina de lavar 42, observa-se que haviam quatro situações distintas que geravam perfis de vibração diferentes:

- a) máquina em funcionamento nominal (carga nominal)
- b) máquina em funcionamento vazio (sem carga, para limpeza)
- c) máquina em funcionamento com sobrecarga (com carga acima do usual)
- d) máquina parada (máquina desligada)

Embora que numa situação ideal uma máquina não trabalharia em regime de sobrecarga, não pode-se ignorar que eventualmente ocorra esta situação de operação, daí a inclusão de um padrão para esta condição.

Como o sistema opera de forma autônoma e independe do estado da máquina (funcionando ou não) para proceder com a leitura dos sensores, tais situações foram detectadas, e nas leituras apareceram alarmes de vibração fora do padrão nominal; ou seja em determinados momentos, seja por estar parada ou em ajuste o sistema detectou falhas devido à estas condições.

Doravante o *software* original (primeira versão) foi reescrito para que seja possível estabelecer 5 padrões de vibração para cada elemento (x, y ou z) analisado, de sorte que, essencialmente tem-se pelo mesmos dois padrões a serem verificados:

- a) máquina em funcionamento nominal
- b) máquina parada

Uma vez que os padrões estejam gravados, Figura 42, a leitura do ponto de medição se faz e compara-se a leitura com os padrões. A menor diferença será o desvio do elemento monitorado em relação ao melhor padrão.

Por melhor padrão entende-se como o de menor diferença entre o sinal lido e esperado, se a máquina estiver em operação nominal o melhor padrão será o obtido em regime de operação nominal, se a máquina estiver parada será o padrão de máquina parada, e assim por diante.



Figura 42 – Gravação de vários padrões de sinais para um mesmo sensor.

Na prática, numa instalação do sistema num elevador de carga instalado na linha de produção da HONDA do Brasil (Unidade de Sumaré – SP), tem-se três condições de funcionamento do elevador que traz três sinais correspondentes à cada situação de trabalho.

A Figura 43 apresenta o formato do sinal medido quando o elevador está sem carga, ou seja movimentação à vazio, na Figura 44, a leitura do sinal corresponde ao elevador carregando a carcaça de um veículo modelo HONDA CIVIC, e na Figura 45 , tem-se o sinal de leitura correspondente à carga de um veículo modelo HONDA FIT.

O sinal, no domínio do tempo (gráfico superior), é de difícil distinção, mas no domínio da frequência (gráfico inferior) fica evidente a determinação do tipo de carga levantada pelo elevador.



Figura 43 - Formato da onda para elevador sem carga.



Figura 44 - Formato da onda para elevador carregando HONDA CIVIC.



Figura 45 - Formato da onda para elevador carregando um HONDA FIT.

Capítulo 7

Coleta de dados em campo

Com a finalidade de validação do sistema fora do ambiente acadêmico visando a aplicação em ambiente industrial, uma empresa se dispôs à participar deste trabalho, trata-se da Clean Bag de Iracemápolis - SP, empresa que faz lavagem e manutenção de *Bigbags* (grandes sacos para grãos) na indústria alimentícia.

7.1 Procedimentos

O processo produtivo e procedimentos operacionais, basicamente consistem na coleta dos *Bigbags*, classificação, lavagem, secagem, inspeção e embalagem para envio ao cliente. Foram disponibilizados para este estudo, as seguintes máquinas/sistemas :

a) Conjunto motor-ventilador que fornece à empresa ar para os sistemas de secagem de *Bigbags* lavados.

O monitoramento deste equipamento será feito através de sensores de vibração instalados no mancal do eixo do motor e no mancal do eixo do ventilador.

b) Conjunto motor-redutor de uma das máquinas de lavar da unidade de limpeza de *Bigbags*, a lavadeira 42.

O monitoramento deste equipamento será feito através de sensores de vibração instalados no mancal do eixo do motor e no mancal do eixo do redutor e no mancal do eixo de suporte do

cilindro de lavagem.

A empresa gentilmente disponibilizou cabeamento para comunicação e interligação entre os dispositivos e o microcomputador locado na sala de servidores do departamento de informática. Uma vez definidos os equipamentos foram montados os módulos e disponíveis sensores de vibração e corrente para instalação na planta fabril proposta.

7.2 Instalação da rede de comunicação

A implementação da rede de comunicação estabeleceu a interconexão entre três módulos de coleta de dados que fazem a leitura dos sensores de vibração e corrente instalados para estudo.

Na Figura 46 ilustra o esquema de ligação entre o microcomputador e os dispositivos de coleta de dados, sendo que a alimentação dos mesmos se dá pelo próprio cabeamento de tráfego de informações.

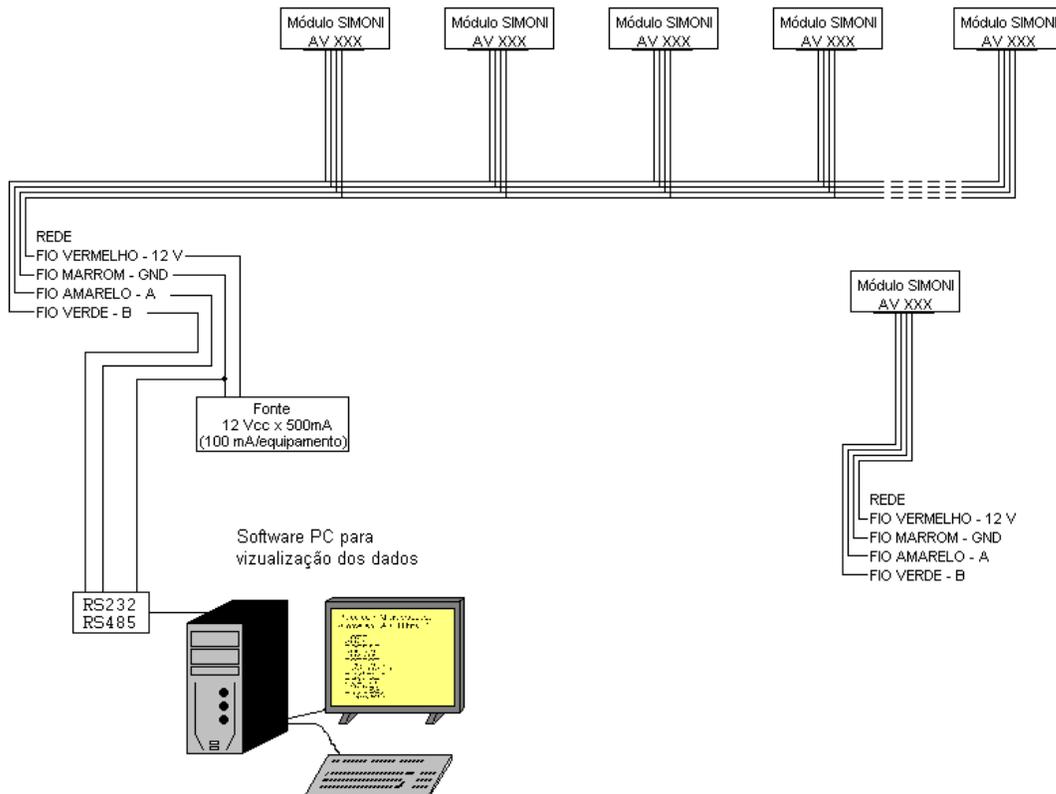


Figura 46 – Esquema de ligação da rede.

7.3 Medição de corrente dos motores

A medição da corrente do motor da bomba submersa EBARA BHS412-26, feita através de um TC, apresentou uma característica peculiar da instalação que é a variação da carga em função do nível do lençol freático subterrâneo, conforme vê-se nas leituras abaixo (leituras da bomba desligada omitidos), mostrando que há uma correlação entre a corrente e o nível de água disponível; embora a correlação não seja objeto deste estudo, após algumas horas de funcionamento e conseqüente enchimento da caixa de água da empresa, a corrente do motor mostra elevação de 32/33 A para 35 A. Como a corrente têm variação com o nível do lençol freático o operador do sistema passou a monitorar não apenas se há desalinhamento ou falta de fase, mas se a corrente do motor estiver “alta” nas primeiras leituras, há de se acompanhar o lençol, pois poderá indicar falta de água disponível, não necessariamente um falha elétrica do motor, vide Tabela 24.

Tabela 24 – Medições de corrente elétrica do motor da bomba submersa.

Data	Hora	Corrente (A)
19/06/12	21:05:45	35,34
19/06/12	20:05:45	32,736
19/06/12	19:05:45	31,434
19/06/12	18:05:45	30,876
19/06/12	17:05:45	33,294
19/06/12	16:05:45	32,364
18/06/12	19:05:45	35,526
18/06/12	18:05:45	32,55
18/06/12	17:05:45	32,736
18/06/12	16:05:45	31,806
18/06/12	15:05:45	32,364

7.4 Registros das medições de corrente temperatura e vibração

As medições de corrente, temperatura e vibração dos elementos em estudo foram feitas após a instalação e calibração dos sensores, para efeito de teste do sistema as leituras foram programadas para um intervalo de 5 minutos a fim de certificar sua operacionalidade.

Para efeito de teste do acionamento dos alarmes pré-estabelecidos, a Figura 15 ilustra o gráfico e histórico de registros de alarmes disparados nas medições de corrente do ventilador do exaustor.

Observa-se na Figura 47 a lista de alarmes gerados quando uma medida ultrapassa os limites pré estabelecidos.

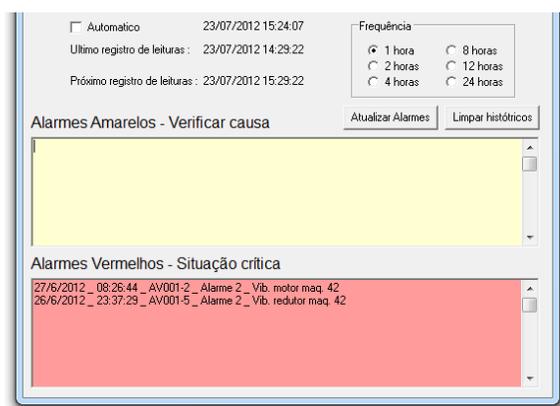


Figura 47 – Tela de acionamento de alarmes de vibração.

Considera-se como relevante se houver uma condição freqüente ou sequencial de alarmes disparados; um disparo ocasional pode estar mais ligado à uma perturbação esporádica no sensor do que necessariamente uma alteração do comportamento do elemento monitorado, isto sim representando uma falha em seus elementos.

7.5 Instalação dos sensores

O esquema de ligação entre os sensores e o módulo de leitura é feito de tal forma que o módulo provê a alimentação de 5 volts para os sensores não necessitando fonte adicional, simplificando o processo de instalação. Na Figura 48 tem-se o diagrama de ligação do módulo de leitura, mostrado na Figura 49.

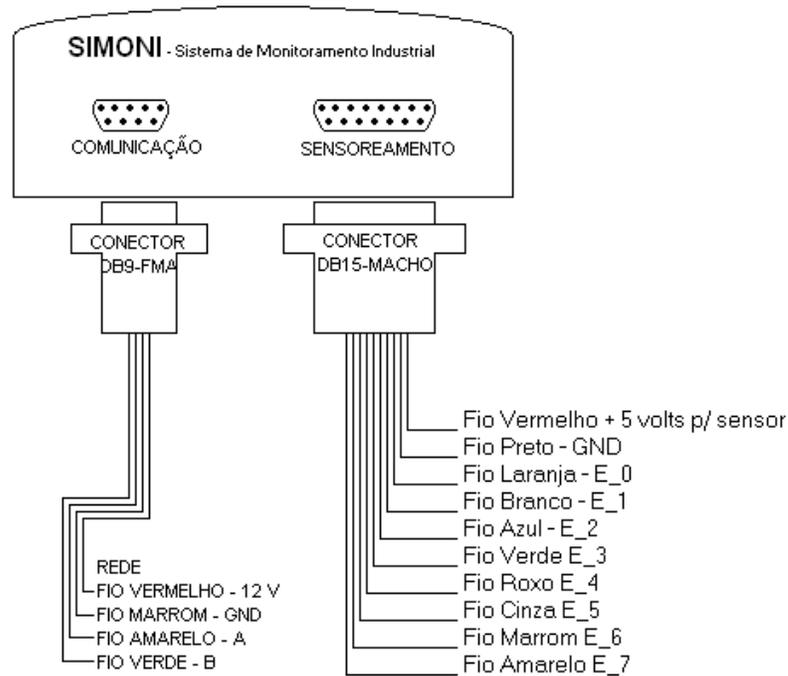


Figura 48 – Diagrama de conexões do módulo.



Figura 49 – Fotografia do módulo de coleta de dados.

A instalação dos sensores foi feita com sua fixação nos pontos monitorados através do uso de adesivo epóxi de alta resistência fabricado pela TAPMATIC DO BRASIL IND. E COM. LTDA modelo *Plasteel Aço Rapid Componente A* e Componente B, que são misturados e após o tempo de cura adquirem dureza e resistência mecânica para fixação dos sensores.

A Figura 50 e Figura 51, ilustram a instalação dos sensores de vibração fixados no motor e ao fundo no mancal do ventilador do exaustor.



Figura 50 - Detalhe da instalação de sensor de vibração no motor do ventilador.



Figura 51 - Instalação do sensor de vibração no motor e mancal do ventilador.

A Figura 52 e Figura 53, ilustram a fixação dos sensores de vibração (cabo preto) e temperatura (cabo branco) no motor e no redutor da lavadeira 42.



Figura 52 - Instalação dos sensores na lavadeira 42.



Figura 53 - Detalhe do sensor de vibração e temperatura instalados no motor da lavadeira 42.

Uma vez fixados os sensores nas máquinas, o cabeamento dos mesmos é direcionada ao painel da máquina para a ligação junto ao módulo de medição, que fica alocado no interior do painel, Figura 54 e Figura 55.



Figura 54 - Detalhe do sensor de vibração e temperatura instalados no redutor da lavadeira.



Figura 55 - Módulo de leitura de dados no painel da máquina.

