# TIAGO REIS CALDAS

# DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO PORTÁTIL PARA DETECTAR FALHA EM ROLAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO, PELA TÉCNICA DO ENVELOPE, USANDO UM DSP DE 16 BITS E A TRANSFORMADA DE HILBERT

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos.

Orientador: Prof. Dr. Samuel E. de Lucena



## UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

"...

## TIAGO REIS CALDAS

ESTA DISSERTAÇÃO FOLJULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

> PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA ÁREA: PROJETOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira Coordenador

SPECTAINO

BANCA EXAMINADORA:

· hina

Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. INACIO BIANCHI Unesp-Feg

Prof. Dr. OSAMU SAOTOME>

TTA

Outubro de 2010

Caldas, Tiago Reis C145d Desenvolvimento de um instrumento portátil para detectar falha em rolamento de motor de indução, pela técnica do envelope, usando um DSP de 16 bits e a transformada de Hilbert / Tiago Reis Caldas – Guaratinguetá : [s.n], 2010. 74 f. : il. Bibliografia: f. 71 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2010. Orientador: Prof. Dr. Samuel Euzedice de Lucena 1. Vibração – medição I. Título CDU 534.1

# DADOS CURRICULARES

# TIAGO REIS CALDAS

NASCIMENTO	13.05.1982 – GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	Renato Pereira Caldas Maria Sylvia M. R. Caldas
2002/2007	Curso de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista - UNESP - Guaratinguetá
2008/2010	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista - UNESP

CALDAS, T. R.; DESENVOLVIMENTO DE UM INSTRUMENTO PORTÁTIL PARA DETECTAR FALHA EM ROLAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO, PELA TÉCNICA DO ENVELOPE, USANDO UM DSP DE 16 BITS E A TRANSFORMADA DE HILBERT. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

#### RESUMO

Em um ambiente industrial é responsabilidade da manutenção cumprir com as necessidades específicas de cada processo produtivo. Basicamente é necessário aumentar a disponibilidade e a confiabilidade dos equipamentos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento portátil para identificar precocemente problemas em rolamentos, utilizando o método conhecido como técnica de envelope ou HFRT (High Frequency Resonance Technique). A técnica de envelope é justificada como sendo a mais indicada para detectar defeitos de único ponto em rolamentos. Os principais componentes dos circuitos são apresentados, justificando a utilização. A programação do microcontrolador dsPIC33 foi feita em C, utilizando o MPLAB IDE da Microchip. Após a aquisição do sinal de aceleração, são aplicados alguns filtros e transformadas, sobretudo a transformada de Fourier com 1024 pontos amostrados em 5ksps, para cálculo do espectro da vibração. Como interface homemmáquina (IHM), foram utilizados um teclado e um mostrador gráfico que apresenta as amplitudes referentes às frequências de falha. Com base nos espectros e nas amplitudes, é possível comparar com os valores das normas vigentes (ISO 2372, ISO 3945 ou ISO 10816), gerando por fim um laudo sobre o estado dos rolamentos do motor elétrico. O protótipo foi testado utilizando os sinais gerados pelo Matlab/Simulink e apresentou um ótimo desempenho.

**PALAVRAS-CHAVE:** Medidor de Vibração. Manutenção Preditiva. Envelope. Falhas em Rolamentos. CALDAS, T. R. PORTABLE INSTRUMENT TO DETECT FAILURE IN INDUCTION MOTOR BEARING, BY THE TECHNIQUE OF ENVELOPE, USING A 16-BIT DSP AND HILBERT TRANSFORM. 2010. Thesis (Master's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

#### ABSTRACT

In an industrial environment is the responsibility of maintenance keeping the specific needs of each production process. Basically it is necessary to increase the availability and reliability of equipment. This work presents the development of a portable device to identify problems early on bearings, using the method known as technical envelope or HFRT (High Frequency Resonance Technique). The envelope technique is justified as being more suitable for detecting single point defects in bearing. The main components of the circuits are presented, justifying the use. The dsPIC33 microcontroller programming was done in C using Microchip's MPLAB IDE. After the acquisition of the acceleration signal, some filters are processed and applied, especially the Fourier transformed of 1024 points sampled in 5ksps to calculate the spectrum of vibration. As human interface (HMI), a keyboard and a graphical display were used which shows the amplitudes related to the failure frequency. Based on the spectra and the amplitudes, it is possible to compare the values of standards (ISO 2372, ISO 3945 or ISO 10816), finally originating a report about the state of electric motor bearings. The prototype was tested using the signals originated by Matlab / Simulink and it has presented a great performance.

**KEYWORDS**: Vibration Measurement. Predictive Maintenance. Envelope. Bearings Failures.

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo do Trabalho	9
2	REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1	Histórico	11
2.1.1	Primeira Geração	11
2.1.2	2 Segunda Geração	11
2.1.3	3 TERCEIRA GERAÇÃO	12
2.2	TIPOS DE MANUTENÇÃO	12
2.2.1	MANUTENÇÃO CORRETIVA	13
2.2.2	2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA	14
2.2.3	3 MANUTENÇÃO PREDITIVA	15
2.3	Fundamentos da Análise de Falha em Rolamentos	17
2.4	Analisadores de Vibração	23
2.5	TRANSFORMADAS UTILIZADAS NOS APARELHOS MEDIDORES DE VIBRAÇÃO	26
2.5.1	TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF)	26
2.5.2	2 TRANSFORMADA DE HILBERT	35
3	DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR DE VIBRAÇÃO PROPOSTO	37
3.1	HARDWARE	37
3.1.1	Unidade Sensora	37
3.1.2	2 Condicionamento	40
3.1.3	3 UNIDADE DE CONTROLE	41
3.1.4	PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	43
3.2	Software	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1	TESTE 1: RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE DIFERENTES AMPLITUDES	53
4.2	TESTE 2 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE 10 HZ A 300 HZ	55
4.3	TESTE 3 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE 500 HZ A 2500 HZ	58
4.4	TESTE 4 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA AM SSB COM PORTADORA DE 2,1 KHZ	61
4.5	TESTE 5 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA AM SSB COM PORTADORA DE 1 KHZ	63
4.6	TESTE 6 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA AM DSB COM PORTADORA DE 1 KHZ	66
5	CONCLUSÃO	70

# SUMÁRIO

# 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente exigência de se atingir grandes produções com índices de qualidade cada vez maiores, o setor industrial impôs novo paradigma para seu serviço de manutenção: manter os níveis de disponibilidade de seus equipamentos o mais próximo possível da utilização plena durante todas as horas do ano (ARATO JUNIOR, 2004). Dentro desse contexto, as técnicas de manutenção condicional – nas quais o equipamento é monitorado durante o funcionamento e paradas de produção são realizadas somente se identificada a presença de algum defeito a ser corrigido – tornaram-se absolutamente necessárias.

Máquinas elétricas são amplamente utilizadas e podem ser consideradas o núcleo da maioria dos processos produtivos. Em se tratando de motores de indução, 41% de todas as falhas estão relacionadas com os rolamentos (CUSIDÓ et al., 2009), consequentemente é de vital importância praticar a monitoração da condição dos rolamentos em máquinas elétricas. Dependendo da aplicação, devem ser empregadas estratégias adequadas para monitorar a condição do rolamento. Como principais métodos de acompanhamento, destacam-se a monitoração de vibrações, corrente do estator, monitoração da temperatura, análise química do lubrificante, monitoração de emissão acústica, monitoração de pressão sonora, monitoração do deslocamento com laser (WEI; HABETLER; HARLEY, 2007). No entanto, a vibração é a forma mais comum utilizada em aplicações industriais devido à facilidade de medição e análise (WANG; JIANU, 2010). A Tabela 1 (WEI; HABETLER; HARLEY, 2007) mostra um comparativo entre as técnicas mais consolidadas para a análise da condição de um rolamento.

Tabela 1- Comparativo das técnicas mais consolidadas	para a análise de rolamentos (WEI; HABETLER;
HARLEY, 2007).	

Técnica de Monitoração	Principais Vantagens	Principais Desvantagens	
Vibração	Confiável; Unificado; (Norma: IS010816)	- Caro; Intrusivo; Sujeito à falha do sensor	
Análise Química	Monitoração direta do rolamento e do óleo	<ul> <li>- Limitado para rolamentos com sistema de suprimento fechado</li> <li>- É necessário um especialista</li> </ul>	
Medição de Temperatura	Padrão disponível em algumas indústrias (Norma: EEE 841)	- É necessário um medidor de temperatura embutido e outros fatores podem causar o aumento da temperatura	
Emissão Acústica (frequência ultrassônica)	Alta relação sinal ruído	<ul> <li>Necessita do sensor para detecção acústica</li> <li>É necessário um especialista</li> </ul>	
Medição do Ruído	Fácil medição	- Ruído do ambiente deve ser isolado	
Medição de Deslocamento com Laser Alternativa para se medir a vibração do rolamento		<ul> <li>Necessita do sensor a laser</li> <li>Implementação complexa</li> </ul>	
Corrente do Estator Barata, não intrusiva, fácil implementação		<ul> <li>Possível baixa relação sinal ruído</li> <li>Encontra-se ainda em estágio de desenvolvimento</li> </ul>	

O rolamento é um dos componentes mais críticos em maquinários elétricos girantes, pois é nele que a grande maioria dos problemas aparece (YANG, 2007). Os modos de falha mais comuns em rolamentos são fadiga, desgaste, corrosão, lubrificação deficiente ou excessiva, assentamento irregular, contaminação e correntes parasitas. Para CUSIDÓ et al. (2009), a principal causa de falhas em rolamentos é a corrente circulante que aparece devido ao uso de conversores para acionamento do motor elétrico. Portanto, monitorando-se de forma adequada as condições dos rolamentos e tomando-se as devidas ações, tem-se a redução dos custos de manutenção e aumento da confiabilidade do equipamento.