7.6 Resultados obtidos

7.6.1. *Hardware* implementado

O *hardware* montado e utilizado para este sistema proposto se mostrou robusto a ponto de, durante sua utilização em ambiente agressivo não apresentar problemas significativos nem mal funcionamento, a exceção fica por conta de dois casos:

a) Um sensor de vibração que, na montagem não foi corretamente vedado e devido à presença de água no interior do mesmo provocou curto circuito.

b) Um sensor de temperatura que teve rompimento do cabo devido a esforço mecânico acidental na operação da máquina, ou seja, acidentalmente um operador rompeu o cabo do sensor, a solução foi melhorar a fixação do cabo do sensor junto à estrutura da máquina.

Basicamente as detecções de problemas no *hardware* foram feitas quando nota-se a ausência do sinal dos sensores lidos.

O *firmware* do microcontrolador utilizado é simples, basicamente atender à solicitação do mestre (PC) e efetuar a coleta do sinal a ser medido, os cálculos e avaliação do sinal é feito pelo microcomputador.

7.6.2. *Software* implementado

O programa de leitura de dados implementado no microcomputador teve três versões a saber:

a) A primeira versão tinha pouca flexibilidade e, embora não utilizada em campo, serviu para testes com a rede, leitura de sensores, testar as rotinas de cálculos, em especial FFT e aprimorar as necessidades do *software* para utilização prática, Figura 56, Figura 57 e Figura 58.

As principais características da primeira versão eram:

- Endereçamento de até três módulos de medição com 7 entradas analógicas cada.
- Apresentação de apenas uma tabela com os valores lidos.
- Leitura dos dados a cada 30 minutos
- Alarmes fixos da análise do espectro de frequência medido

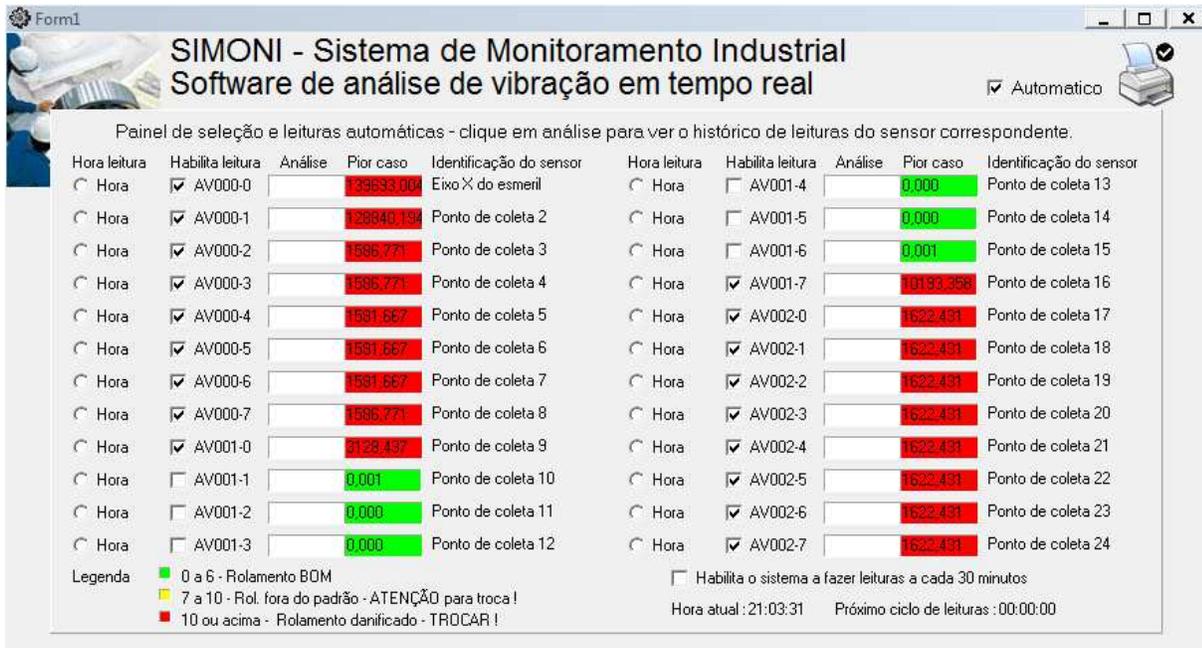


Figura 56 – Primeira versão do *software* tela de seleção das entradas dos módulos.

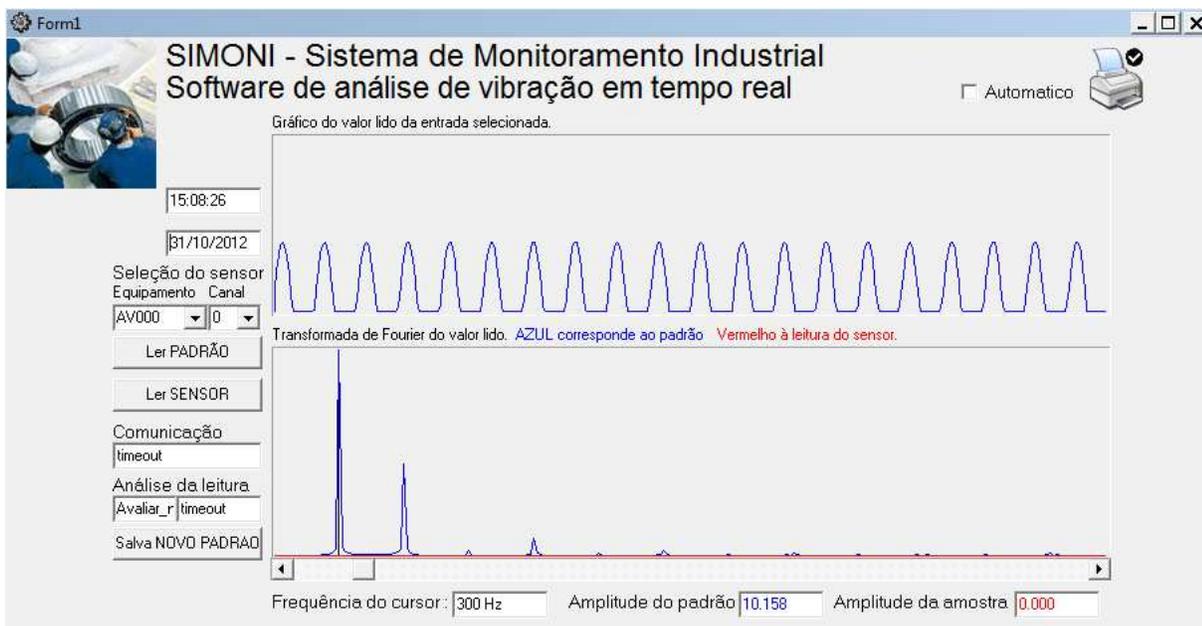


Figura 57 – Primeira versão do *software*, tela de leitura do sensor e FFT do sinal.

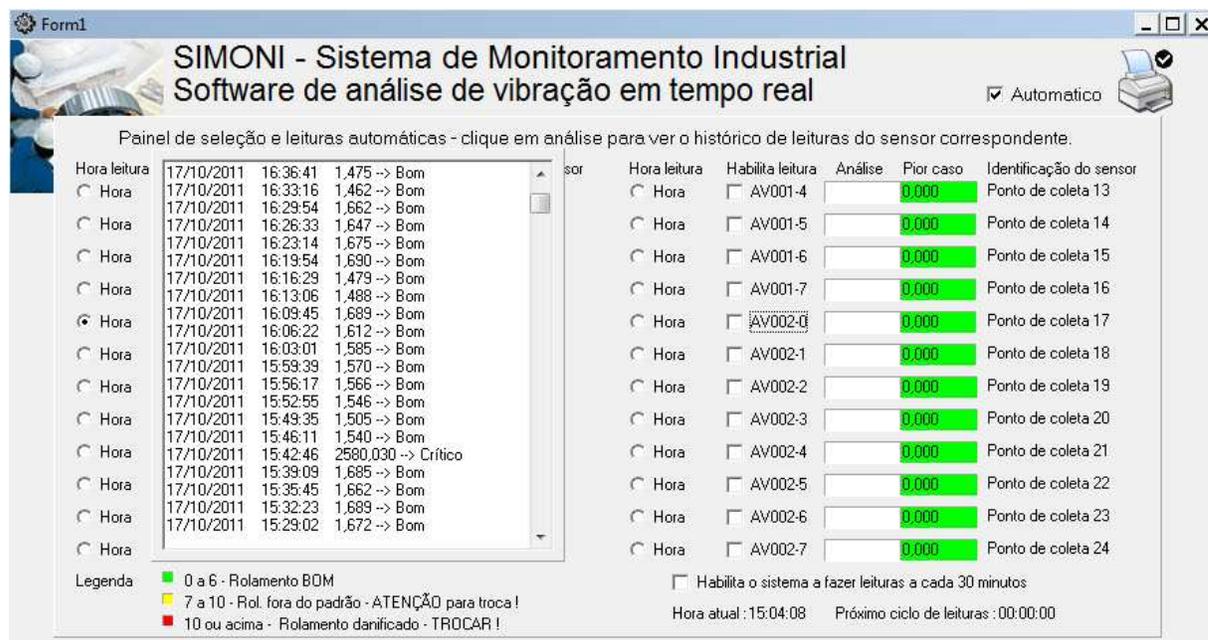


Figura 58 – Primeira versão do *software*, tela para visualizar histórico em tabela.

b) A segunda versão do programa contava com um sistema mais elaborado de registros dos pontos a serem monitorados e uma estrutura melhor e mais intuitiva para acesso e pesquisa ao histórico, inclusive com um programa auxiliar para visualização remota dos alarmes e dados.

As principais características da segunda versão são:

- Apresentação de telas específicas para cada funcionalidade do programa, o que tornou o programa mais intuitivo e fácil de usar, Figura 59.

- Ultrapassa-se a barreira de endereçamento de até 3 módulos, para endereçamento de vários módulos, inclusive com inclusão de níveis de alarmes e vários padrões de espectro para cada endereçamento de sinal individual, Figura 60.

- Foi criada uma tela específica com todas as informações e histórico de um determinado ponto medido, inclusive com gráfico para melhor visualização e acompanhamento da evolução do mesmo, Figura 61.

- A tela de medição do sinal, teve incrementada novas rotinas para gravação dos padrões relativos a cada ponto de medição bem como a possibilidade de seleção individual de cada padrão para comparação com o sinal lido, Figura 62.

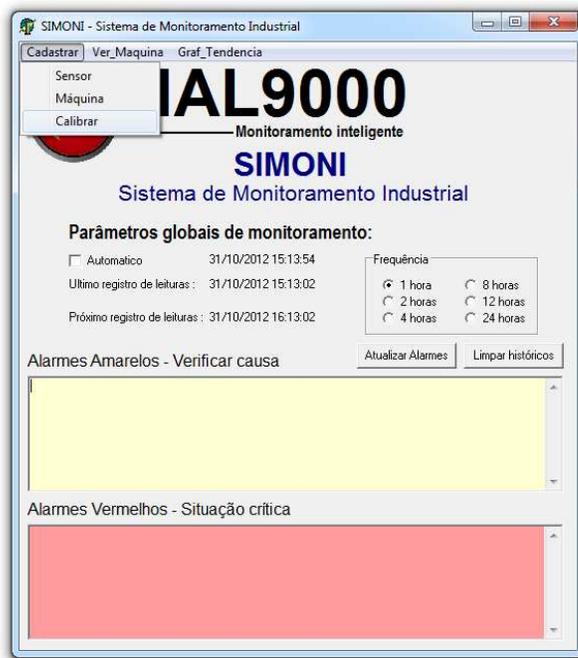


Figura 59 – Na segunda versão, programa mais intuitivo e fácil de usar.

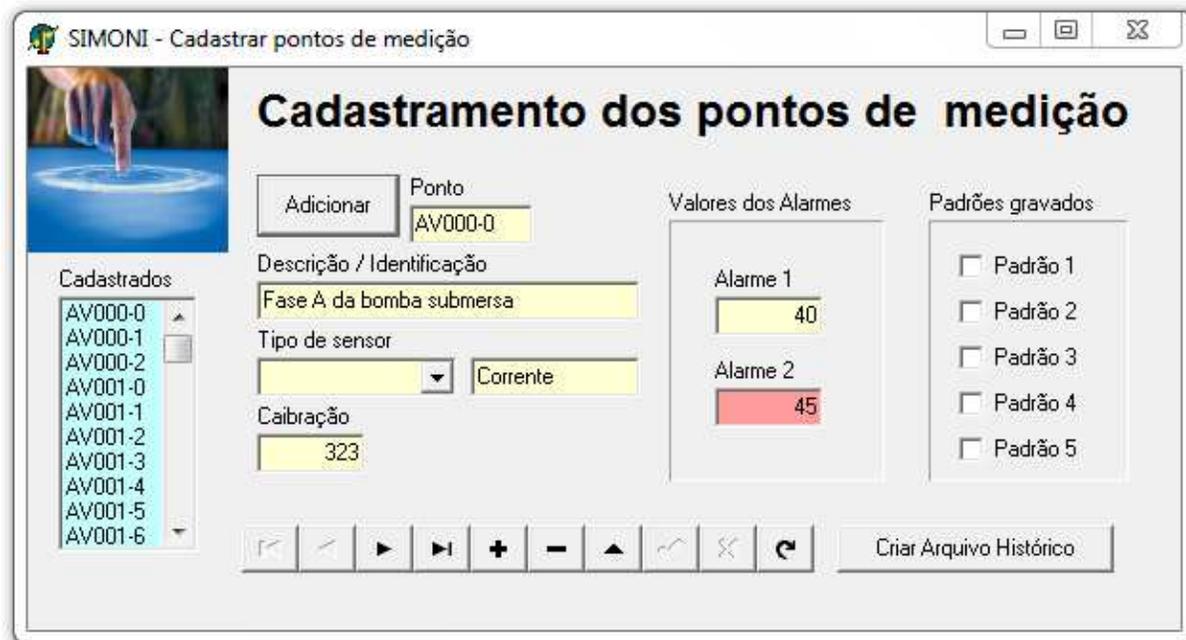


Figura 60 – Na segunda versão possibilita-se cadastro e endereçamento para vários módulos.

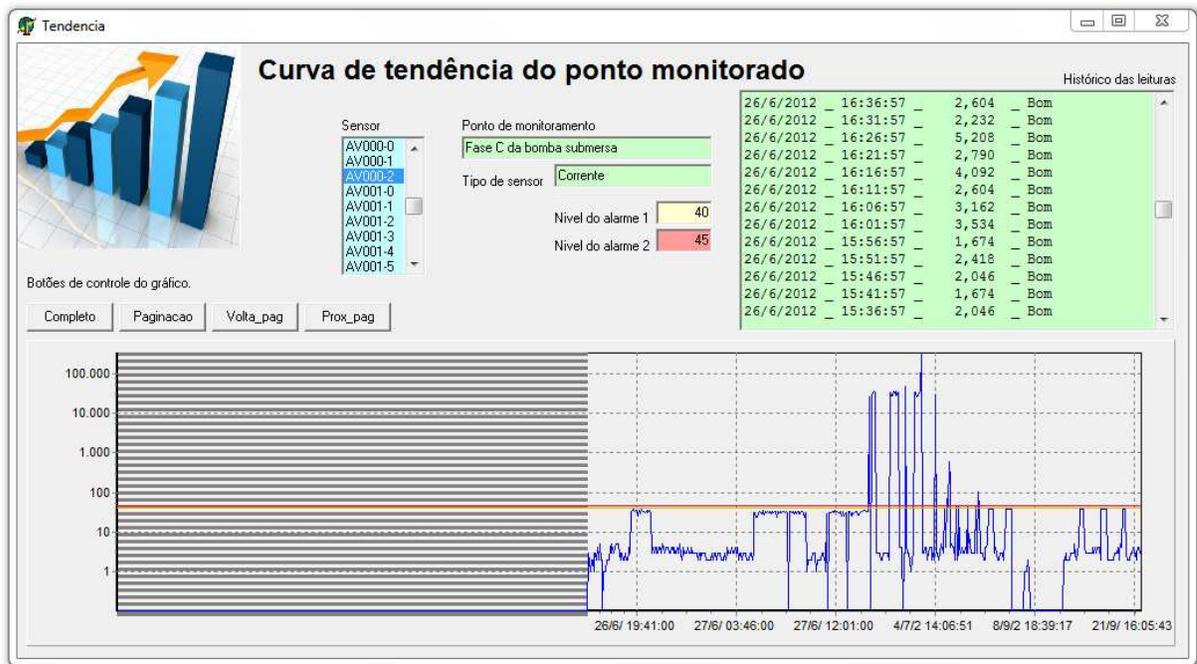


Figura 61 – Na segunda versão além do relatório tabelado mostra o gráfico da evolução do sinal.

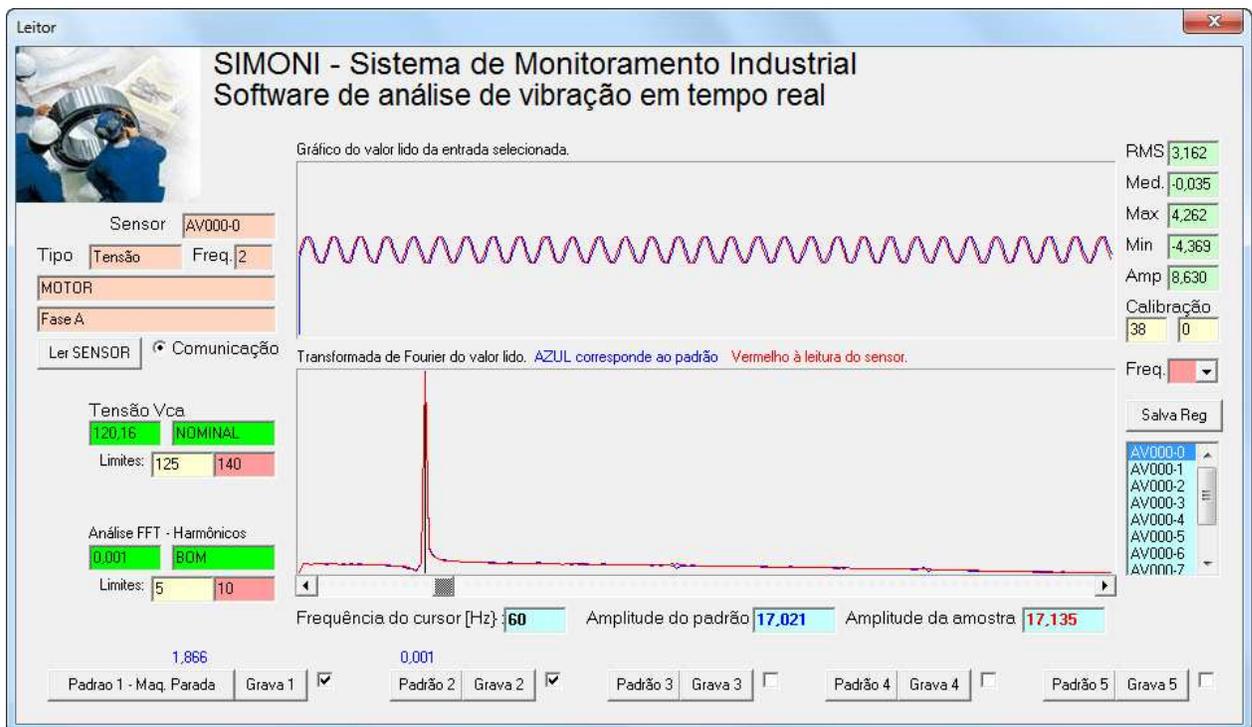


Figura 62 – Na segunda versão pode-se escolher um determinado padrão e compará-lo ao sinal lido.

c) A terceira versão do programa apresenta além das funcionalidades da segunda versão algumas melhorias importantes, principalmente do ponto de vista operacional, que vem de encontro às necessidades de uso do sistema no ambiente de fábrica, bem como no aspecto de manutenção do mesmo, lista-se abaixo as principais características:

- Possibilidade de acompanhamento dos alarmes do sistema de forma remota na rede ethernet da empresa, Figura 63. Os dados e alarmes gravados são no formato texto, este programa lê remotamente estes arquivos e quando não vazios indicam a presença de alarme. Este programa tem a possibilidade de mostrar histórico de alarmes quando selecionada a função “Mostrar Histórico”, Figura 64, que mostra os alarmes registrados e possibilita abrir uma tela de histórico, Figura 68.

- Interface de leitura de dados com visualização do sensor sendo medido, Figura 65, opções de frequências de leituras, dados do ponto sendo medido e resultados básicos da medida feita, telas dos alarmes e botões de acesso às telas de cadastro, gráfico, calibração (leitura do sensor e FFT) e apagamento dos alarmes do sistema.

- Como as telas de calibração, cadastro e apagamento afetam os registros e ajustes do sistema, para sua ativação é preciso a inclusão de uma senha, Figura 66, para confirmar a sua operação, serve para garantir que um usuário desavisado não altere os dados e/ou ajustes acidentalmente.

- A tela de medição do sinal lido, onde mostra o sinal e sua transformada, tem as informações de amplitude, pico, rms do sinal, que facilita o diagnóstico e identificação do sinal por parte do responsável pela verificação das características do sensor utilizado, Figura 67, nesta tela registram-se os padrões das situações de funcionamento para o sensor selecionado.

- Implementação de uma tela para visualização gráfica e tabelada da evolução histórica do sinal escolhido, Figura 68, diferentemente da segunda versão, esta tela possibilita o acompanhamento gráfico dos valores do sinal (corrente, temperatura, etc.) ou a evolução do THD da transformada de Fourier do sinal em comparação aos padrões pré-estabelecidos.



Figura 63 – Programa de acompanhamento remoto de alarmes.



Figura 64 – Programa remoto mostra alarmes e habilita botão para visualização gráfica das leituras.

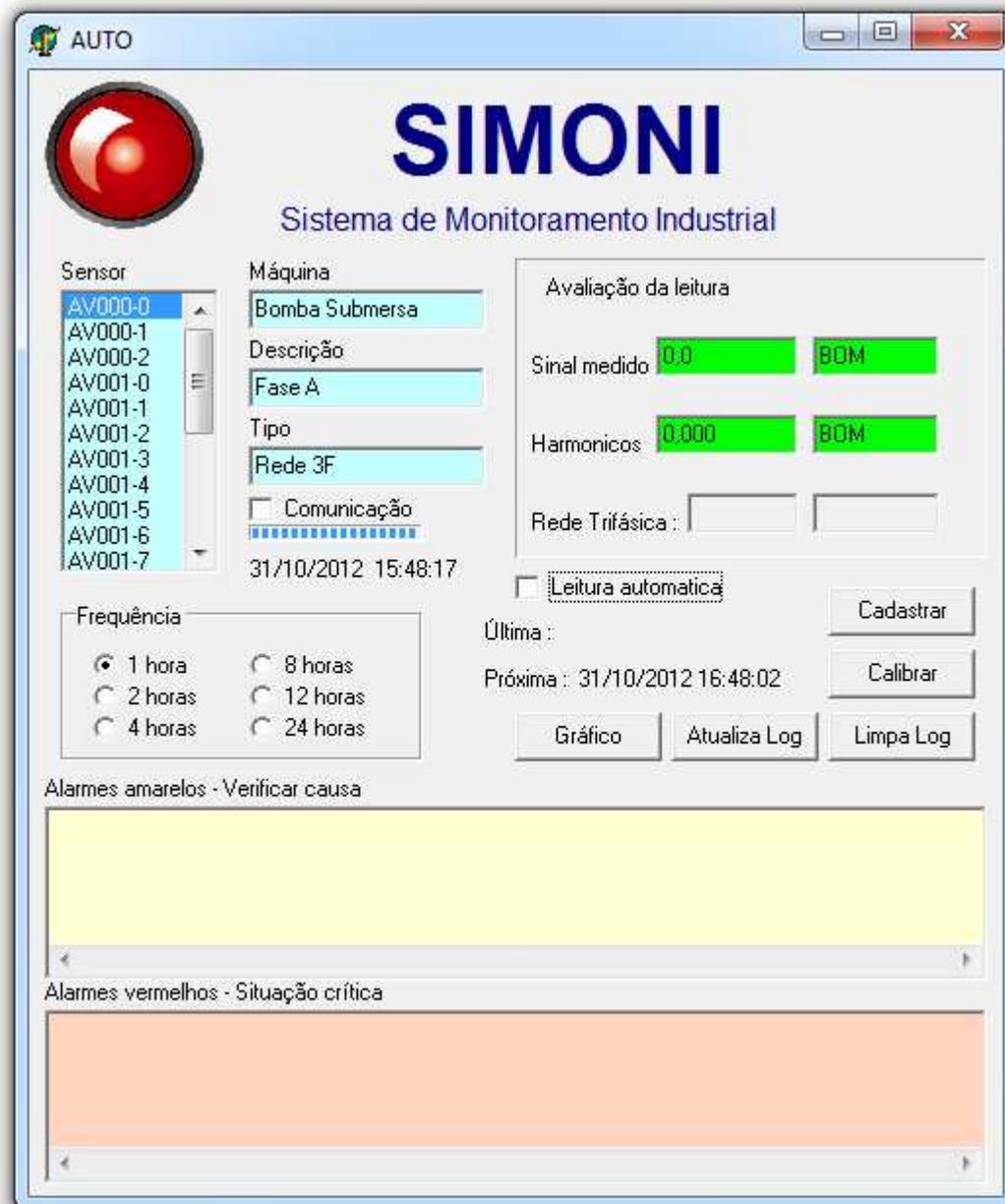


Figura 65 – Tela da terceira versão com visualização de mais dados do sinal lido.

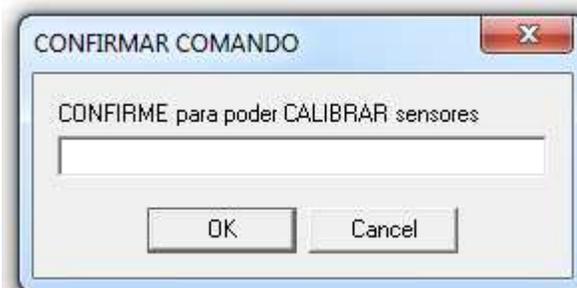


Figura 66 – As telas que não sejam apenas de visualização requerem senhas.

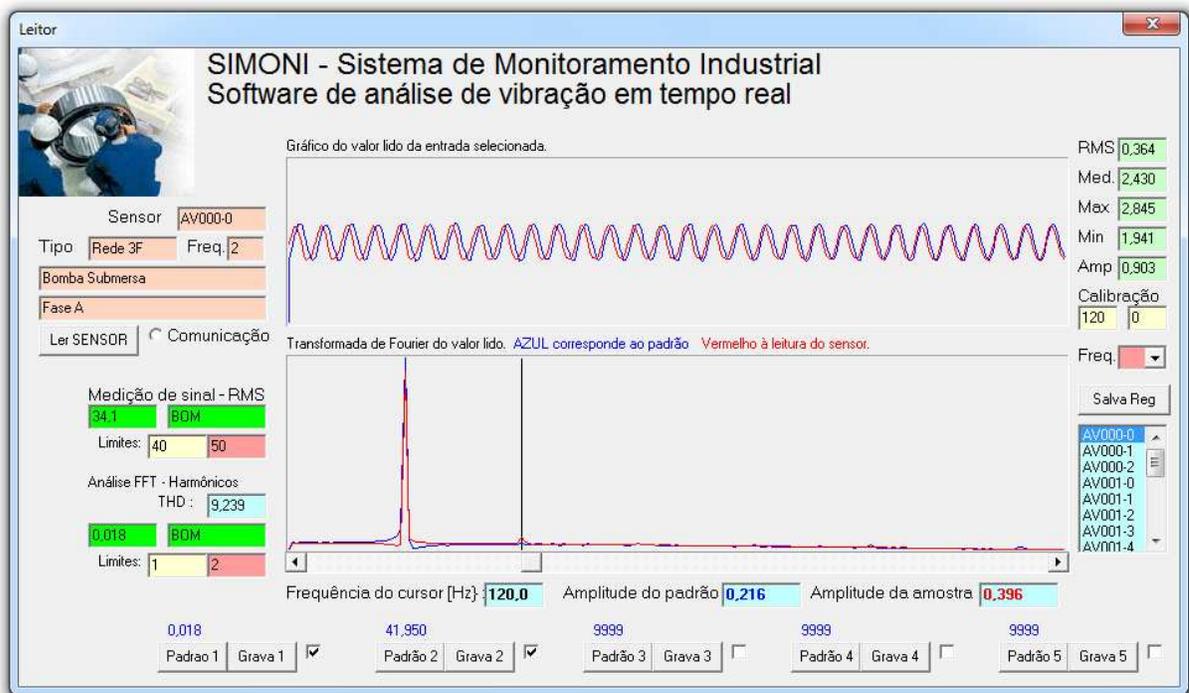


Figura 67 – Tela de calibração, onde vê-se as características do sinal medido.