Apesar da diversidade de estratégias para a monitoração de rolamento, as análises de vibrações e da corrente do estator são atualmente as mais pesquisadas e populares (WEI; HABETLER; HARLEY, 2007).

Técnicas de monitoração baseadas na vibração, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, foram extensamente usadas para descoberta e diagnóstico de defeitos durante várias décadas (MCINERNY; DAÍ, 2003). Uma análise no domínio do tempo enfoca principalmente as características estatísticas; já no domínio da frequência, procura apontar frequências de falha e amplitudes das vibrações causadas por algum componente da máquina.

É de notar que, na monitoração da condição de maquinário, o diagnóstico de falhas é uma das tarefas mais desafiadoras, porque um rolamento não é um componente mecânico simples (por exemplo, engrenagem ou eixo), mas um sistema composto constituído por anéis internos, externos, gaiolas e elementos rolantes. Cada componente rotativo do rolamento gera um sinal vibratório específico. As assinaturas de impacto geradas por um defeito no rolamento geralmente são de natureza não estacionária e de baixa amplitude, que são moduladas por outros componentes rotativos (por exemplo, engrenagens e eixos). Como resultado, é geralmente difícil extrair características relacionadas com a condição do rolamento (WANG; JIANU, 2010).

#### 1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema composto de novas tecnologias e baixo custo para substituir o clássico sistema de detecção de falhas que consiste em *hardware*, sensores, amplificadores, filtros, placa de aquisição de dados e um computador para processamento, que segundo WANG e JIANU (2010) são sistemas caros e inconvenientes para aplicações industriais reais.

Os microcontroladores estão cada vez mais baratos, mais rápidos e incorporando o *hardware* de aquisição de dados (por exemplo, sensores, amplificadores, filtros e conversores A/D), o que possibilita a integração de algumas técnicas de processamento de sinais (WANG; JIANU, 2010). O microcontrolador dsPIC33FJ256MC710, que foi utilizado nesse projeto, é um dos mais recentes microcontroladores de 16 bits da Microchip, custando aproximadamente U\$ 8,00 a unidade e capaz de realizar o processamento digital dos sinais. O sistema será desenvolvido para utilizar como transdutor o acelerômetro de tecnologia microeletromecânica conhecida como MEMS. As aplicações incorporando o MEMS vêm crescendo numa taxa exponencial e, ao longo dos próximos 5 anos, o crescimento continuará a uma taxa de 13% ao ano. Eles são fáceis de usar, permitindo inclusão de vários dispositivos em um único pacote, com encapsulamento selado, hermético e, por último, eles fornecem estabilidade mecânica sob gamas de temperaturas extremas (SCHUBRING; FUJITA, 2007). A incorporação do transdutor MEMS ficará para etapas futuras.

Neste trabalho será utilizado um mostrador gráfico, teclado matricial de membrana, amplificadores com ganho programável, referência de precisão e o dsPIC33. Através da integração destes componentes e do processamento digital de sinais, deseja-se chegar a um produto de baixo custo, visando difundir os benefícios desta técnica no meio industrial nacional. Tal equipamento terá como entrada o sinal de um transdutor (acelerômetro MEMS), que será fixado ao motor elétrico por meio mecânico (cimentamento), visando analisar a vibração em seus rolamentos, utilizando o método de envelope, que permite detectar frequências de falha em rolamentos.

A Figura 1 mostra um diagrama com os principais blocos do sistema de medição de vibração desenvolvido.



Figura 1- Diagrama de blocos do sistema de medição de vibração desenvolvido.

# 2 REVISÃO DA LITERATURA

#### 2.1 HISTÓRICO

Desde os anos 30 a manutenção vem se desenvolvendo devido à crescente conscientização de que a falha em um equipamento acarreta muito mais do que uma simples parada de produção. As falhas afetam a segurança, o meio ambiente, e a qualidade do produto. As eras da manutenção podem ser divididas em 3 gerações (KARDEC; NASCIF, 2001).

## 2.1.1 PRIMEIRA GERAÇÃO

Abrange o período antes da segunda guerra mundial, quando a indústria possuía equipamentos simples e era pouco mecanizada. A manutenção era puramente corretiva, com serviços de limpeza, lubrificação, estoque de materiais ao "pé da máquina" (estoque ao lado do maquinário). Nessa época o importante era conseguir produzir, porém a produtividade, a qualidade e a eficiência não eram prioritárias.

#### 2.1.2 SEGUNDA GERAÇÃO

Período que vai da segunda guerra mundial até os anos 60. Como era de se esperar, a guerra alavancou a produção de muitos tipos de produto, sendo necessário modernizar a produção, mecanizando e aumentando a eficiência dos equipamentos.

O conceito de disponibilidade começa a ser empregado, gerando a necessidade de equipamentos que não falhassem durante a produção, ou seja, evidenciou-se a manutenção preventiva. Na década de 60 a manutenção consistia basicamente em intervenções com intervalos predeterminados.

Juntamente com as intervenções em intervalos fixos, surgiu a necessidade de se planejar as paradas de forma eficiente. Uma parte integrante deste processo foi o PCM, sistema de planejamento e controle da manutenção.

A segunda geração aumentou de forma considerável os gastos com a manutenção, pois foi necessário expandir o setor, agregando a este um sistema de planejamento e controle da manutenção. Esse aumento do capital investido tornou

inevitável a busca de um novo panorama para a manutenção, buscando explorar de forma consciente o máximo de cada componente, substituindo-o somente quando necessário, ou seja, antes que viesse a falhar.

## 2.1.3 TERCEIRA GERAÇÃO

A terceira geração teve início nos anos 70, quando se tornou necessário produzir com eficiência, qualidade e baixo custo. Houve uma tendência mundial para a utilização do sistema *just-in-time*<sup>[1]</sup>.

Nessa época a automação e a mecanização, que estavam em crescimento, se tornaram pontos chaves para atuarem em postos que afetassem a segurança, o meio ambiente ou a saúde do funcionário.

O comprometimento com as entregas, com os padrões de exigências aumentando rapidamente, com a consciência de disponibilidade, segurança, saúde e meio ambiente, forçou o conceito da necessidade de se prever uma falha, quando surgiu a manutenção preditiva.

## 2.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

No meio industrial todos os esforços da equipe de manutenção estão focados na melhoria da confiabilidade do equipamento. Logo, é de responsabilidade deste setor aumentar sua durabilidade, que, conseqüentemente, influenciará no aumento do tempo disponível e, com isso, no aumento da produção.

Existem basicamente três tipos de manutenção e uma indústria está bem gerenciada quando utiliza os pontos positivos de cada tipo. Diferentes instalações requerem diferentes modos de manutenção. Para cada tipo de manutenção há pontos positivos e negativos.

<sup>[1]</sup> Just-in-time é um sistema de administração da produção que determina que nada deve ser produzido, transportado ou comprado antes da hora exata.

## 2.2.1 MANUTENÇÃO CORRETIVA

A manutenção corretiva é também conhecida como manutenção baseada na ruptura (MBR), ou seja, as devidas ações são tomadas somente quando o equipamento apresentar falha. Enquanto o equipamento não apresentar avaria, nenhum integrante do setor de manutenção toma qualquer providência.

#### Vantagens:

- Não há necessidade de um setor específico para gerenciar possibilidades de falhas, nem análise de falhas;
- Teoricamente existe um maior aproveitamento do ativo, pois este só é substituído depois de falhar. Porém é necessário compreender que em alguns casos uma falha pode acarretar em outra falha; um exemplo é o caso de uma bomba hidráulica que, ao falhar e travar, acarreta a quebra de um acoplamento em bom estado.

#### Desvantagens:

- Necessidade de grande quantidade de repostos (materiais em estoque), muitas vezes materiais caros e de difícil estocagem;
- Parada de produção inesperada, podendo ocasionar dificuldades para atender prazos de entrega, pois a parada não estava programada;
- Baixa qualidade dos serviços, pois o tempo para reparo é relativamente pequeno;
- Dificuldade para balancear a equipe de manutenção, pois existem picos de trabalho;
- O custo de manutenção aumenta fortemente à medida que os equipamentos envelhecem.