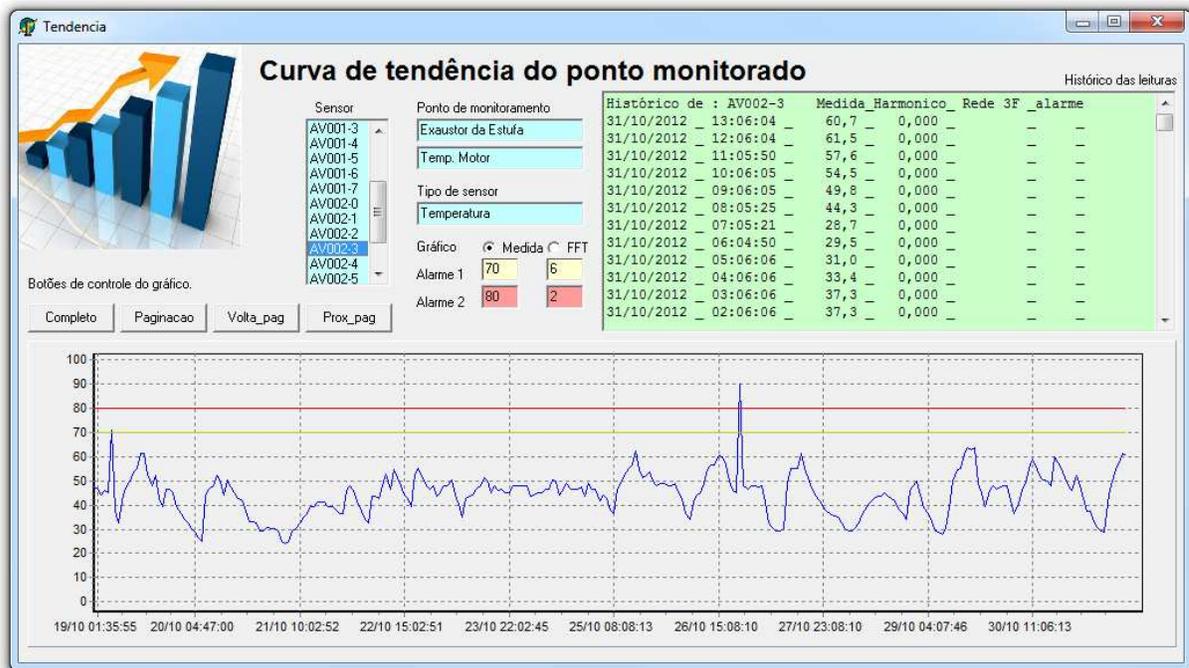


Figura 68 – A nova tela gráfica permite selecionar o histórico de medidas ou o histórico da FFT.

7.6.3. Avaliação do sinal medido

Como na primeira versão do *software* o sistema estava instalado em uma rede circunscrita à área do laboratório, não detectou-se problemas ou falhas na transmissão de dados e/ou leitura dos mesmos, entretanto, na implementação física na fábrica poderiam ter problemas na transmissão de dados, ou ainda, leituras além dos limites esperados dando alarmes falsos.

Para contornar este problema na implementação do sistema em campo sentiu-se a necessidade de fazer um processo de releitura do sinal quando o mesmo provocasse algum aviso de alarme ou erro, como um valor de corrente elevado devido à leitura no momento de partida, ou o caso de um golpe acidental na máquina no momento de leitura de vibração.

a) No caso em que houve alarme de harmônica às 7:04:44, gerando leitura sucessiva às 7:06:38 para confirmação da anomalia, que não foi confirmada e não houve geração de alarme.

Houve a repetição do alarme de harmônicos sucessivos, seja na primeira leitura (11:05:12) e na leitura de verificação (11:06:42), neste caso houve registro no quadro de alarme amarelo visto que a verificação constatou que houve um desvio em relação ao padrão esperado para esta máquina.

As medições foram registradas pelo sistema conforme vemos na Figura 69.

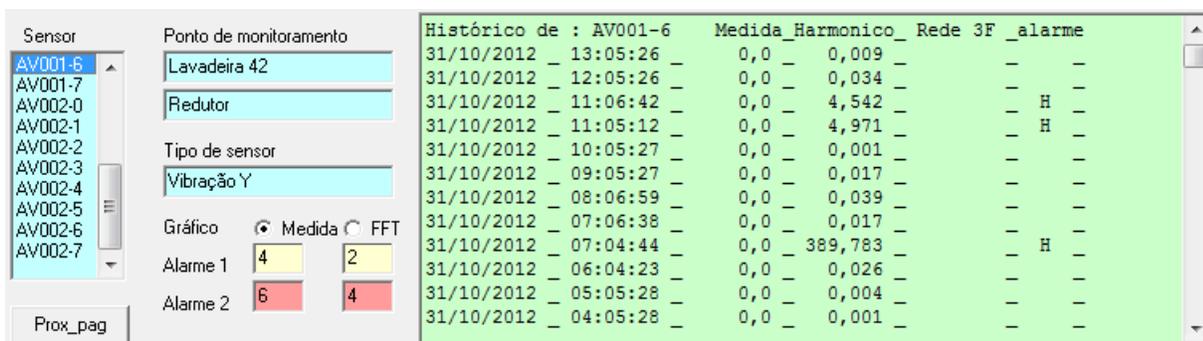


Figura 69 - Erro de leitura harmônica corrigido e falta de padrão para a situação de alarme.

b) Nem sempre uma leitura fora do esperado pode ser classificada como falta de ajusta do sensor, neste caso temos evidente que num período de tempo de algumas horas o mancal do ventilador trabalhou com a temperatura acima do nominal para a máquina, Figura 70.

Nas condições em que o mancal se encontra deve-se estudar uma melhor refrigeração do

local de operação da peça, visto que tal problema poderá se repetir em outro dia quente. Neste caso 3 avisos de alarme, Figura 71, pode-se notar os avisos são referentes à leitura de confirmação (segunda leitura).

Sensor	Ponto de monitoramento	29/10/2012	20:06:10	39,6	0,000	-	-
AV001-6	Exaustor da Estufa	29/10/2012	18:06:24	64,6	0,000	-	-
AV001-7	Temp. mancal Ventila	29/10/2012	17:06:36	60,7	0,000	-	-
AV002-0		29/10/2012	16:07:19	71,7	0,000	-	M
AV002-1		29/10/2012	16:06:39	70,9	0,000	-	M
AV002-2		29/10/2012	15:07:18	73,2	0,000	-	M
AV002-3		29/10/2012	15:06:38	73,2	0,000	-	M
AV002-4		29/10/2012	14:07:03	70,1	0,000	-	M
AV002-5		29/10/2012	14:06:15	70,1	0,000	-	M
AV002-6		29/10/2012	13:08:26	64,6	0,000	-	-
AV002-7		29/10/2012	12:08:35	57,6	0,000	-	-
		29/10/2012	11:08:37	39,6	0,000	-	-
		29/10/2012	10:07:45	26,4	0,000	-	-

Figura 70 – Repetição de leituras acima dos limites de alarmes.

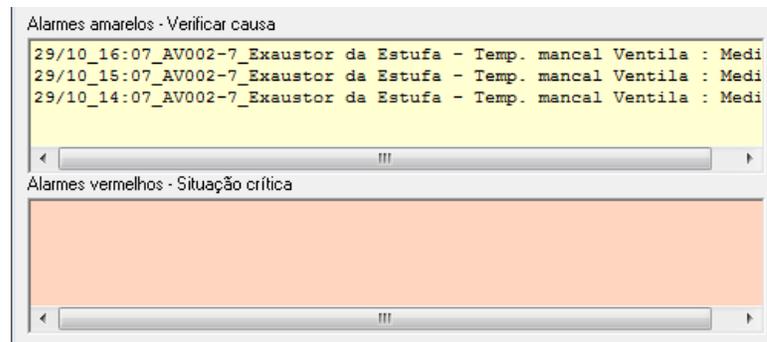


Figura 71 – Ilustração dos alarmes de temperatura do mancal do redutor da estufa.

7.6.4. Benefícios auferidos na implementação do sistema

Embora que neste período em que o sistema ficou instalado em campo, cerca de 8 meses, não houvera a detecção de falhas nos componentes instalados, em entrevista com o gerente operacional da CleanBag, usuária do sistema neste período, pode-se apontar como principais benefícios auferidos pelo usuário os seguintes:

a) O sistema se mostrou uma plataforma estável e confiável para coleta de dados do chão de fábrica, pois não houve interrupção de funcionamento do sistema por falha dos módulos de leitura de dados, as únicas falhas foram de dois sensores, uma por humidade e outra por mal posicionamento do cabo que se rompeu.

b) As medições de corrente e temperatura, acompanhadas pelo pessoal técnico da fábrica,

se mostraram confiáveis e compatíveis com as medições feitas pela equipe de eletricitistas da empresa, as transformadas e análise de vibração não puderam ser checadas por que a empresa não tem analisadores de espectro/vibração.

c) O sistema de *software*, embora tenha sido instalado em duas máquinas e houve uma reinstalação no servidor, se mostrou de fácil utilização e interpretação do resultado esperado, que é a identificação de pontos de anomalia nas máquinas, informação útil para equipe de manutenção.

d) A instalação do sistema é simples e de fácil manutenção.

e) Havia uma programação para manutenção da bomba submersa no início de 2012, com a implantação deste sistema e monitoramento da referida bomba, a sua manutenção foi adiada para acompanhamento do sistema que registrava seu desempenho, por conta deste acompanhamento adiou-se a manutenção deste equipamento para 2012, o que representou redução nos custos de manutenção da empresa, principal objetivo deste sistema, projetado para manutenção preditiva.

Capítulo 8

Conclusão e trabalhos futuros

Neste trabalho foram apresentados os fundamentos necessários para o desenvolvimento de um sistema de avaliação de máquinas e equipamentos através de coleta de dados utilizando-se microcontrolador, microcomputador, acelerômetros, sensores de corrente e temperatura para medição e acompanhamento do comportamento de máquinas para determinação de eminência de falhas com base na alteração do comportamento dos elementos em estudo, que é a base da manutenção preditiva.

A implementação das técnicas apresentadas neste estudo envolveram a aplicação de áreas de engenharia eletrônica com destaque para área de instrumentação, microeletrônica e *software*.

A instalação do sistema fora do ambiente controlado de um laboratório nos permitiu ter uma percepção mais ampla do sistema, ou seja, a inclusão de um operador do sistema nos mostrou a necessidade e importância de se criar uma interface mais simples e funcional para a apresentação dos resultados práticos ao usuário final, seja um gerente de fábrica ou um mecânico de manutenção.

As principais contribuições deste trabalho, e sua extensão:

- O desenvolvimento de uma ferramenta de coleta de dados autônoma: Tradicionalmente um operador (leiturista) faz a coleta de informações (vibração, temperatura, corrente, etc.) diretamente na máquina através de sensores externos que são acoplados à máquina para tal fim,

como por exemplo, um sensor de vibração com base magnética que adere por magnetismo à um manca de rolamento para a leitura da vibração do mesmo. Tal procedimento é muitas vezes impossível de se realizar, especialmente em situações com possibilidade de riscos ao operador.

- A elaboração de algoritmos de identificação automática de harmônicos em rolamentos: As metodologias utilizadas até então baseiam a análise de falhas em rolamentos pela amplitude das frequências de ruídos gerados pelas diversas partes de um rolamento, de sorte que, para a identificação de uma falta, se verificaria a alteração das amplitudes nas frequências características de seus elementos. Por exemplo, para um rolamento SKF6211 à 60 rpm espera-se uma frequência de pista externa de 122 Hz, e seus múltiplos. Na procura de falhas pelos métodos tradicionais, o analista, limita-se nas frequências características esperadas para cada componente. Se houver alteração da velocidade da máquina ou características do rolamento numa eventual troca, todo histórico de medições é perdido sendo necessário reiniciar o processo de coleta de dados. Neste sistema proposto, como a análise dos dados é feita através de uma comparação de várias “assinaturas” digitais do rolamento, o sistema faz a verificação das amplitudes não apenas de frequências pré-estabelecidas, mas em todo o espectro de frequência da amostra feita, podendo chegar à 5 kHz.

- A incorporação da medição em três eixos em um único sensor: A utilização de um acelerômetro em substituição à sistemas piezoelétricos, vem de encontro à facilidade na instalação do sistema, visto que em apenas um componente tem-se a possibilidade de medição de 3 eixos (X, Y e Z), para o medidor convencional seriam necessários três sensores, um para cada eixo.

- O desenvolvimento de um protocolo de endereçamento individual de cada grandeza: O protocolo utilizado permite a identificação de até 8000 pontos de medição (tensão, corrente, vibração ou temperatura), com a possibilidade de caracterização de cada um individualmente, como ganho alarmes selecionados individualmente..

A criação de algoritmos de análise de falha e interferência entre os elementos: A aplicação da lógica *Fuzzy* nos possibilita criar uma lógica de interação entre vários fenômenos que contribuem para a falha de um determinado elemento, como por exemplo o impacto do aumento de temperatura num motor aliado à uma eventual sobre corrente do mesmo.

Um exemplo de um sistema que possibilite a avaliação do comportamento de uma máquina e seus elementos: O sistema elaborado permite ao engenheiro de manutenção, de forma simples e direta, ter acesso à históricos do comportamento da máquina ou seu elemento de forma direta e fácil. Os alarmes e históricos de medição permitem a possibilidade de criação de cartas de CEP com a finalidade de se estabelecer uma previsibilidade de falta ou falha do componente verificando-se a tendência e taxa de variação dos valores lidos e valores limites dos componentes.

O uso de uma interface simples permite ao utilizador do sistema uma possibilidade de acompanhamento das máquinas sem se preocupar com os aspectos tecnológicos das medidas nem com o tratamento matemático da medidas, pois o sistema faz o tratamento e uma avaliação acurada dos dados, economizando tempo e recursos para interpretação dos resultados.

Ao contrário de muitas teses que buscam avaliar os parâmetros utilizados para se determinar a falha de uma máquina ou seus componentes, nosso trabalho tem como pauta a apresentação de um sistema eletrônico que contribua para a eliminação do trabalho humano necessário à coleta de dados, sobretudo em ambientes agressivos e perigosos; bem como a otimização da análise de informações oriundas de diversas fontes que contribuam para uma avaliação objetiva na previsibilidade de falha de uma máquina ou componente da mesma.

A implantação deste sistema em campo (indústrias) nos traz a certeza de que o caminho aberto vem de encontro às necessidades da indústria, e mostra a aplicabilidade dos conhecimentos e conceitos de engenharia no dia a dia de uma empresa.

8.1 Sugestão para trabalhos futuros

O protótipo está em teste em campo, porém com o acompanhamento deste teste detectou-se uma série de melhorias que seriam deseveis para um melhor aproveitamento e utilização do sistema:

- Utilização do sistema (*software*) que disponibilize dos dados em rede de computadores. Atualmente o sistema é instalado em uma única máquina (mestre) que faz as leituras, análises e armazenamento dos dados. A utilização de estações clientes que acessem os dados se mostrou importante pois seja o gerente de manutenção ou o mecânico da oficina podem ter acesso aos dados e históricos sem a necessidade de se deslocarem até o computador responsável pela coleta de dados, geralmente dedicado à esta função.

- Desenvolver novo método de fixação dos sensores, pois a forma atual, fixados com adesivo epóxi, faz com que a retirada dos mesmos possa causar danos e até sua destruição no caso dos sensores de temperatura.

- Desenvolver um sistema integrado à internet para monitoramento remoto das máquinas e equipamentos.

- Desenvolver metodologia de uso do sistema para se ter uma previsibilidade de falha ou perda da capacidade da máquina ou sistema através de cartas de CEP e outras ferramentas estatísticas de tratamento dos dados coletados.

Anexo 1 – Catálogo Inarmeg



INARMEG

Recomendações Técnicas
Recomendaciones Técnicas

REDUTORES E MOTOREDUTORES DE VELOCIDADE "INARMEG" / Reductores y Moto reductores de velocidad "INARMEG"

Caro consumidor, estamos muito satisfeitos por você ter escolhido produtos e serviços da Linha **INARMEG**. É para nós motivo de orgulho sua preferência. Nossos produtos e serviços são produzidos com alta tecnologia, procurando atender e superar sempre suas expectativas, para tanto relacionamos a seguir algumas instruções para o bom funcionamento dos mesmos.

- **1.0 - INSTALAÇÃO**
 - 1.1 - Recomendações para instalar seu Redutor ou Motoredutor
 - 1.1.1 - Fixação, lubrificação e alinhamento

- **4.0 - TEMPERATURA DE TRABALHO**

A Temperatura máxima admissível para um Redutor ou Motoredutor em funcionamento a plena carga é em torno de 40°C acima da temperatura ambiente, podendo alcançar no máximo 95°C. Essa temperatura é a temperatura interna (Lubrificante, Rosca Sem Fim e Coroa), sendo que a temperatura externa da caixa é de aproximadamente 15°C a menos que a temperatura interna do mesmo. Em casos de aplicações em temperaturas mais altas ou muito baixas consultar nosso departamento técnico, referente a lubrificantes e vedações especiais.

“4.0 Temperatura de trabalho

A temperatura máxima admissível para um Redutor ou Motoredutor em funcionamento a plena carga é em torno de 40° C acima da temperatura ambiente, podendo alcançar no máximo 95° C. Essa temperatura é a temperatura interna (Lubrificante, Rosca Sem Fim e Coroa), sendo que a temperatura externa da caixa é de aproximadamente 15° C a menos que a temperatura interna do mesmo. Em casos de aplicações em temperaturas mais altas ou muito baixas consultar nosso departamento técnico referente a lubrificantes e vedações especiais.”

Anexo 2 – Manual do redutor

MACOPEMA

6.1. Redutores com lubrificação a óleo mineral.

6.1.1. Controlar regularmente o nível e a temperatura do óleo (Temperaturas medidas na superfície da carcaça são em média 10° C mais baixas do que a temperatura do óleo).

6.1.2. Efetuar a primeira troca de óleo mineral após aproximadamente 500 horas de serviço. Os intervalos das demais trocas de óleo dependem das condições de operação do redutor (solicitação e temperaturas de serviço, frequência de partidas, tipo de óleo e condições ambientais). A tabela 1, indica valores médios de referência para os intervalos de troca. (Ver tabela abaixo).

6.1.3. As drenagens de óleo deverão ser feitas enquanto o redutor ainda estiver quente.

6.1.4. Antes da colocação do óleo novo no redutor é recomendável efetuar uma lavagem prévia com óleo fino da mesma formulação do óleo lubrificante, ou água raz.

6.1.5. Na troca de óleo deve-se observar que o lubrificante seja substituído pelo mesmo tipo anteriormente usado. Não misturar tipos de óleos e marcas diferentes.

6.1.6. Os mancais de rolamento e vedações que requerem relubrificações por graxa, devem ser abastecidos através dos niples de lubrificação. Utilize somente graxas a base de sabão de lítio, apropriado para rolamentos. Relubrificar com aproximadamente 10 a 20 cm³ de graxa em intervalos de três meses (solicite instruções específicas).

6.1.7. O tipo de lubrificante, a viscosidade e alguns fabricantes estão indicados na tabela 2. (Ver tabela abaixo).

6.2. Redutores com lubrificantes permanentes.

6.2.1. Efetuar a troca de acordo com a tabela 1. Retirando a tampa cega da coroa.

6.2.2. Caso necessitar adicionar óleo permanente por causa de vazamentos, proceder da seguinte forma:

- Retire um dos parafusos nº 1 da tampa fechada da rosca sem fim, e um dos parafusos nº 2 de qualquer das tampas da coroa indicada na figura 1 abaixo.
- Através de uma seringa, injete o óleo pelo orifício nº 1 até começar a vazar pelo orifício nº 2, com o redutor na posição indicada na figura 2 abaixo.
- Coloque novamente os parafusos com vedarosca.

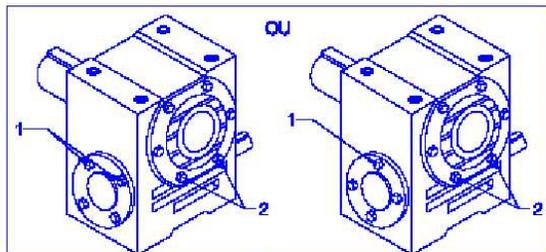


FIG. 1

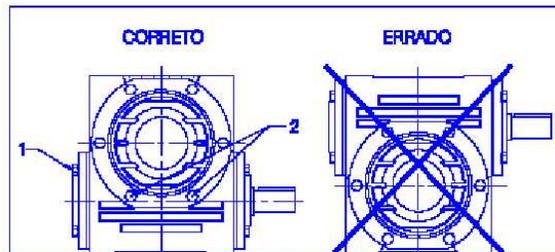


FIG. 2

“6.1.1 Controlar regularmente o nível e a temperatura do óleo (Temperaturas medidas na superfície da carcaça são em média 10° C mais baixas do que a temperatura do óleo).”

Apêndice 1 – Análise de sinais no domínio da frequência

1.1 Análise de sinais no domínio da frequência (FFT)

A Transformada de Fourier operada de forma algébrica se aplica à uma situação em que tem-se sinais contínuos e periódicos no tempo [29].

Entretanto a geração dos sinais a serem analisados tem a características de serem discretos, pois computacionalmente, o microcontrolador faz uma sequência de leituras de um sinal e, com estes valores lidos, tem-se não um sinal contínuo, mas sim uma sequência de amostras do mesmo, portanto para poder explorar a capacidade de processamento digital de sinais e utilizar as técnicas das transformadas de Fourier.

1.1.1. Transformada discreta de Fourier (DFT)

Seja o sinal $f(t)$, amostrado com intervalos regulares T , representado por:

$$f(kt) = x_0 \cdot \delta_{(t)} + x_1 \cdot \delta_{(t-T)} + x_2 \cdot \delta_{(t-2T)} + \dots, k = 0, 1, 2 \dots \quad \text{Equação 5}$$

Como vale o princípio da superposição, pode-se escrever diretamente a TF como sendo:

$$\mathfrak{F}_{(\omega)} = x_0 + x_1 \cdot e^{-i\omega T} + x_2 \cdot e^{-i2\omega T} + \dots = \sum_{k=0,1,2\dots} x_k \cdot e^{-ik\omega T}, -\infty < \omega < \infty \quad \text{Equação 6}$$

Essa é a chamada Transformada Discreta de Fourier (DFT). Apesar de ser fácil escrever a DFT para uma série de amostras de um sinal, a visualização da forma resultante para $I(\omega)$ não é simples. Isso se deve a:

a) os termos $e^{-i\omega t}$ têm espectros contínuos que se superpõem;

b) os termos $e^{-i\omega T}$, $e^{-i2\omega T}$, $e^{-ik\omega T}$ são periódicos em frequência, com período $\omega = 2\pi / T$, logo o espectro resultante também resulta periódico.

Notar que quando $T \rightarrow 0$ (amostragem contínua), o intervalo de repetição em frequência tende a infinito, resultando um único espectro.

No caso de sinal amostrado, ocorre a repetição desse espectro a cada $2\pi/T$.

Nesse caso só se necessita conhecer o espectro entre $-\pi/T$ e π/T , que o restante será uma repetição desse espectro.

Da hipótese anterior ($T \rightarrow 0$), conclui-se que o espectro entre $-\pi/T$ e π/T , representa o espectro do sinal contínuo (não amostrado), numa faixa mais restrita de frequências.

1.1.2. Análise de sinais com transformada discreta de Fourier (DFT)

A DFT é uma transformação que se aplica para sinais amostrados e que leva ao algoritmo de cálculo da Transformada Rápida de Fourier (em inglês FFT). O algoritmo da FFT permite calcular $N/2$ componentes do espectro contidos no intervalo $0 \leq \omega \leq \pi/T$, a partir do processamento de N amostras temporais do sinal, igualmente espaçadas de T . O espaçamento ou resolução em frequência ($\Delta\omega$) é dado por:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{\max}}{\frac{N}{2}}, \text{ onde } \omega_{\max} = \frac{\pi}{T}, T = \text{intervalo de amostragem} \quad \text{Equação 7}$$

Logo:

$$\Delta\omega = \frac{\omega_{\max}}{N \cdot T}, \text{ onde } N = \text{número de amostras do sinal} \quad \text{Equação 8}$$

A frequência da k-ésima harmônica é, portanto:

$$\omega k = 2\pi k \quad , k = 0,1,2,\dots,N-1 \quad \text{Equação 9}$$

Considere-se o espectro de um sinal amostrado como sendo:

$$\mathfrak{F}(\omega) = x_0 + x_1 \cdot e^{-i\omega T} + x_2 \cdot e^{-i2\omega T} + x_3 \cdot e^{-i3\omega T} + \dots + x_{N-1} \cdot e^{-i(N-1)\omega T} \quad \text{Equação 10}$$

A harmônica de ordem k pode ser representada por:

$$\mathfrak{F}(\omega) = X(k) = x_0 + x_1 \cdot e^{-i\frac{2\pi k}{N}} + x_2 \cdot e^{-i2\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} + x_3 \cdot e^{-i3\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} + \dots + x_{N-1} \cdot e^{-i(N-1)\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} \quad \text{Equação 11}$$

$$\mathfrak{F}(\omega) = X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\left(\frac{\pi kn}{N}\right)} , k = 0,1,2 \dots N - 1 \quad \text{Equação 12}$$

$n=0,1,2,\dots,N-1$ indica o contador das amostras temporais do sinal x_n .

$k=0,1,2,\dots,N-1$ indica a ordem harmônica. A partir de $k = N/2$ o espectro se repete.

Assim, para obter a DFT do sinal amostrado tem-se que variar os valores de n e k. Para simplificar a notação, define-se o operador complexo de rotação que aparece em todas as N amostras como sendo:

$$W_n = e^{-i\frac{2\pi}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \quad \text{Equação 13}$$

Notar que quanto maior o valor de N, menor é o deslocamento angular dado por WN .

Usando a notação compacta, a DFT das N amostras fica sendo:

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot W_N^{nk}, k = 0,1,2 \dots N - 1 \text{ (ordem harmônica)} \quad \text{Equação 14}$$

Para calcular todos os valores espectrais de X tem-se N^2 operações de multiplicação complexa, além das $N(N-1)$ somas complexas.

O grande benefício da FFT é que esse número de operações cai para $2 \cdot N \cdot \log_2 N$ multiplicações complexas, o que dá uma significativa redução de tempo de processamento.

Exemplificando:

$$N = 2^7 = 128$$

$$N^2 = 2^{14} = 16384$$

$$2 \cdot N \cdot \log_2 N = 256 \cdot 7 = 1792$$

Redução de 16384 para 1792 operações, ou seja, 9,14 vezes.

$$N = 2^{10} = 1024 = 2^{10}$$

$$N^2 = 2^{20} = 1048576$$

$$2 \cdot N \cdot \log_2 N = 2048 \cdot 10 = 20480$$

Redução de 1048576 para 20480 operações, ou seja, 51,2 vezes.

Para elaborar o algoritmo da FFT deve-se quebrar a sequência de amostras em subconjuntos pares/ímpares. Esses subconjuntos são transformados e subdivididos sucessivamente até se chegar à operação elementar entre duas amostras (dizimação no tempo).

Essa decomposição requer que N seja potência inteira de 2.