#### 2.2.2 MANUTENÇÃO PREVENTIVA

A manutenção preventiva, também conhecida como manutenção baseada no tempo (MBT), é aquela fundamentada em métodos estatísticos que estudam basicamente as falhas e os períodos entre elas. Esta análise consiste em identificar qual o período que um equipamento funciona antes de falhar e utilizar este tempo para programar as futuras trocas. Além deste foco na falha, a preventiva visa aumentar a disponibilidade dos equipamentos com controle de lubrificações periódicas, limpeza e utilização dos quatros sentidos do ser humano (visão, audição, tato, olfato) para identificar possíveis defeitos.

Vantagens:

- As paradas são planejadas conforme calendário da empresa, diminuindo as paradas inesperadas;
- A qualidade da manutenção é relativamente alta, pois existe tempo previsto e balanceado para cada atividade;
- Planejamento dos materiais que serão utilizados, reduzindo a necessidade de materiais no estoque;
- Melhora a segurança, pois o serviço é discutido previamente juntamente com a análise dos riscos;
- Facilita o contrato com empresas terceirizadas.

Desvantagens:

- Necessidade de uma equipe para estudar as falha e propor, com base estatística, as paradas planejadas;
- Risco da troca de componentes em perfeito estado devido à síndrome da precaução ou erro no período de troca do equipamento;
- Expor os equipamentos a possíveis danos. A desmontagem e a montagem aumentam o risco de introdução de novos defeitos;
- Risco de aumento dos custos de manutenção por uma estimativa muito conservadora;

- Teoricamente existe um aumento no custo da produção, pois o tempo útil de atividade da planta agora deve ser reduzido pela programação das manutenções.

## 2.2.3 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva, também conhecida como manutenção baseada na condição (MBC), é aquela que procura programar as intervenções fundamentadas em informações reveladoras das condições reais e individualizada de cada equipamento. Estas condições são resultado de estudos das tomadas periódicas ou contínuas dos valores de certas variáveis que caracterizam o estado operativo do equipamento. A finalidade deste estudo é indicar precocemente os defeitos de cada equipamento e programar a intervenção, caso os níveis estejam acima do limite. Os métodos mais empregados são:

- Análise de óleo:

- Análise da natureza das partículas;
- Estudo das dimensões das partículas;
- Morfologia das partículas.

- Métodos de observação:

- Termografia;
- Endoscopia;
- Molde e impressão;
- Líquidos penetrantes;
- Partículas magnéticas;
- Ecografia;
- Ultrassom;
- Emissão acústica;
- Radiografias;
- Análise modal;
- Interferometria holográfica.

- Análise de vibração:

- Média temporal síncrona;
- Envelope;
- Diagrama tipo órbita.

Como o intuito deste trabalho é desenvolver um aparelho para detecção de falhas em rolamentos, o tema da análise de vibração será abordado com maior profundidade na próxima seção.

A seguir pontuam-se as vantagens e desvantagens da manutenção preditiva.

Vantagens:

- A monitoração pode ser feito com o processo produtivo em funcionamento;
- Os componentes defeituosos são trocados após o máximo aproveitamento;
- Aumento da disponibilidade dos equipamentos, pois as interrupções inesperadas de produção são reduzidas;
- Melhor planejamento da parada, pois são conhecidos os componentes que serão trocados;
- Aumento da segurança, pois, com a programação das paradas, é possível conhecer e estudar os riscos previamente.

Desvantagens:

- Necessidade de uma equipe especializada;
- Equipamentos de monitoração relativamente onerosos;
- Resultados em médio prazo, pois utiliza o conceito de banco de dados e análise por comparação.

Após verificar-se os diversos tipos de manutenção e suas principais características, é interessante observar que não existe um único tipo que seja completamente vantajoso. Na gestão da manutenção deve-se ter em mente que a melhor forma é integrar todos os tipos apresentados.

É importante destacar que existe uma grande diferença entre detectar o problema em um maquinário e analisar a real causa que levou certo componente a falhar. Substituir um rolamento defeituoso, detectado por meio da análise de vibração, significa prever e programar de forma estruturada a troca deste rolamento, porém não impedirá que o novo rolamento falhe novamente. É necessário estudar a falha, levantando à causa raiz, identificando e atacando o motivo da falha precoce de um rolamento, a fim de que o problema não se torne crônico.

## 2.3 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE FALHA EM ROLAMENTOS

A vibração pode ser entendida com um movimento oscilatório em torno de um ponto de referência. Num caso ideal, nenhuma máquina apresentaria qualquer vibração, uma vez que todos seus componentes seriam perfeitos. Porém é sabido que esta situação não condiz com a realidade, logo se faz necessário a medição desta grandeza, a fim de se tomar as devidas providências quando esta exceder valores limites (ARATO JUNIOR, 2004).

Toda máquina que possui componentes dinâmicos é susceptível a problemas com vibração, e logicamente as que possuem rotação apresentam vibração excessiva, uma vez que a deterioração do equipamento leva a uma modificação na distribuição de energia, causando um aumento dos níveis vibratórios. Como cada problema mecânico gera uma vibração, é possível medir e analisar essa vibração, identificando a falha mecânica.

Baseado na geometria do rolamento (Figura 2), na velocidade de rotação e no fato dos rolamentos estarem com a pista externa estacionária, é possível calcular as frequências de falha de um rolamento conforme equações (1), (2) e (3) (HARRIS<sup>[2]</sup>, 1997 apud JAGANNATH; RAMAN, 2007).

<sup>[2]</sup> C. M. HARRIS; Shock and Vibration Handbook. **Journal of Engineering and Applied Science**, v 45, n 3, p 143, May-June 1997 apud, JAGANNATH; B. RAMAN; WiBeaM: Wireless Bearing Monitoring System; Communication Systems Software and Middleware, 2007. **COMSWARE 2007**. 2nd International Conference, p 1-8, JAN. 2007.

Segundo JAGANNATH e RAMAN (2007) as frequências de falhas nos rolamentos são divididas conforme as equações abaixo:

A frequência de falha na pista externa pode ser definida como,

$$f_{PE} = \left\{\frac{n.N}{2}\right\} \times \left\{1 - \left(\frac{d_E}{D}\right) \times \cos(\alpha)\right\}$$
(1)

Já a frequência de falha na pista interna pode ser definida como,

$$f_{PI} = \left\{\frac{n.N}{2}\right\} \times \left\{1 + \left(\frac{d_E}{D}\right) \times \cos\left(\alpha\right)\right\}$$
(2)

E por fim, a frequência de falha na esfera pode ser definida como,

$$f_E = \left\{\frac{N}{2}\right\} \times \left\{\left(\frac{D}{d_E}\right) - \left(\frac{d_E}{D}\right) \times \cos(\alpha)^2\right\}$$
(3)



Figura 2 - Figura 2a representa os elementos de um rolamento de esferas (FONTE: Site SKF), a Figura 2b representa a geometria do rolamento em corte transversal (FONTE: JAGANNATH; RAMAN, 2007).

A Figura 2b representa um corte transversal de ¼ do rolamento, destacando o ângulo de contato, diâmetro primitivo e diâmetro da esfera.

Os parâmetros das equações (1), (2) e (3), conforme definidos na Figura 2b, tem os seguintes significados:

- $\alpha$  é o ângulo de contato;
- D é o diâmetro primitivo do rolamento;
- $d_E$  é o diâmetro da esfera;
- n é o número de esferas;
- N é a velocidade (em rotações por minuto, RPM) do eixo do motor.

Quando o defeito em uma superfície de um rolamento golpeia outra superfície, produz uma força impulsiva que pode excitar ressonância no rolamento e na máquina. Como o rolamento gira, estes impulsos ocorrerão periodicamente (Figura 3), com uma frequência que é determinada exclusivamente pela localização do defeito, seja ele sobre a pista interior, exterior ou nos elementos rolantes (MCFADDEN; SMITH, 1984).



Figura 3 - Resposta impulsiva periódica ocasionada pela falha.

A análise de vibração para diagnosticar falhas em rolamento pode ser dividida em análise no domínio do tempo e no domínio da frequência. Na Figura 4 é possível se ver a correlação entre o domínio do tempo e o domínio da frequência. O observador A está olhando, no primeiro plano, a forma de onda no domínio do tempo, já o observador B está olhando, no primeiro plano, as amplitudes no domínio da frequência formadas pelas frequências do sinal temporal.



Figura 4 - Correlação entre o domínio do tempo e o domínio da frequência. (FONTE: MOBLEY, 1999)

Na análise no domínio do tempo, uma falha no rolamento é diagnosticada com a ajuda de alguns índices estatísticos (por exemplo, valor RMS, fator de crista ou curtose); no entanto, a maioria destes índices de monitoração é sensível aos ruídos e às condições de funcionamento. A análise no domínio da frequência pode ser a abordagem mais fundamental para a detecção de falhas em rolamentos. As condições do rolamento são avaliadas examinando-se os componentes de frequências características relacionadas a falhas e presentes no espectro (WANG; JIANU, 2010).