Seja pois: $N = 2^v$

Como N é par, pode-se expressar a DFT separando x_n nas duas sequências de $N/2$ amostras pares e ímpares:

$$X(k) = \sum_{n=par}^{N-1} x_n \cdot W_N^{nk} + \sum_{n=impar}^{N-1} x_n \cdot W_N^{nk}, k = 0,1,2 \dots N - 1 \quad \text{Equação 15}$$

Para explicitar os contadores de amostras pares e ímpares usa-se um novo contador r definido de forma que:

Para $r = 0, 1, 2, 3, \dots, (N/2-1)$

$n = 2.r$ para n par

$n = 2.r+1$ para n ímpar

$$X(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r} \cdot W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r+1} \cdot W_N^{(2r+1)k} \quad \text{Equação 16}$$

Pode-se verificar que ocorrem redundâncias nesses operadores, por exemplo:

$$W_N^2 = \left(e^{-i\frac{2\pi}{N}} \right)^2 = e^{-i\frac{4\pi}{N}} = e^{-i\frac{2\pi}{\frac{N}{2}}} = W_{\frac{N}{2}} \quad \text{Equação 17}$$

Levando em conta essa redundância conclui-se que cada somatório torna-se uma DFT de $N/2$ amostras:

$$X(k) = \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r} \cdot W_{\frac{N}{2}}^{rk} + \sum_{r=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{2r+1} \cdot W_{\frac{N}{2}}^{rk} = TDF \text{ par} + TDF \text{ ímpar} \quad \text{Equação 18}$$

$$k = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

Como $N/2$ continua sendo número par, pode-se repetir essa quebra, resultando quatro DFT de $N/4$ amostras. Continuando, chega-se a $N/2$ DFT de apenas 2 amostras. Esse processo de quebra das amostras temporais em subconjuntos é chamado dizimação temporal. A cada etapa tem-se uma relação entre as DFT de um estágio m para o seguinte, do tipo:

$$X_{m+1}^k(p) = X_m^k(p) + W_N^k \cdot X_m^k(q) \quad \text{Equação 19}$$

Onde $X_m^k(p, q)$ = valores das DFT pares(p) e ímpares(q) no estágio m para harmônica k ;

$m = \text{est\u00e1gio da dizima\u00e7\u00e3o}$ $m=1,2,3\dots v$
 $p, q = \text{\u00edndices par e \u00edmpar}$ $p,q=0,1,2\dots(N/2 - 1)$
 $k = \text{ordem harm\u00f4nica}$ $k=0,1,2\dots N-1$

A express\u00e3o (I) anterior d\u00e1 os termos pares de X_{m+1}^k . Faltam os termos \u00edmpares. Notar que o \u00edndice k varia at\u00e9 $N-1$, enquanto r varia at\u00e9 $(N/2 - 1)$. Para os demais termos, ($k= r + N/2$), os coeficientes da DFT ir\u00e3o se repetir, pois como:

$$W_N^{r+\frac{N}{2}} = e^{-i\left[2\pi\frac{(r+\frac{N}{2})}{N}\right]} = e^{-i\frac{2\pi r}{N}} \cdot e^{-i\pi} = e^{-i\frac{2\pi r}{N}} = -W_N^r \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 20}$$

Basta calcular os operadores W_N^r para $r = 0,1,2\dots(N/2-1)$, e usar o seguinte par de equa\u00e7\u00f5es para $k = r = 0,1,2\dots(N/2-1)$.

$$X_{m+1}^k(p) = X_m^k(p) + W_N^k \cdot X_m^k(q), p \text{ conjunto par} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 21}$$

$$X_{m+1}^k(q) = X_m^k(p) - W_N^k \cdot X_m^k(q), q \text{ conjunto \u00edmpar} \quad \text{Equa\u00e7\u00e3o 22}$$

Esse par de equa\u00e7\u00f5es \u00e9 chamado de opera\u00e7\u00e3o borboleta devido \u00e0 sua forma de representa\u00e7\u00e3o gr\u00e1fica, mostrada no exemplo a seguir.

Supondo $N = 23 = 8$ amostras, o c\u00e1lculo da FFT pode ser representado pelo seguinte diagrama que ter\u00e1 $v=3$ est\u00e1gios.

A decomposi\u00e7\u00e3o (dizima\u00e7\u00e3o) come\u00e7a de tr\u00e1s para frente para se chegar \u00e0 opera\u00e7\u00e3o inicial entre duas amostras.

Primeira dizima\u00e7\u00e3o, Figura 72:

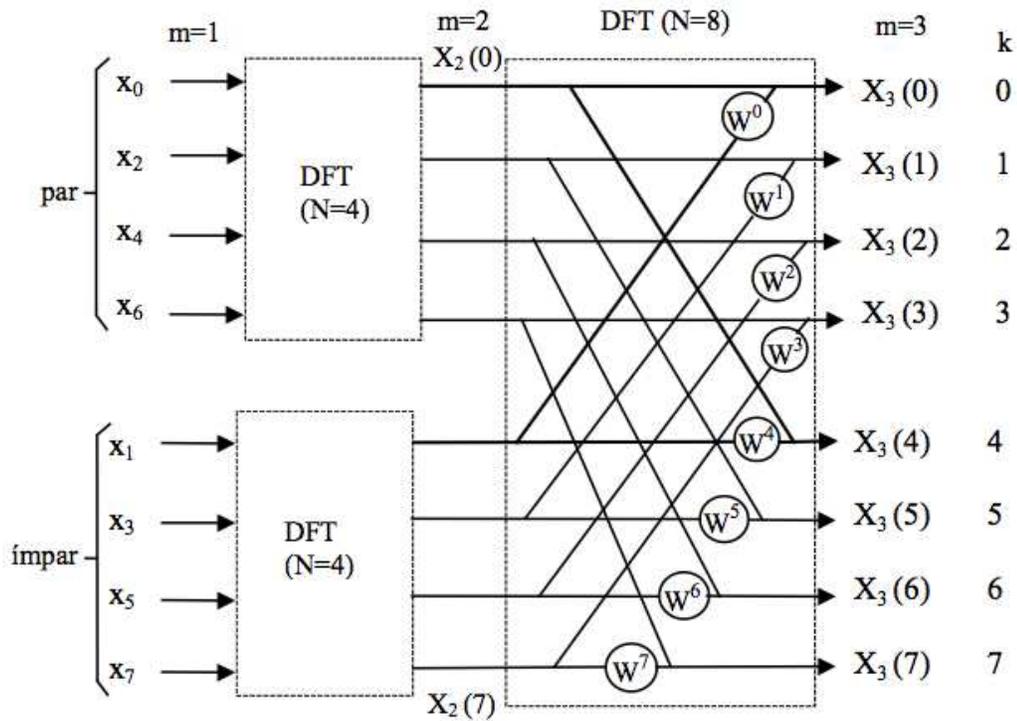


Figura 72 – Primeiro estágio de dizimação.

Devido à simetria do tipo $W_N^{r+\frac{N}{2}} = -W_N^r$ pode-se escrever:

$$W^4 = -W^0 \quad \text{Equação 23}$$

$$W^5 = -W^1 \quad \text{Equação 24}$$

$$W^6 = -W^2 \quad \text{Equação 25}$$

$$W^7 = -W^3 \quad \text{Equação 26}$$

e com isso a operação básica (borboleta) fica sendo:

$$X_{3(0)} = X_{2(0)} + W^0 X_{2(4)} \quad \text{para } k = 0 \text{ (primeiro termo par)} \quad \text{Equação 27}$$

$$X_{3(4)} = X_{2(0)} - W^0 X_{2(4)} \quad \text{para } k = 4 \text{ (primeiro termo ímpar)} \quad \text{Equação 28}$$

Repetindo as operações para as DFT menores, obtém-se para o segundo estágio da dizimação, Figura 73:

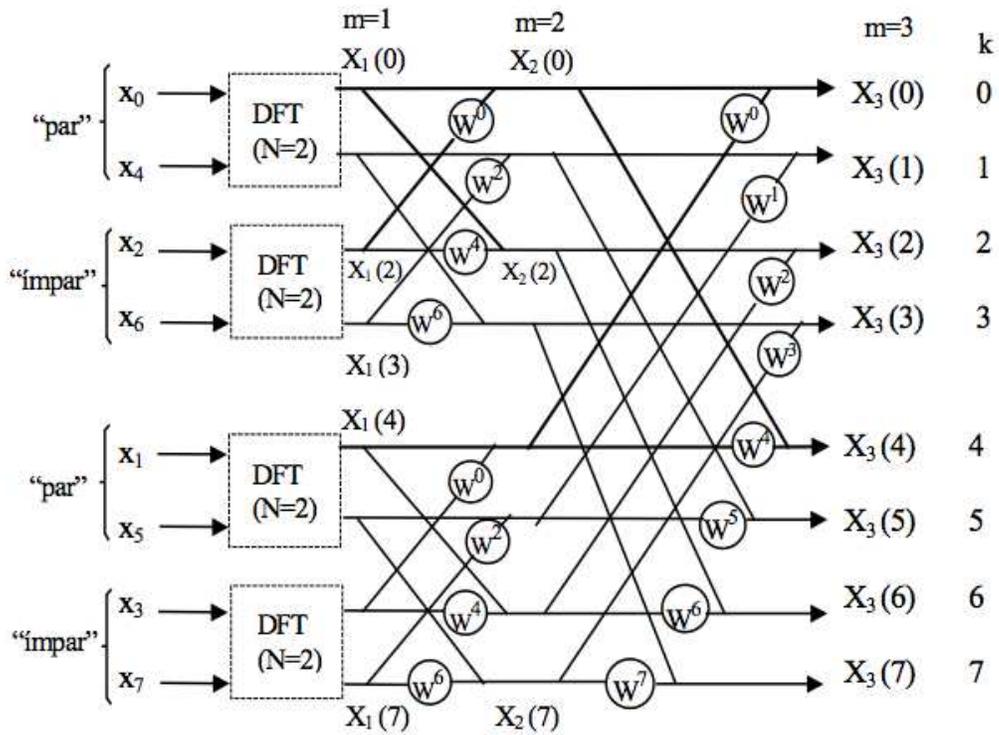


Figura 73 – Segundo estágio de dizimação.

Operação básica:

$$X2_{(0)} = X1_{(0)} + W^0 X1_{(2)} \quad \text{Equação 29}$$

$$X2_{(0)} = X1_{(0)} - W^0 X1_{(2)} \quad \text{Equação 30}$$

Repetindo as operações para as DFT menores, obtém-se para o terceiro estágio da dizimação, Figura 74:

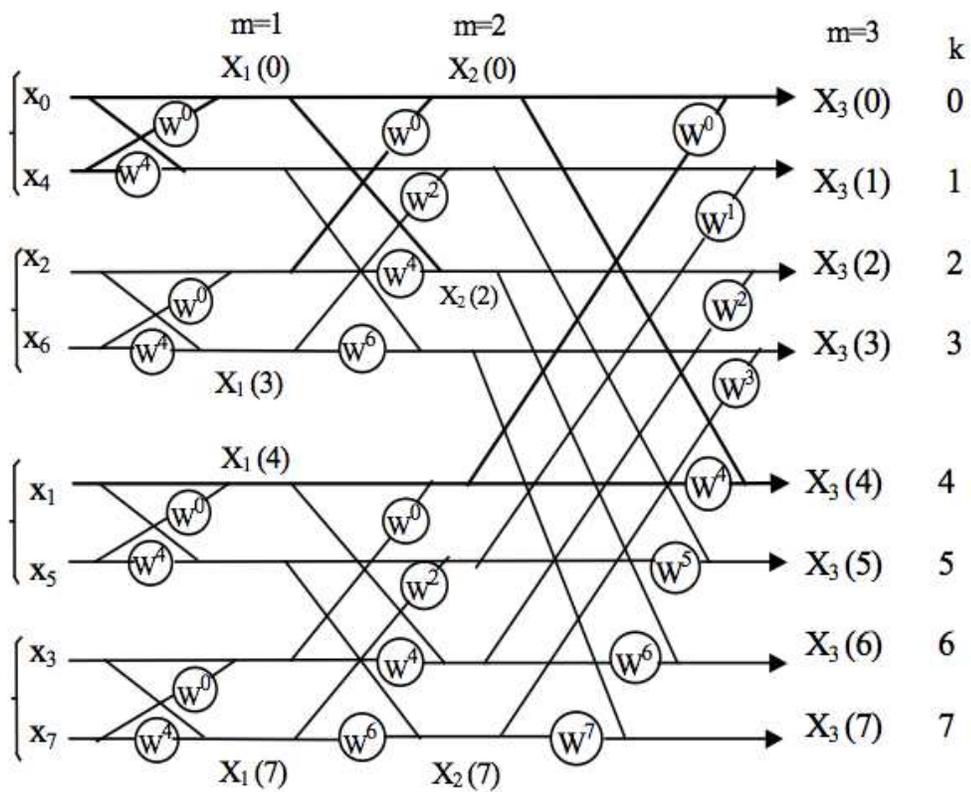


Figura 74 – Terceiro estágio de dizimação.

Operação básica :

$$X_{1(0)} = X_{0(0)} + W^0 X_{0(1)} \quad \text{Equação 31}$$

$$X_{1(0)} = X_{0(0)} - W^0 X_{0(1)} \quad \text{Equação 32}$$

Portanto, o algoritmo para N=8 amostras pode ser reduzido às seguintes operações, Figura 75:

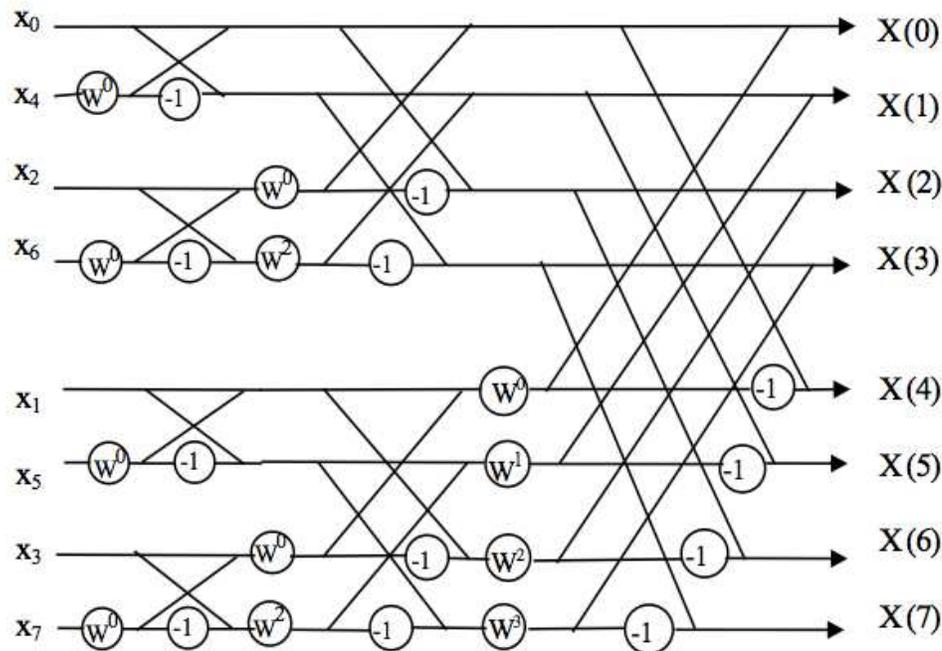


Figura 75 – Conjunto de operações para dizimação de N=8 amostras.

Uma conclusão importante é que se as 8 amostras temporais forem reordenadas na sequência: x0, x4, x2, x6, x1, x5, x3, x7, então todos os cálculos podem ser feitos nas próprias posições no vetor de dados, de modo que ao final das operações se obtenha as componentes harmônicas ordenadas automaticamente de 0 a N-1. Além disso, só é preciso calcular os seguintes operadores de rotação:

$$W^0, W^1, W^2 \text{ e } W^3 \quad W^i = e^{-j\frac{2\pi}{N}i} \quad \text{Equação 33}$$

1.1.3. Implementação da transformada rápida de Fourier (FFT)

Para programar a FFT tem-se que sistematizar alguns procedimentos:

1) Escolher N como sendo potência de 2 (Ex: N=23 = 8); isto decide o número de estágios da decomposição (v=3 estágios).

2) Calcular previamente os operadores W_N^r $r = 0,1,2 \dots \frac{N}{2} - 1$, com $W_N^r = e^{-j\frac{2\pi}{N}r}$

usualmente isso é feito em termos de $\cos(\pm) \pm j\text{sen}(\pm)$

3) Reordenar as amostras de modo que se possa operá-las diretamente. A sequência a ser usada depende do número de estágios, ou seja, do tamanho N do vetor a processar. Uma técnica usada nessa ordenação é a chamada "reversão de bits", vide Tabela 25.

Tabela 25 - Exemplos de reordenação pelo método de reversão de bits.

	Amostra Inicial	Ordem	Bits	Reverso final	Ordem
N=4	X(1)	0	00	00	0
	X(2)	1	01	10	2
	X(3)	2	10	01	1
	X(4)	3	11	11	3
N=8	X(1)	0	000	000	0
	X(2)	1	001	100	4
	X(3)	2	010	010	2
	X(4)	3	011	110	6
	X(5)	4	100	001	1
	X(6)	5	101	101	5
	X(7)	6	110	011	3
	X(8)	7	111	111	7

4) Uma vez ordenadas as amostras, realizam-se os cálculos das células:

$$X_{m+1}(p) = X(p) + W_r X(q)$$

Equação 34

$$X_{m+1}(p) = X(p) - W_r X(q)$$

Equação 35

Ou seja, a borboleta básica para todos os conjuntos p, q e todos os estágios m, varrendo os operadores W_r requeridos.

1.1.4. Frequência fundamental de amostragem

O ponto de partida são definições do sistema de aquisição de dados que estabelece o período de amostragem (T) e a quantidade de amostras (n), a qual que deve ser potência de 2.

Uma vez que não é possível identificar frequências com menos de 2 amostras por ciclo, a definição da taxa de amostragem delimita a parte superior do espectro que se pode identificar, enquanto a quantidade de amostras delimita a mínima frequência, pois quanto menor for a quantidade de amostras, para um dado T , menor o intervalo de tempo total amostrado (nT), o que implica na mínima frequência identificável ($2/nT$).

Como o sinal analisado é desconhecido, o estabelecimento da escala de frequência para o espectro deve ser construída sabendo que a posição inicial do vetor corresponde ao nível médio (frequência zero) e que a última posição corresponde a $(n-1)/nT$, ou seja, tende ao limite da frequência de amostragem.

No nosso caso, como o tempo de aquisição de uma leitura é de 233 microssegundos, terem-se uma frequência máxima de 4.291,8 Hz, o que implica numa frequência de Nyquist de 8.583 Hz, a partir da qual o espectro se mostra espelhado, conforme se vê no trabalho de Baptista [31], Figura 76.

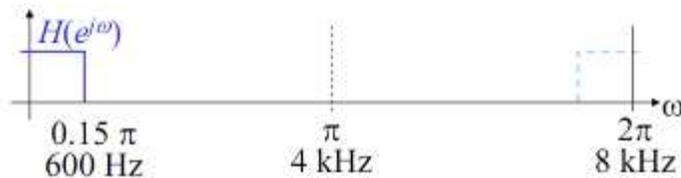


Figura 76 – Espelhamento do espectro.

Para ilustrar tal efeito, na Figura 77 vê-se o resultado onde nota-se o espelhamento do espectro.

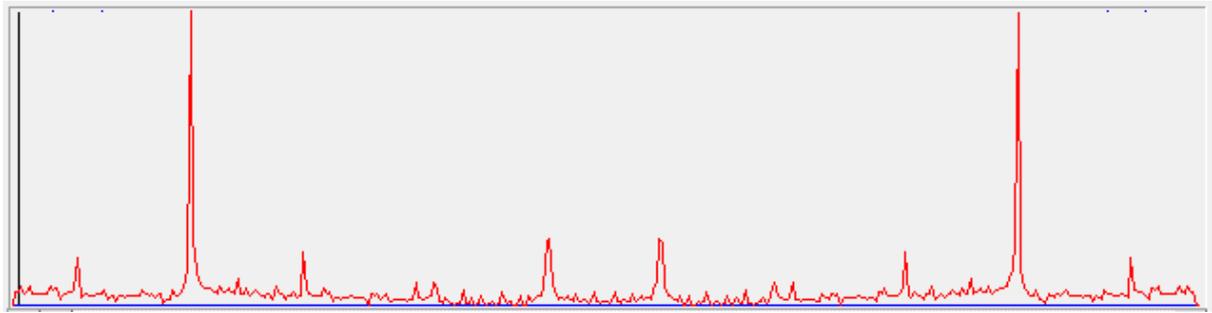


Figura 77 – Espelhamento do espectro do sinal medido.

A solução têm como consequência a perda da frequência máxima do espectro, ou seja “aproveita-se” a primeira metade do espectro de frequência, conforme ilustrado na Figura 78.

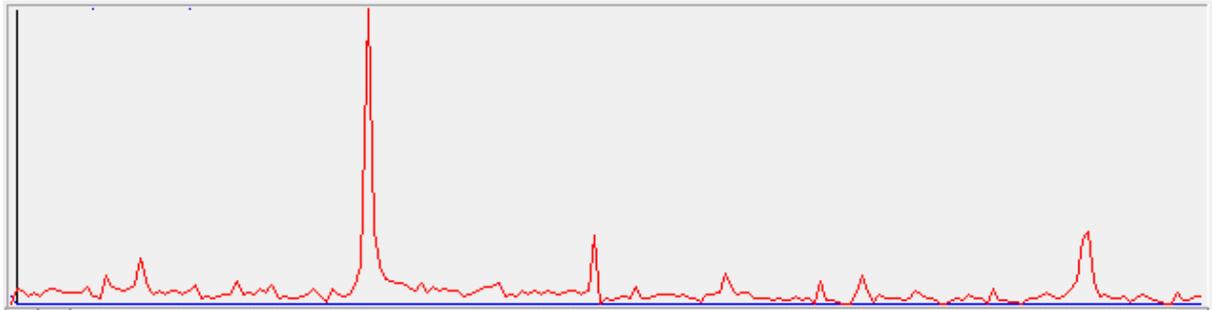


Figura 78 – Espectro com o espelhamento característico eliminado.

1.1.5. Verificação da rotina computacional

Para ilustrar e verificar o desempenho e exatidão das rotinas implementadas, inseriu-se digitalmente um sinal de onda quadrada de 30 Hz como sinal coletado e a rotina procedeu com a transformada de fourier do referido sinal.

É sabido que a transformada de fourier de uma onda quadrada contém apenas as harmônicas inteiras ímpares.

Utilizando a série de Fourier pode-se escrever uma onda quadrada ideal como uma série infinita da forma:

$$X_{quadrado}(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)t)}{(2k-1)}$$

Ou seja terem-se a somatória :

$$\text{sen}(t) + \text{sen}(3.t)/3 + \text{sen}(5.t)/5 + \text{sen}(7.t)/7 \dots \quad \text{Equação 36}$$

Para o sinal digital calculado pela rotina do sistema proposto, tendo o valor da amplitude da primeira harmônica em 24.131, vê-se que os valores calculados para os outros harmônicos ímpares estão de acordo com o esperado para a transformada de fourier do sinal, conforme observa-se no gráfico da Figura 79 e a Tabela 26 das frequências fundamentais lidas.

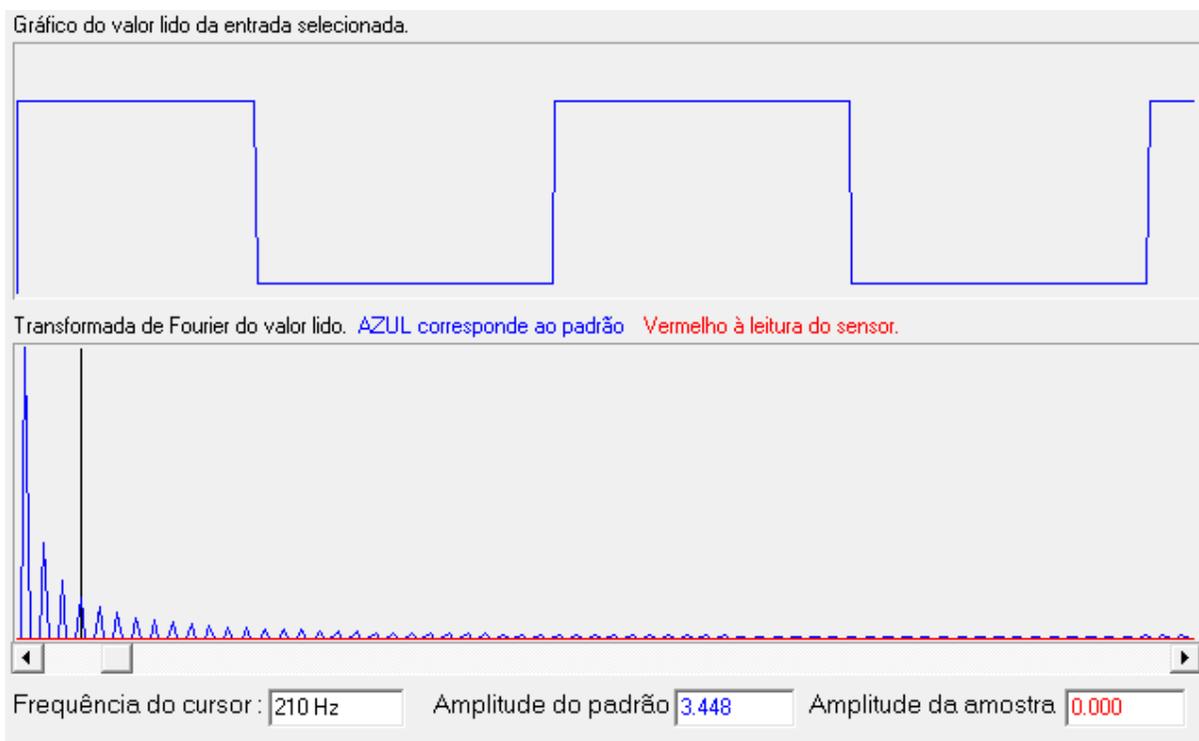


Figura 79 – Gráficos de onda quadrada padrão de 30 Hz e respectiva FFT calculada (cursor no 7o harmônico = 210 Hz).

Tabela 26 – Harmônicos fundamentais da onda quadrada de 30 Hz e amplitude de cada harmônico calculado a partir da onda gerada.