Curtose, que é uma análise estatística no domínio do tempo, não se tornou um método muito popular na indústria para a monitoração de condição de rolamentos. A eficiência deste método, na detecção de falhas, é duvidosa. (TANDON; CHOUDHURY, 1999).

A análise de um sinal de vibração com modulação de amplitude baseia-se normalmente na técnica de ressonância em alta frequência (MCFADDEN; SMITH, 1984). O fenômeno da modulação de amplitude acontece porque um sinal de alta frequência porta um sinal modulante de baixa frequência. Assim, o sinal modulado é o produto do sinal modulante pelo sinal da portadora. O sinal modulante é o impacto causado pelos defeitos no rolamento, enquanto o sinal da portadora é uma combinação das frequências de ressonância do rolamento ou mesmo do sistema mecânico, cuja frequência é geralmente superior a 2 kHz. A frequência do sinal modulante será sempre muito menor do que a do sinal da portadora. Para lidar com a modulação em amplitude, utiliza-se a técnica do envelope, que tenta desacoplar o sinal modulante de baixa frequência do sinal modulado. Essa técnica tira proveito da ausência de ruídos mecânicos de baixa frequência, consequentemente fornecendo um sinal demodulado de baixa frequência com uma elevada relação sinal ruído (YUH-TAY, 2007).

A técnica do envelope realiza processamento na banda de alta frequência e tem considerável potencial para fornecer uma medição robusta do *stress* e da condição do rolamento (GOODENOW; HARDMAN; KARCHNAK, 2000).

ORHAN, AKTURK e ÇELIK (2005) investigaram técnicas de diagnóstico em rolamentos com elementos de esfera e rolos. Folgas em rolamento de esferas, defeito na pista externa do rolamento de esferas e defeito de pista externa em rolamento de rolos foram diagnosticados com êxito. Foi mostrado que defeitos em rolamentos de esferas e rolos evoluem de forma idêntica, independentemente do tipo de elemento do rolamento. Além disso, foi mostrado que, quando um defeito no rolamento atinge uma fase avançada, os níveis de amplitude de alta frequência freqüentemente diminuem.

Uma frequente dúvida está relacionada com a quantidade de defeitos num rolamento e como estes aparecem no espectro. As falhas nos rolamentos podem ser categorizadas em dois grupos principais: defeito de único ponto e defeito generalizado, conforme ilustra a Figura 5. Assim, os métodos de diagnóstico para estes dois grupos são diferentes (SADOUGHI; BEHBAHANIFARD, 2008).



Figura 5 - Fotos mostrando os tipos de defeito. Em a) observa-se um defeito de único ponto, em b) observa-se o defeito generalizado. (FONTE: *Site* da SKF)

Segundo STACK, HABETLER e HARLEY (2004), o defeito de um único ponto é definido como um defeito único e localizado na superfície do rolamento. Um exemplo comum é uma cárie (*pit*). Um defeito de único ponto produz uma das três frequências características de falha, conforme mostrado nas equações (1), (2) e (3), dependendo de qual superfície do rolamento contém o dano. Essas frequências são previsíveis e normalmente se refletem na corrente do estator.

Já o defeito generalizado é o tipo de falha em que a condição da superfície do rolamento está degradada consideravelmente ao longo de uma grande área, tornando-a irregular ou deformada. Esse dano pode ou não ser visível a olho nu. No entanto, não há nenhum defeito localizado para ser identificado como falha, pois agravou-se tomando uma grande área da superfície do rolamento. Um exemplo comum é o defeito generalizado causado pela contaminação ou perda de lubrificante, que é difícil de se prever e não há nenhuma frequência característica presente no sinal da vibração devido à falha.

PATEL et al. (2006) efetuaram alguns experimentos com vibrações causadas pelo defeito generalizado, concluindo que realmente não é possível correlacionar estes com as frequências características de falha. Estes autores afirmam que a maioria dos aparelhos comerciais para análise de vibração é inadequado para caracterizar defeitos generalizados em rolamentos.

O fenômeno acima não invalida o objetivo deste trabalho, uma vez que um grande número de defeitos em rolamentos apresenta inicialmente defeitos de único ponto (SADOUGHI; BEHBAHANIFARD, 2008). Logicamente, com os defeitos de único ponto diagnosticados, as ações podem ser tomadas a fim de aumentar a confiabilidade do maquinário.

#### 2.4 ANALISADORES DE VIBRAÇÃO

ANSARI e BAIG (1998) implementaram um sistema para análise de vibrações, em linguagem C, utilizando um computador convencional 486 de 66 MHz. O projeto contém alguns algoritmos especiais para janelamento, filtragem digital e banco de dados, possibilitando analisar sinais de até 10 kHz. Os autores utilizaram um transdutor piezoelétrico com faixa de  $\pm$  75 g, sensibilidade de 100 mV/g (para 100 Hz), e largura de banda de 10 kHz. O sistema mostrou-se capaz de identificar problemas de vibração em motores, porém, como é reportado, a técnica de envelope não foi citada e o sistema foi montado utilizando um computador convencional, aumentando o custo e dificultando a portabilidade do instrumento.

BETTA et al. (2001) desenvolveram um analisador de falhas para máquinas elétricas rotativas utilizando FFT com 2048 pontos (amostras). Foram utilizados dois DSPs com A/D de 16 bits. O sistema se mostrou confiável em mais de 99% das simulações. O *hardware* e o *software* foram otimizados para uma classe específica de motores assíncronos de pequeno porte, trifásico e com dois pares de pólos, deixando o sistema proposto para aplicações muito específicas. Os autores destacaram que um efetivo analisador de espectro visando monitorar e diagnosticar *on-line* deve conter as seguintes características:

- Análise em tempo real, assegurando prontidão na detecção da falha;

 Opções para escolha da frequência de amostragem, número de pontos e tipo de janelamento. Essas escolhas visam proporcionar maior sensibilidade e seletividade na identificação das falhas;

- Software dedicado integrado ao sistema.

Além disso, pode-se citar a importância de se ter como requisito:

- portabilidade;
- baixo custo;
- facilidade de utilização.

BETTA et al. (2001) fizeram a montagem do sensor na carcaça do motor magneticamente, quando a forma mais correta é utilizar solda, ou cola, para unir o sensor à carcaça, se necessário utilizando uma peça intermediária (Figura 6) soldada à carcaça, com o sensor roscado na parte superior. Além disso, a comunicação entre

alguns dispositivos não era padronizada, não foi citada a utilização da demodulação para utilizar a técnica do envelope, pois a finalidade do projeto não era detectar problemas nos rolamentos, e, por fim, utilizaram um método emulado para testar o sistema, ou seja, não foi testado numa bancada com um motor real.



Figura 6 - Peça intermediária para fixação do sensor (ver texto). (FONTE: MOBLEY, 1999)

QING, BIN e DONGMEI (2009) desenvolveram um analisador de vibração utilizando Windows CE e S3C2440 de 400 MHz. Apesar de toda tecnologia embarcada neste componente, os autores dizem ser necessário um A/D externo de 24bit (ADS1274), um amplificador de ganho controlado (LTC6910-2) e um filtro de 10<sup>a</sup> ordem passa-baixa (LTC1569). Foi utilizado o LCD LS037V7DW03 (480×640 com 3,7") responsável por mostrar os gráficos de vibração, porém nenhuma foto do projeto ou da tela foi apresentada. Não foi mostrada nenhuma análise das medições ou testes do projeto em bancada. Os autores dizem que um sistema para monitoração montado com DSP está sujeito a baixo desempenho, análise em tempo real limitada, ou seja, citam de forma genérica o DSP, não fazendo qualquer distinção entre os vários modelos que existem no mercado. Atualmente existem DSPs como o Blackfin, da família de 32 bits da Analog Device Inc., com operação até 750 MHz, que poderiam atender a esse mesmo projeto feito com o S3C2440.

CONTRERAS-MEDINA et al. (2009) projetaram um analisador de baixo custo com FPGA (*Field-Programmable Gate Arrays*) de aproximadamente U\$50, visando aplicações industriais de multicanais para detecção de falhas em motores de indução. Os autores reforçam a facilidade da utilização dos FPGAs que são rápidos e facilmente reconfigurados sem a necessidade de mudança no *hardware*. O sistema proposto é capaz de identificar automaticamente falhas no motor, através da monitoração contínua, e foram feitos três experimentos em motores de indução de 1 HP. Os autores afirmam que os analisadores de uso geral são caros, a maioria não é focada na indicação de problemas em motores de indução e não são adequados para montagem permanentemente em motores.

No artigo acima citado, os autores dizem que utilizar somente FFT não traz grandes resultados, basicamente por causa do efeito *leakage* e da susceptibilidade a ruído (PROAKIS; MANOLAKIS<sup>[3]</sup>, 1995 apud CONTRERAS-MEDINA et al. 2009). Por esse motivo, o sistema por eles apresentado utiliza o periodograma de Bartlett.