Harmônico	Frequência	Amplitude esperada	Amplitude medida	Erro
1	30	24,131	24,131	0,000%
3	90	8,044	8,044	0,004%
5	150	4,826	4,827	0,017%
7	210	3,447	3,448	0,021%
9	270	2,681	2,682	0,029%
11	330	2,194	2,194	0,012%
13	390	1,856	1,857	0,041%
15	450	1,609	1,610	0,079%
17	510	1,419	1,421	0,108%
19	570	1,270	1,271	0,075%
21	630	1,149	1,150	0,079%
23	690	1,049	1,051	0,174%
25	750	0,965	0,967	0,182%
27	810	0,894	0,895	0,141%
29	870	0,832	0,834	0,228%

Apêndice 2 – Combinação de variáveis das regras *Fuzzy*

1	Corrente fase a	X	Harmônico ia
2	Corrente fase a	X	Desequilíbrio de corrente
3	Corrente fase a	X	Tensão fase a
4	Corrente fase a	X	Harmônico tensão da fase a
5	Corrente fase a	X	Desequilíbrio de tensão
6	Corrente fase a	X	Vibração no eixo x
7	Corrente fase a	X	Harmônico x
8	Corrente fase a	X	Vibração no eixo y
9	Corrente fase a	X	Harmônico y
10	Corrente fase a	X	Vibração no eixo z
11	Corrente fase a	X	Harmônico z
12	Corrente fase a	X	Temperatura

72	Tensão fase a	X	Desequilíbrio de corrente
73	Tensão fase a	X	Vibração no eixo x
74	Tensão fase a	X	Harmônico x
75	Tensão fase a	X	Vibração no eixo y
76	Tensão fase a	X	Harmônico y
77	Tensão fase a	X	Vibração no eixo z
78	Tensão fase a	X	Harmônico z
79	Tensão fase a	X	Temperatura
80	Harmônico tensão da fase a	X	Desequilíbrio de tensão
81	Harmônico tensão da fase a	X	Desequilíbrio de corrente
82	Harmônico tensão da fase a	X	Vibração no eixo x
83	Harmônico tensão da fase a	X	Harmônico x

13	Harmônico ia	X	Desequilíbrio de corrente
14	Harmônico ia	X	Tensão fase a
15	Harmônico ia	X	Harmônico tensão da fase a
16	Harmônico ia	X	Desequilíbrio de tensão
17	Harmônico ia	X	Vibração no eixo x
18	Harmônico ia	X	Harmônico x
19	Harmônico ia	X	Vibração no eixo y
20	Harmônico ia	X	Harmônico y
21	Harmônico ia	X	Vibração no eixo z
22	Harmônico ia	X	Harmônico z
23	Harmônico ia	X	Temperatura
24	Corrente fase b	X	Harmônico ib
25	Corrente fase b	X	Desequilíbrio de corrente
26	Corrente fase b	X	Tensão fase b
27	Corrente fase b	X	Harmônico tensão da fase b

	a		
84	Harmônico tensão da fase a	X	Vibração no eixo y
85	Harmônico tensão da fase a	X	Harmônico y
86	Harmônico tensão da fase a	X	Vibração no eixo z
87	Harmônico tensão da fase a	X	Harmônico z
88	Harmônico tensão da fase a	X	Temperatura
89	Tensão fase b	X	Harmônico tensão da fase b
90	Tensão fase b	X	Desequilíbrio de tensão
91	Tensão fase b	X	Desequilíbrio de corrente
92	Tensão fase b	X	Vibração no eixo x
93	Tensão fase b	X	Harmônico x
94	Tensão fase b	X	Vibração no eixo y
95	Tensão fase b	X	Harmônico y
96	Tensão fase b	X	Vibração no eixo z
97	Tensão fase b	X	Harmônico z
98	Tensão fase b	X	Temperatura

28	Corrente fase b	X	Desequilíbrio de tensão
29	Corrente fase b	X	Vibração no eixo x
30	Corrente fase b	X	Harmônico x
31	Corrente fase b	X	Vibração no eixo y
32	Corrente fase b	X	Harmônico y
33	Corrente fase b	X	Vibração no eixo z
34	Corrente fase b	X	Harmônico z
35	Corrente fase b	X	Temperatura
36	Harmônico ib	X	Desequilíbrio de corrente
37	Harmônico ib	X	Tensão fase b
38	Harmônico ib	X	Harmônico tensão da fase b
39	Harmônico ib	X	Desequilíbrio de tensão
40	Harmônico ib	X	Vibração no eixo x
41	Harmônico ib	X	Harmônico x

99	Harmônico tensão da fase b	X	Desequilíbrio de tensão
100	Harmônico tensão da fase b	X	Desequilíbrio de corrente
101	Harmônico tensão da fase b	X	Vibração no eixo x
102	Harmônico tensão da fase b	X	Harmônico x
103	Harmônico tensão da fase b	X	Vibração no eixo y
104	Harmônico tensão da fase b	X	Harmônico y
105	Harmônico tensão da fase b	X	Vibração no eixo z
106	Harmônico tensão da fase b	X	Harmônico z
107	Harmônico tensão da fase b	X	Temperatura
108	Tensão fase c	X	Harmônico tensão da fase c
109	Tensão fase c	X	Desequilíbrio de tensão
110	Tensão fase c	X	Desequilíbrio de corrente
111	Tensão fase c	X	Vibração no eixo x
112	Tensão fase c	X	Harmônico x

42	Harmônico ib	X	Vibração no eixo y
43	Harmônico ib	X	Harmônico y
44	Harmônico ib	X	Vibração no eixo z
45	Harmônico ib	X	Harmônico z
46	Harmônico ib	X	Temperatura
47	Corrente fase c	X	Harmônico ic
48	Corrente fase c	X	Desequilíbrio de corrente
49	Corrente fase c	X	Tensão fase c
50	Corrente fase c	X	Harmônico tensão da fase c
51	Corrente fase c	X	Desequilíbrio de tensão
52	Corrente fase c	X	Vibração no eixo x
53	Corrente fase c	X	Harmônico x
54	Corrente fase c	X	Vibração no eixo y
55	Corrente fase c	X	Harmônico y
56	Corrente fase c	X	Vibração no eixo z
57	Corrente fase c	X	Harmônico z

113	Tensão fase c	X	Vibração no eixo y
114	Tensão fase c	X	Harmônico y
115	Tensão fase c	X	Vibração no eixo z
116	Tensão fase c	X	Harmônico z
117	Tensão fase c	X	Temperatura
118	Harmônico tensão da fase c	X	Desequilíbrio de tensão
119	Harmônico tensão da fase c	X	Desequilíbrio de corrente
120	Harmônico tensão da fase c	X	Vibração no eixo x
121	Harmônico tensão da fase c	X	Harmônico x
122	Harmônico tensão da fase c	X	Vibração no eixo y
123	Harmônico tensão da fase c	X	Harmônico y
124	Harmônico tensão da fase c	X	Vibração no eixo z
125	Harmônico tensão da fase c	X	Harmônico z
126	Harmônico tensão da fase c	X	Temperatura
127	Vibração no eixo x	X	Harmônico x
128	Vibração no eixo y	X	Vibração no eixo y

58	Corrente fase c	X	Temperatura
59	Harmônico ic	X	Desequilíbrio de corrente
60	Harmônico ic	X	Tensão fase c
61	Harmônico ic	X	Harmônico tensão da fase c
62	Harmônico ic	X	Desequilíbrio de tensão
63	Harmônico ic	X	Vibração no eixo x
64	Harmônico ic	X	Harmônico x
65	Harmônico ic	X	Vibração no eixo y
66	Harmônico ic	X	Harmônico y
67	Harmônico ic	X	Vibração no eixo z
68	Harmônico ic	X	Harmônico z
69	Harmônico ic	X	Temperatura
70	Tensão fase a	X	Harmônico tensão da fase a
71	Tensão fase a	X	Desequilíbrio de tensão

	eixo x		eixo y
129	Vibração eixo x	no	X Harmônico y
130	Vibração eixo x	no	X Vibração no eixo z
131	Vibração eixo x	no	X Harmônico z
132	Vibração eixo x	no	X Temperatura
133	Vibração eixo y	no	X Harmônico x
134	Vibração eixo y	no	X Harmônico y
135	Vibração eixo y	no	X Vibração no eixo z
136	Vibração eixo y	no	X Harmônico z
137	Vibração eixo y	no	X Temperatura
138	Vibração eixo z	no	X Harmônico x
139	Vibração eixo z	no	X Harmônico y
140	Vibração eixo z	no	X Harmônico z
141	Vibração eixo z	no	X Temperatura

Referências

[1] Almeida, Marcio Tadeu de. “Manutenção preditiva: benefícios e lucratividade”. Recuperado da Internet em 22/08/2012, pelo site: www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf

[2] BEZERRA, Roberto de Araújo, Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 1xx p. Tese (Doutorado).

[3] Tandon, N. and Choudhury, A., A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings, Tribology International. Vol. 32, pp. 469-480, 1999.

[4] Almeida, F. R. V. (2007), Análises estatísticas e reconhecimento de padrão aplicados em diagnósticos de defeitos em rolamentos através da análise de vibração. Tese

(Doutorado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica,

Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Itajubá.

[5] Filho, Prof. Flávio de Marco, Projeto de Máquinas 2. - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, CENTRO DE TECNOLOGIA - ESCOLA DE POLITÉCNICA - DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM

[6] Tissot, Fabrizio Duarte, Uma análise da proteção contra sobrecarga em motores assíncronos, Projeto de diplomação, Orientador Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil, dezembro de 2010

[7] Santos, J.T; 2007, Análise Modal Experimental de Eixos Trincados. Dissertação de Mestrado, Publicação, p133 – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, DF, p.133

[8] Almeida, M.T e Góz, R.D.S, "Análise e medidas de vibrações em máquinas"; FUPAI, Itajubá, 1988, 252p.

[9] Lima Jr., J. J., "Estudo comparativo entre diagnóstico de defeitos em máquinas rotativas por órbita e por espectro de frequência, usando aquisição de dados"; Dissertação de Mestrado, EFEI, Itajubá 1991, 142p.

[10] Reis, Aderson Jamier Santos. Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Rdes Neurais/ Aderson Jamier Santos Reis - Natal, RN, 2009 73 p.

[11] Thorsen, Olav Vaag & Magnus Dalva (1999), 'Failure identification and analysis for high-voltage induction motors in the petrochemical industry', IEEE Transactions on Industry Applications 35(4), 810-818.

[12] Vieira, Luciano, "Motores trifásicos – Aspectos Gerais" Universidade Estadual de Maringá – Departamento de Engenharia Agrícola Campus do Arenito. Disponível em <http://www.joinville.ifsc.edu.br/~eduardo.suzuki/Eletricidade%20Basica/motorestrifasicos.pdf> Acesso em 20 de jul. 2012

[13] UFRN "Manutenção em Motores Elétricos" Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Disponível em <http://www.dee.ufrn.br/~joao/manut/10%20-%20Cap%EDtulo%208.pdf> Acesso em 20 de jul de 2012

[14] Silva, Marcos Antonio da, Gonzales, Manuel Losada, INFLUÊNCIA DE FATORES DA MANUTENÇÃO QUE AFETAM A VIDA ÚTIL DOS MOTORES DE INDUÇÃO - Universidade Federal de Minas Gerais – VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais 17 a 20 de Agosto de 2008.

[15] Leles, A. F. F. (200), Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente à Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-024/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 112p.

[16] Belchior, Fernando Nunes, GENERALIDADES SOBRE DESEQUILIBRIOS DE TENSÃO - Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia , Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica

[17] OLIVEIRA, João Gabriel Souza Martins de. Materiais usados na construção de motores elétricos. Disponível em: http://www.motoreletrico.net/upload/materiais_motores.pdf, Acesso em 21 de maio de 2012.

[18] ALMEIDA, Maria Leonor Silva de. Avaliação da temperatura do motor de indução trifásico submetido a desequilíbrio de tensão. 2013. 137 f., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

[19] Estupiñan, Edgar A., Saavedra, Pedro N. Análise de vibração aplicada em máquinas rotativas de baixa velocidade. Revista Mundo Mecânico 2011, Universidade de Tarapacá, Casila 6-D Arica (Chile)

[20] Assunção, Frederico de Oliveira, TÉCNICAS DE ANÁLISE PREDITIVA PARA FALHAS ELÉTRICAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Sistemas Elétricos e Energia

[21] Mohamed El Hachemi Benbouzid, Michelle Vieira, and Céline Theys. “Induction Motor's Faults Detection and localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, NO. 1, January 1999, pp. 14-22.

[22] Moura, Dalma Lopes de, Proposta de Substituição de Motor de Indução Monofásico por Motor de Indução Trifásico no Meio Rural, Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica. Prof. Dr. Ângelo José Junqueira Rezek Universidade Federal de Itajubá Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

[23] Tandon, N. Nakra, B. C. The Shock and Vibration Digest, Vol. 24, 1992, N°3, pp. 3-10.

[24] Tandon, N. Choudhury, A. Tribology International, Vol. 32, 1999, pp. 469-480.

[25] Harris, T. A. Rolling Bearing Analysis. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 1966.

[26] Berry, E. B. Sound and Vibration, Vol. 25, 1991, N°11, pp. 24-27.

[27] Bezerra, Roberto de Araújo Detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração / Roberto de Araújo Bezerra .--Campinas, SP: [s.n.], 2004.

[28] McFadden, P. D. and Smith, J. D., Model for The Vibration Produced By Single Point Defect in a Rolling Element Bearing, Journal of Sound and Vibration , Vol. 96(1), pp. 69-81, 1984.

[29] An Introduction to Signal Processing and Fast Fourier Transform (FFT) © 2007, 2009 by Kevin J. McGee last revision: Mar. 10, 2010

[30] J. P. S. Rocha, S. M. Deckmann, "IT – 012 Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica] UNICAMP/FEEC/DSCE, Jul. 2010.

[31] Baptista, Manuel Antonio Esteves, FFT Sistemas de Processamento Digital/4º Ano, Instituto Superior Técnico, Disponível em: http://www.estv.ipv.pt/paginaspessoais/maeb/SPD/Teoricas_PDF/Aula%2012%20-%20PPT.pdf , Acesso em 22 de outubro de 2012.

[32] Ormenese, Marcela, Controlador fuzzy para otimização de sistemas de aquecimento de água com coletores solares / Marcela Ormenese. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

[33] SILVA, M.A.B., 2005, Sistema de Classificação Fuzzy para Áreas Contaminadas. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

[34] Bezerra, Saulo de Tarso Marques, Sistema Fuzzy para Controle Piezométrico de Sistemas de Distribuição de Água Visando à Economia de Água e Energia, Tese de D.Sc., Universidade Federal da Paraíba. Abril, 2009

[35] Fredy Sanz, Juan Ramírez and Rosa Correa, Fuzzy Inference Systems Applied to the Analysis of Vibrations in Electrical Machines, Cinvestav, México. Disponível em: <http://www.doc88.com/p-506830715860.html>, Acesso em 22 de outubro de 2012.

[36] Tagaki, T. & Sugeno M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, IEEE Transaction Systems., Man, Cybernetics., Vol. 15, pp. 116-132, ISSN 018-9472

[37] Moraes, Flávio José de Oliveira, Equipamento eletrônico de baixo consumo com comunicação sem fio para auxílio nas inspeções de detecção de roubo de energia elétrica / Flávio José de Oliveira Moraes. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

[38] Becker, Dr. Edwin and Ola Holstein. Alignment with target values reduces vibrations, PRÜFTECHNIK Condition Monitoring GmbH • 85737 Ismaning. Article published in Erneuerbare Energien 10/2007

[39] OMNITREND, Projeto para fornecimento de coletores de dados de vibração, MGS Tecnologia Representante PRUFTECHNIK Condition Monitoring para todo Brasil, Treinamento do sistema, maio 2012.

[40] KÜHLEIS, G. K. Detecção e Diagnosticagem de Problemas em uma Bancada de Testes de Rolamentos a Baixas Velocidades. 2010. 36f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.