De acordo com CUSIDÓ et al. (2009), 41% das falhas em motores elétricos estão relacionadas com os rolamentos, ou seja, vale a pena fazer uma análise de envelope para identificar as frequências de falha dos rolamentos. Apesar disso, o sistema proposto por CONTRERAS-MEDINA et al. (2009) não inclui esta análise.

<sup>[3]</sup> J. Proakis; D. Manolakis, **Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1995 apud J. CUSIDÓ et al. **On-Line Measurement Device to Detect Bearing Faults on Electric Motors**; Intrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE 5-7 May 2009 Page(s):749 – 752.

#### 2.5.1 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (TDF)

A transformada de Fourier propicia uma maneira diferente de interpretar os sistemas e os sinais.

Um algoritmo muito conhecido foi publicado por Cooley e Turkey em 1965, conhecido como decimação no tempo, cujo principal objetivo é facilitar e tornar mais rápido o processamento da transformada de Fourier.

A TDF pode ser escrita como:

TT ( 1 )

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} , \quad k = 0, 1, ..., N - 1$$
(4)

A transformada inversa discreta de Fourier (TIDF) é

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) W_N^{-nk} , \quad n = 0, 1, ..., N-1$$
(5)

onde a sequência é periódica em k com o período igual a N, e:

x(n) = Valores amostrados no domino do tempo

$$X(k) = \text{Transformada de Fourier para o sinal amostrado}$$

$$W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)kn}$$
(6)

Imagine a TDF de N pontos de uma sequência de N pontos de x(n), representada pela equação (4). Como x(n) pode ser real ou imaginária, o cálculo de X(k) requer, para cada valor de k, um número da ordem de N de multiplicações e de somas complexas. Logo, como existem N valores de X(k), o cálculo de uma TDF de N pontos requer N<sup>2</sup> multiplicações e somas complexas (MONSON, 2006).

A estratégia fundamental, usada nos algoritmos de FFT, é "dividir para conquistar", a qual abrange a decomposição de uma TDF de N pontos em TDFs sucessivamente menores. Se x(n) é par e for decimada (dividida) em duas sequências de comprimento N/2, logo, o cálculo de TDF de N/2 pontos de cada uma dessas

sequências exige aproximadamente  $(N/2)^2$  multiplicações e o mesmo numero de somas. Portanto, as duas TDFs exigem apenas  $2(N/2)^2 = \frac{1}{2} \cdot N^2$  multiplicações e somas. Logo, é possível processar a TDF de N pontos de x(n), a partir dessas duas TDFs de N/2 pontos, computando um número inferior a  $N^2/2$ , ou seja, facilitando o processamento (MONSON, 2006).

Existem basicamente duas classes de algoritmos para FFT, conhecidos como FFT com decimação no tempo e FFT com decimação na fequência (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975).

A FFT com decimação no tempo consiste em decimar x(n) em sequências menores e encontrar as X(k) das TDFs dessas sequências decimadas. Na segunda classe de algoritmos, a sequência dos coeficientes da TDF é decomposta em subseqüências menores.

A FFT com decimação na frequência consiste em dividir a sequência de saída, X(k), em subseqüências cada vez menores, da mesma maneira que a FFT com decimação no tempo trabalha.

Detalha-se a seguir cada uma destas formas de processamento.

#### 2.5.1.1 FFT COM DECIMAÇÃO NO TEMPO

Para atingir um aumento considerável na eficiência, é necessário decompor a TDF em sequências sucessivas e menores. Nesse processo explora-se tanto a simetria quanto a periodicidade da exponencial complexa  $W_N^{kn} = e^{-j(2\pi/N)kn}$ . O princípio da decimação no tempo é convenientemente ilustrado, considerando-se o caso especial para N inteiro e potência de 2 (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975).

#### $N = 2^{\nu}$

Uma vez que N é par e inteiro, considera-se o cálculo de X(k) separando x(n) em duas sequências de N/2 pontos, formadas com termos de índices pares e ímpares.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} , \ k = 0, 1, ..., N - 1$$
(7)

Separando as sequências pares e ímpares, tem-se:

$$X(k) = \sum_{n \ par} x(n) W_N^{nk} + \sum_{n \ impar} x(n) W_N^{nk}$$
(8)

Substituindo as variáveis n = 2r para os termos pares e n = 2r+1 para os termos ímpares, obtém-se

$$X(k) = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_N^{(2r+1)k} = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) (W_N^2)^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) (W_N^2)^{rk}$$
(9)

Como  $W_N^2 = W_{N/2}$ 

$$W_N^2 = e^{-2j(2\pi/N)} = e^{-j2\pi/(N/2)} = W_{N/2}$$
(10)

consequentemente pode-se escrever a equação (9) como

$$X(k) = \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r) W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{(N/2)-1} x(2r+1) W_{N/2}^{rk} = G(k) + W_N^k H(k)$$
(11)



Figura 7 – Modelo da decimação no tempo, decompondo a TDF de N pontos em duas de N/2 pontos (para o exemplo N=8)

Nota-se que na Figura 7 existem duas TDF de 4 pontos, sendo G(k) designada para a parte par e o H(k), para a parte ímpar. X(0) é obtido multiplicando-se H(0) por

 $W_N^0$  e somando-se com G(0). X(1) é obtido multiplicando-se H(1) por  $W_N^1$  e somandose com G(1).

Poderia-se pensar em obter X(4) multiplicando-se H(4) por  $W_N^4$ , somando com G(4), porém como ambos G(k) e H(k) possuem período igual a 4, logo G(4) = G(0) e H(4) = H(0). Sendo assim, X(4) é obtido multiplicando-se H(0) por  $W_N^4$  e somando-se com G(0) (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975).

Como visto anteriormente, isso leva a

$$G(k) = \sum_{l=0}^{(N/4)-1} g(2l) W_{N/4}^{lk} + W_{N/2}^{k} \sum_{l=0}^{(N/4)-1} g(2l+1) W_{N/4}^{lk}$$
(12)

Da mesma forma

$$H(k) = \sum_{l=0}^{(N/4)-1} h(2l) W_{N/4}^{lk} + W_{N/2}^{k} \sum_{l=0}^{(N/4)-1} h(2l+1) W_{N/4}^{lk}$$
(13)

O primeiro termo de (12) é a TDF de N/4 pontos das amostras pares de g(l) e o segundo é a TDF de N/4 pontos das amostras ímpares. Isso vale também para o h(l). Na Figura 8 está um diagrama de blocos para ilustrar esta decomposição. Caso N seja uma potência de 2 (o que normalmente deve ser), a decimação pode continuar até que haja apenas TDFs de dois pontos, na forma ilustrada na Figura 9 (MONSON, 2006).



Figura 8 - Decimação da TFD de quatro pontos em duas TFDs de dois pontos para o caso da FFT com decimação no tempo.



Figura 9 - Uma TDF de dois pontos.

É chamada de "borboleta" a unidade computacional básica da FFT, mostrada na **Figura 10**A. Essa unidade pode ser simplificada, colocando em evidência o termo  $W_N^r$  do ramo inferior, como se ilustra na **Figura 10**B.

Desta forma, o fator que permanece é somente o  $W_N^{N/2}$ = -1. A Figura 11 mostra um algoritmo completo de FFT em decimação no tempo para oito pontos (MONSON, 2006).



Figura 10 - (A) A "borboleta" que é o elemento computacional básico do algoritmo de FFT. (B) Uma "borboleta" simplificada com apenas uma multiplicação complexa.



Figura 11 - Uma FFT completa de raiz 2 e decimação no tempo para oito pontos.

O cálculo de uma TDF de N pontos por meio de uma FFT em decimação no tempo é muito mais eficiente do que o cálculo direto (MONSON, 2006).

Observando a estrutura do algoritmo de FFT com decimação no tempo, é possível verificar que após a operação "borboleta" ter sido aplicada ao par de números complexos, não há necessidade de se preservar o par de entrada, logo, o par de saída pode ser armazenado nos mesmos registradores da entrada (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975). Sendo assim, é necessária apenas uma única matriz de tamanho N, possibilitando que os cálculos sejam feitos no próprio lugar (*in place*) e reduzindo o tamanho da memória.

Para realizar as computações *in place*, deve-se tomar cuidado com a sequência de entrada x(n). Esta deve ser armazenada de forma não sequencial, conforme a Figura 11. Observa-se um embaralhamento da sequência de entrada, isso se deve às sucessivas decimações de x(n). Caso o índice n seja escrito na forma binária, então a ordem, para armazenar a sequência de entrada, deve ser conforme a representação binária de n em ordem invertida, conforme a Tabela 2, para N=8 (MONSON, 2006).

Representação binária de n em ordem invertida						
n	Binário	Binário com bits invertidos	n'			
0	000	000	0			
1	001	100	4			
2	010	010	2			
3	011	110	6			
4	100	001	1			
5	101	101	5			
6	110	011	3			
7	111	111	7			

Tabela 2 - Representação binária de n em ordem invertida

#### 2.5.1.2 FFT COM DECIMAÇÃO EM FREQUÊNCIA

Outro tipo de algoritmo para processar FFT é a decimação da sequência de saída X(k) em subsequentes cada vez menores, conhecidos como FFT com decimação em frequência (OPPENHEIM; SCHAFER, 1975).

Seja N uma potência de 2,  $N = 2^{\nu}$ . Considerando a possibilidade de se calcular separadamente as amostras de X(k) com índices pares e ímpares (MONSON, 2006), as amostras pares são:

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{2nk}$$
(14)

A equação (14) pode ser decomposta em duas somas, constituídas pelos primeiros N/2 pontos e pelos últimos N/2 pontos. Usando o fato de que  $W_N^{2nk} = W_{N/2}^{nk}$ , logo

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n) W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=N/2}^{N-1} x(n) W_{N/2}^{nk}$$
(15)

Com uma troca da indexação da segunda soma, temos

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x(n) W_{N/2}^{nk} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x\left(n + \frac{N}{2}\right) W_{N/2}^{\left(n + \frac{N}{2}\right)k}$$
(16)

Finalmente, como  $W_{N/2}^{(n+\frac{N}{2})k} = W_{N/2}^{nk}$ , obtemos

$$X(2k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left[ x(n) + x \left( n + \frac{N}{2} \right) \right] W_{N/2}^{nk}$$
(17)

que é a TDF de N/2 pontos da sequência formada quando os primeiros N/2 pontos de x(n) são somados aos últimos N/2.

Calculando da mesma maneira para as amostras ímpares de X(k), tem-se

$$X(2k+1) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} W_N^n \left[ x(n) - x \left( n + \frac{N}{2} \right) \right] W_{N/2}^{nk}$$
(18)

O primeiro estágio da decimação está representado no fluxograma da Figura 12. Igualmente à FFT com decimação no tempo, a decimação em frequência pode continuar até que restem apenas duas TDF de dois pontos (borboleta). A Figura 13 mostra uma FFT completa com decimação em frequência para oito pontos(MONSON, 2006).

Não existe qualquer diferença, relacionada a complexidade, entre processar a FFT com decimação em frequência e a FFT com decimação no tempo. Logicamente, ambas podem ser realizadas no próprio lugar (*in place*). Observe, na Figura 13 que, embora a sequência de entrada x(n) esteja em ordem normal, as amostras de frequência X(k) estão com os bits invertidos (MONSON, 2006).



Figura 12 - Uma FFTcom decimação em frequência para oito pontos após o primeiro estágio de decimação.



Figura 13 - FFT de raiz 2 e decimação em frequência para oito pontos.

#### 2.5.2 TRANSFORMADA DE HILBERT

A Transformada de Hilbert (TH) é utilizada amplamente em comunicação via rádio para modulação e demodulação em amplitude. Para sistemas mecânicos dinâmicos, a TH é considerada aplicável para detecção de sinais de vibração (HUAGENG;XINGJIE; BUGRA, 2009).

A TH<sup>[4]</sup> da função x(t) é definida como:

$$\bar{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi t} * x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(t - \tau)}{\tau} d\tau$$
(19)

É possível calcular a transformada de Hilbert de três modos:

- Integral de Cauchy no plano complexo;
- Transformada de Fourier;
- Observando a mudança de fase  $\pm \pi/2$ .

Nessa dissertação, utiliza-se de apenas da equação que utiliza a transformada de Fourier, pois, basicamente, eliminam-se os inconvenientes limites infinitos de integração.

A única função da TH, nessa dissertação, é encontrar o envelope do sinal. Conhecer o envelope do sinal é imprescindível, pois é este que indica a frequência característica do tipo de falha do rolamento.

<sup>[4]</sup> Hahn, S. L., **Hilbert Transforms in Signal Processing**, Artech House, Boston, 1996. Apud Huageng, L.;Xingjie, F.; Bugra, E.; **Hilbert Transform and Its Engineering Applications**; AIAA JOURNAL v. 47, n. 4, April 2009.
A TH de x(t) é a convolução de x(t) por  $\frac{1}{\pi . t}$ 

$$\overline{x}(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi t} * x(t)$$
 (20)

onde,

H[x(t)] = Transformada de Hilbert de x(t);

t = Tempo;

- $\overline{x}$  = Transformada de Hilbert para x;
- x = Função;
- \* = Convolução.

# **3 DESENVOLVIMENTO DO MEDIDOR DE VIBRAÇÃO PROPOSTO**

Como o Medidor de Vibração é um projeto que contempla utilização de componentes programáveis, no caso o dsPIC33, divide-se o desenvolvimento em duas grandes seções: o *hardware* e o *software*.

## 3.1 HARDWARE

É a parte física do Medidor de Vibração, como os circuito integrados, componentes eletrônicos, placas, que se comunicam através dos barramentos. Como mostrado na Figura 14, divide-se o *hardware* em três partes distintas: unidade sensora, condicionamento e unidade de controle. Cada uma dessas partes será descrita a seguir, incluindo o *layout* da placa eletrônica.



Figura 14 - Diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

# 3.1.1 UNIDADE SENSORA

Embora existam vários tipos de sensores, que se diferenciam basicamente quanto à sensibilidade, número de canais (eixos), temperatura de operação, resposta em frequência, processo de fabricação, faixa de operação, ruído e preço (como contador de impulsos de choque, medidor de velocidade, entre outros), o mais comum é a utilização dos acelerômetros, devido às suas pequenas dimensões e precisão na medição de vibração. Existem vários tipos de acelerômetros disponíveis no mercado, com diferentes princípios de operação. O mais utilizado é o acelerômetro piezoelétrico, devido à sua disponibilidade e facilidade de ser integrado a equipamentos eletrônicos. No entanto acelerômetros piezoelétricos padrão são relativamente caros (JAGANNATH; RAMAN, 2007).

Uma forma de reduzir o custo é usar o sistema microeletromecânico – MEMS, em que o acelerômetro é uma parte integrada ao chip de silício. O desempenho do MEMS, em comparação com dispositivos piezoelétricos, pode ser pobre, devido ao seu elevado ruído interno, mas eles oferecem uma alternativa mais barata para o monitoração de vibração (JAGANNATH; RAMAN, 2007).

RATCLIFFE et al. (2007) realizaram um estudo comparativo entre MEMS e acelerômetros piezoelétricos. Algumas das vantagens potenciais utilizando MEMS incluem a aquisição de dados mais rápida, automação, diagnóstico remoto e excelente repetibilidade. Porém a densidade de ruído dos sensores MEMS era duas ordens de grandeza superior a dos acelerômetros de baixo ruído, e a resolução dos MEMS foi inferior, numa ordem de grandeza, a dos acelerômetros piezoelétricos. No final do artigo, os autores afirmam que os resultados dos testes foram comparados e excelente correlação foi alcançada; assim, os sensores MEMS de baixo custo têm fidelidade suficiente para utilização em medição de vibração.

Alguns sensores MEMS possuem um amplificador operacional sobressalente, ou seja, o amplificador não está sendo utilizado, ficando à disposição do usuário. Este amplificador pode ser usado para amplificar o sinal de saída do acelerômetro, facilitando a utilização deste componente em locais onde as vibrações de um motor são muito fracas (JAGANNATH; RAMAN, 2007).

Os MEMS com encapsulamento de cerâmica são capazes de satisfazer as demandas de miniaturização, oferecendo perfis finos e volume pequeno. Eles oferecem flexibilidade no projeto, permitindo inclusão de vários dispositivos em um único circuito integrado, selado e hermético; por último, eles fornecem estabilidade mecânica sob gamas de temperaturas extremas (SCHUBRING; FUJITA, 2007).

BAZU et al. (2007) apresentam uma avaliação da confiabilidade dos acelerômetros MEMS. Os testes incluem ensaios térmicos e mecânicos. Os resultados demonstraram a boa confiabilidade dos MEMS.

Atualmente os acelerômetros estão sendo utilizados em celulares, jogos, proteção de *drivers*, estabilidade em imagens, detecção de impulsos, instrumentos médicos, etc. Nesse sistema de medição de vibração em desenvolvimento, se utilizará, em trabalhos futuros, o ADLX001 para ±70g, que possui as seguintes características:

- Faixa de atuação: ±70g;
- Frequência de ressonância: 22 kHz;
- Alta linearidade: 0,2%;
- Baixo ruído: 4 mg/ $\sqrt{Hz}$ ;
- Baixa resposta em frequência para DC;
- Total processamento diferencial do sinal;
- Alta resistência para EMI/RFI;
- Auto teste;
- Baixo consumo: 2,5 mA (valor típico);
- Hermético em cerâmica.

Deve se atentar para que a frequência máxima a ser medida seja inferior à frequência natural do acelerômetro e que a faixa de aceleração medida nunca exceda o especificado. A Figura 15 mostra a resposta em frequência do ADLX001. Observe que pretende-se medir freqüências abaixo de 10 kHz.



Figura 15 - Resposta em frequência. (FONTE: Manual do ADLX001)

### 3.1.2 CONDICIONAMENTO

A etapa de condicionamento de sinal é muitas vezes a etapa mais trabalhosa, pois tem como principal objetivo adequar um sinal para ser entregue ao componente posterior. Dependendo do caso, é necessário realizar-se com o sinal um conjunto das seguintes operações: somar, subtrair, dividir, multiplicar, filtrar, isolar eletricamente, integrar, derivar, multiplexar, linearizar, etc.

No caso deste trabalho, o sinal proveniente do acelerômetro MEMS é um sinal AC sobreposto à metade da tensão de alimentação do CI, ou seja, 1,55 V. Como o valor AC é muito pequeno para ser entregue ao A/D do microcontrolador, é necessário amplificar o sinal. Utiliza-se nesse estudo o amplificador AD8231, cujo fabricante é a ANALOG DEVICES.

O AD8231 é um amplificador de instrumentação *rail-to-rail* com ganho (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, ou 128) programável por *software*. Este amplificador é ideal para aplicações que requeiram precisão e desempenho em ampla gama de temperaturas. Como os resistores são internos ao componente, o *drift* máximo é de apenas 10 ppm/°C, para ganhos programados entre 1 e 32. O componente ocupa área de apenas 4mm × 4mm e trabalha na gama de temperatura industrial –40°C a +125°C.

O AD8231 possui um amplificador operacional sobressalente que pode ser utilizado para ganhos adicionais, filtros, entre outras aplicações. O diagrama funcional do AD8231 é mostrado na Figura 16.



Figura 16 - Diagrama em bloco funcional do AD8231 (FONTE: Manual do AD8231).

### 3.1.3 UNIDADE DE CONTROLE

Para a unidade de controle, utilizou-se o microcontrolador da Microchip, o dsPIC33FJ256MC710 (Figura 17 e Figura 18), que foi escolhido baseado na capacidade do processamento digital de sinal (DSP), eficiência de cálculo e características do conversor A/D integrado (24 x 12-bit @ 500 ksps). Este microcontrolador de 16 bits, arquitetura RISC, é de alto desempenho e baixa tensão de alimentação (3,3 V), possui 256 Kbytes de memória de programa (ROM Flash) e 32 Kbytes de SRAM. O maior desempenho é de 40 milhões de instruções por segundo (40 MIPS @ 3,0-3,6V, -40°C to +85°C) e a grande maioria das instruções (exceto instrução de divisão) é executada em apenas um ciclo. Pode-se citar como características importantes, possibilitando trabalhos futuros, a disponibilidade de 8 canais de PWM para controle de motores, e 1 canal para comunicação com encoder (vale lembrar que é indispensável se ter conhecimento da velocidade de rotação do eixo durante a aquisição de dados, pois as frequências de falha dependem desta velocidade).



Figura 17 - Foto ilustrativa do dsPIC (FONTE: Manual do dsPIC33FJ256MC710)



Figura 18 - Pinagem do dsPIC33FJ256MC710. (FONTE: Manual do dsPIC33FJ256MC710)

Para facilitar o cálculo da Transformada de Fourier, este microcontrolador oferece instruções como MAC e MSC, respectivamente para multiplicação e adição e multiplicação e subtração, que são executadas em apenas um ciclo.

Adicionalmente há 8 canais de acesso direto à memória (DMA), portas de comunicação digital com UART, SPI e I2C, 9 timers de 16 bit e 4 de 32 bit.

A Figura 19 mostra o diagrama de blocos do dsPIC33FJ256MC710.



Figura 19 - Diagrama de blocos do dsPIC33FJ256MC710 (FONTE: Manual do dsPIC33FJ256MC710)

## 3.1.4 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

Com o detalhamento da unidade sensora, condicionamento e unidade de controle, foi possível desenvolver o *layout* da placa do Medidor de Vibração, utilizando o programa PCAD 2002, cujo fabricante é a Altium. Agregaram-se nessa etapa outros componentes para compor a fonte, comunicação UART, teclado e GLCD.



Figura 20 - Placa do "Medidor de Vibração"

A Figura 20 mostra o *layout* e a placa do medidor de vibração montada com todos os componentes necessários para o teste do protótipo.

Como periféricos foram utilizados:

- LED SMD;
- Buzina piezoelétrica;
- GLCD da Lumex de 128 x 64;
- Teclado matricial de membrana;
- Interface RS-232.

A principal função do LED e da buzina é testar o funcionamento básico da placa eletrônica, pois é necessário verificar se a gravação do dsPIC ocorre convenientemente. No início do desenvolvimento de um projeto, envolvendo *hardware* e *software*, é necessário depurar primeiramente o *hardware*, e, se encontrado qualquer problema, deve-se imediatamente corrigi-lo.

A principal função do mostrador gráfico é propiciar ao usuário uma noção do espectro. Optou-se por utilizar o GLCD S12864GSF, mostrado na Figura 21. Como o intuito desta dissertação não é propor um produto acabado, a interface homemmáquina (IHM) não foi explorada em sua totalidade, ou seja, não se enfatizou os tratamentos gráficos. O GLCD é um mostrador simples, não é colorido, que contém pixels de 0,48 x 0,48 mm espaçados com 0,04 mm. O consumo total é de aproximadamente 310mA, sendo 300 mA responsáveis pela luz de fundo.



Figura 21 - LCD Gráfico, fabricante Lumex

Outro periférico para esse projeto é o teclado matricial 4x4 de membrana (Figura 22), fabricado pela empresa Policomp. Este teclado não foi projetado especificamente para esse projeto, porém foi fabricado conforme solicitado para outra aplicação, sendo aproveitado para o protótipo do Medidor de Vibração.



Figura 22 - Teclado Matricial de Membrana

## 3.2 SOFTWARE

Conforme comentado anteriormente, a análise de um sinal de vibração com modulação de amplitude baseia-se normalmente na técnica de ressonância em alta frequência (MCFADDEN; SMITH, 1984). O fenômeno da modulação de amplitude acontece porque um sinal de alta frequência porta um sinal modulante de baixa frequência. Assim, o sinal modulado é o produto do sinal modulante pelo sinal da portadora. O sinal modulante pode mostrar o impacto causado pelo defeito no rolamento. Já o sinal da portadora é uma combinação das frequências de ressonância do rolamento. Essa técnica tira proveito da ausência de ruídos mecânicos de baixa frequência, consequentemente fornecendo um sinal demodulado de baixa frequência com uma elevada relação sinal-ruído (YUH-TAY, 2007).

Para a realização da demodulação em amplitude, seguiram-se os seguintes passos:

- Passo 1: Aquisições de 1024 amostras a 5152 Hz;
- Passo 2: Cálculo da FFT com decimação em frequência;
- Passo 3: Identificação da freqüência de ressonância (maior amplitude);
- Passo 4: Filtragem do sinal, aplicando um filtro passa banda de 20% em torno da freqüência de ressonância;
- Passo 5: Cálculo da IFFT com decimação em frequência;
- Passo 6: Cálculo do envelope do sinal utilizando a transformada de Hilbert;
- Passo 7: Cálculo da FFT com decimação em frequência.

A Figura 23 mostra as etapas acima em diagrama de blocos.



Figura 23 - Etapas para a demodulação em amplitude

Para efetuar a gravação do *software* no dsPIC33, empregou-se o Pickit3, motrado na Figura 24, que é um gravador, com comunicação USB (até 12 Mbits/s), capaz de gravar o microcontrolador dsPIC33FJ256MC710. Este gravador foi liberado para venda em janeiro de 2009 com custo atual de aproximado de U\$ 70,00. As versões anteriores desse gravador não são capazes de programar o microcontrolador utilizado nesse projeto.

O gravador Pickit 3 também é um ICD (*In-Circuit Debugger*), capaz de executar e depurar programas em tempo real, disponibilizando ao programador a possibilidade de verificar os estados dos diversos registradores do microcontrolador. Com este dispositivo, também é possível apagar a memória de programa do microcontrolador.



Figura 24 - Gravador para dsPIC33 (PICKIT3, fabricante Microchip)

A Microchip oferece uma excelente plataforma para simular, programar, compilar e gravar, tudo em um mesmo ambiente, conhecido com MPLAB IDE (*Integrated Development Environment*). É necessário, além do MPLAB IDE, que é gratuito, a instalação de um compilador compatível com o dispositivo programável em questão. A Microchip disponibiliza todos os compiladores para linguagem *Assembly* gratuitamente, porém, para linguagem C, os compiladores são vendidos. Interessante ressaltar que diversos projetos podem ser realizados utilizando a versão para estudante, que é gratuita. O protótipo para o Medidor de Vibração foi programado utilizando o compilador para linguagem C, chamado MPLAB C30. A Figura 25 mostra o cenário completo do MPLAB IDE, juntamente com o compilador MPLAB C30.



Figura 25 - MPLAB IDE, plataforma para desenvolvimento integrado.

A biblioteca do dsPIC33 fornece um conjunto de operações voltada ao processamento digital de sinais. A biblioteca foi projetada para fornecer ao desenvolvedor de *softwares*, utilizando a linguagem C, as funções mais comuns do processamento digital de sinais. No total, 52 funções fazem parte da biblioteca do dsPIC33, sendo essa escrita predominantemente em linguagem *Assembly* otimizada. A biblioteca pode ser dividida basicamente em cinco segmentos:

- Operações com vetores (soma, subtração, multiplicação,...);

- Operações com matrizes(soma, subtração, multiplicação,...);
- Filtros (FIR, IIR,...);
- Transformadas (FFT, IFFT);
- Funções para controle (PID);

As principais funções utilizadas nesse projeto se referem, logicamente, às transformadas direta e inversa de Fourier. Utilizar essas funções, escritas em linguagem *Assembly* otimizada, promove a rapidez e confiabilidade necessária para identificar as freqüências de falha em rolamentos.

# 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido à dificuldade em se conseguir uma bancada com rolamentos contendo defeitos de único ponto conhecidos, ou seja, defeitos inseridos propositalmente em posições e com dimensões conhecidas, optou-se por utilizar um gerador de sinais para avaliar o Medidor de Vibração. Além disso, o gerador de sinais utilizado permite a criação de sinais complexos e controlados, como sinais de AM, por exemplo.

Dentre as várias possibilidades de equipamentos para geração e manipulação de sinais, preferiu-se utilizar o Matlab/Simulink que é uma ferramenta difundida e aceita no meio acadêmico, em conjunto com a placa de áudio de um computador portátil (laptop). Para os testes foram utilizados:

- Software Matlab R2007b/Simulink;
- Laptop, para geração dos sinais;
- Desktop, para interface RS-232;
- Osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Protótipo do Medidor de Vibração.

Resumidamente, o teste consistiu em gerar formas de ondas diversas, através do Matlab/Simulink, utilizando com a saída a placa de som do laptop, e aplicar estes sinais no canal de entrada do Medidor de Vibração, como ilustra o diagrama da Figura 26. Pode-se ver uma imagem da bancada de teste do protótipo, na Figura 27.



Figura 26 - Diagrama do sistema utilizado para testar o desempenho do Medidor de Vibração.

A Figura 27 mostra exatamente como foi montada a bancada de teste para o protótipo do Medidor de Vibração. O único motivo pelo qual é necessária a utilização do *desktop* deve-se ao fato de os *laptops* atuais não possuírem a porta de comunicação serial para RS-232. Toda ligação está conforme a Figura 26.



Figura 27 - Bancada montada para teste do Medidor de Vibração

A Figura 28 mostra o detalhe da ligação do Medidor de Vibração. Podem-se ver o cabo RS-232, a ligação do *flat cable* do teclado, a fonte de alimentação, o conector do GLCD e finalmente o gravador Pickit 3. Uma pequena base de madeira foi fabricada, melhorando as disposições dos componentes e facilitando o acesso à placa eletrônica. Ter acesso fácil à placa eletrônica é imprescindível, pois foram necessárias várias medições durante o desenvolvimento do projeto. Outro ponto interessante, quando se tratar de componente SMD ou encapsulamento com terminais de difícil acesso, é inserir no *layout* da PCI pinos específicos para a medição de sinais.



Figura 28 - Detalhe do Medidor de Vibração

A Figura 29 apresenta a tela inicial do protótipo, onde se observa que a nitidez do GLCD é satisfatória.



Figura 29 - Tela inicial do GLCD

Para testar o desempenho do medidor de vibração, foram feitos 6 testes em bancada, utilizando o Simulink como gerador de sinais.

- Teste 1: Resposta do protótipo para senóides de diferentes amplitudes;
- Teste 2: Resposta do protótipo para senóides de 10 Hz a 300 Hz;
- Teste 3: Resposta do protótipo para senóides de 500 Hz a 2500 Hz;
- Teste 4: Resposta do protótipo para AM SSB com portadora de 2,1 kHz;
- Teste 5: Resposta do protótipo para AM SSB com portadora de 1 kHz;
- Teste 6: Resposta do protótipo para AM DSB com portadora de 1 kHz.

Detalha-se a seguir cada um dos testes.

# 4.1 TESTE 1: RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE DIFERENTES AMPLITUDES

O objetivo deste primeiro teste é verificar se a magnitude da FFT varia, quando ocorre uma variação no nível da tensão da senóide aplicada à entrada do ADC. A Figura 30 mostra a simulação feita no Simulink. Observe que o osciloscópio e o espectro FFT (ambos ferramentas do Simulink) estão ambos conectados antes do somador, pois o valor do bloco descrito como Zero é 0,35, cuja função é somente adequar o nível de tensão de saída da placa de som do computador portátil (laptop) ao nível zero do ADC. O ADC do protótipo do Medidor de Vibração espera um sinal que excursione sobre 1,65 V, ou seja, valores maiores que 1,65 V são considerados positivos e menores são considerados negativos pelo microcontrolador dsPIC33.

A constante, descrita como Zero, possui o valor de 0.35 no Simulink. Porém, após passar pela placa de som do laptop, atinge o valor de 1,65 V, que seria o valor correspondente a zero no ADC. Para todas as ondas simuladas, há um somador com 0,35 no último estágio.



Figura 30 - Diagrama de blocos para teste com senóide de 60Hz

A Figura 31 mostra o sinal de saída da placa de áudio (descrida como Saída para Áudio na Figura 30). Observar que a sensibilidade do canal 1 é de 1,00 V/divisão e que o seno excursiona sobre aproximadamente 1,65 Vcc.



Figura 31 - Forma de onda medida na saída de áudio

Neste teste, variou-se a amplitude da senóide de 60 Hz de 880 mV até 3 V, e o resultado pode ser verificado na Figura 32.

A medição da amplitude é extremamente importante no diagnóstico de falha em um rolamento. Imagine que, em um dia qualquer, mediu-se a vibração de um rolamento e diagnosticou-se que o rolamento apresentava falha, supondo-se que falha na pista interna é de 60 Hz, porém foi considerado que a amplitude estava baixa, como na Figura 32A. Após um tempo de funcionamento, observa-se que o espectro está conforme a Figura 32F, ou seja, houve um acréscimo considerável na amplitude do sinal, indicando a degradação do rolamento.



Figura 32 - Espectro apresentado pelo protótipo do Medidor de Vibração para diferentes amplitudes de uma senóide de 60 Hz na entrada ADC.

# 4.2 TESTE 2 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE 10 HZ A 300 HZ

Este segundo teste visa avaliar o processamento digital de sinais feito no dsPIC33, pela injeção de um sinal com 09 componentes senoidais (Figura 33), com as seguintes freqüências: 10 Hz, 30 Hz, 60 Hz, 100 Hz, 120 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250 Hz e 300 Hz. Para identificar uma possível freqüência de falha entre tantas, o componente de 60 Hz tem a amplitude três vezes maior que os demais, todos com amplitude de 1 V.



Figura 33 – Diagrama de blocos para geração de um sinal composto por nove senóides, de 10 a 300 Hz.

Na Figura 34 pode-se observar:

- Figura 34A: Sinal medido pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B.
  Observar valores impressos na tela, para as respectivas posições dos cursores do osciloscópio;
- Figura 34B a F: Espectros encontrados pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Figura 34 G: Espectro encontrado pelo bloco B-FFT do Simulink;
- Figura 34 H: Espectro processado pelo Medidor de Vibração e transmitido pela UART para um PC (onde o gráfico foi traçado);
- Figura 34I: Mostrador GLCD marcando as raias processadas pelo dsPIC33. Observe que a frequência de 60 Hz se destaca entre as outras.



Figura 34 - Comparativo entre Tektronix TDS 1001B, Simulink e Medidor de Vibração - Senóides de 10 a 300 Hz.

A

Tabela 3 representa o desvio entre as raias das frequências localizadas pelo osciloscópio Tek TDS 1001B e o protótipo do medidor de vibração.

Não foi possível comparar os valores das frequências do protótipo do Medidor de Vibração com o Simulink, pois, para o bloco B-FFT deste, não é possível conseguir com precisão os valores das raias de frequência.

Conforme mostrado na

Tabela **3**, o maior desvio entre as frequências medidas pelo protótipo em relação aos valores medidos pelo osciloscópio digital é de 2,50%, resultados satisfatório para a aplicação em vista.

Desvio entre o osciloscópio e o protótipo					
Frequência Ideal [Hz]	Valores Tek TDS 1001B [Hz]	Valores Medidor de Vibração [Hz]	Desvio % (entre Tek e o protótipo)		
10	10	10	0		
30	30	30	0		
60	60	60	0		
100	100	100	0		
120	120	120	0		
150	150	150	0		
200	200	205	2,50		
250	250	255	2,00		
300	300	305	1,67		

Tabela 3 - Valores encontrados pelo Simulink, Tek TDS 1001B e protótipo do Medidor de Vibração.

# 4.3 TESTE 3 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA SENÓIDES DE 500 HZ A 2500 HZ

Este terceiro teste é semelhante ao anterior, mas aqui os valores das frequências estão na faixa de 500 Hz a 2500 Hz. A Figura 35 é o programa em Simulink para geração do sinal composto, cálculo de seu espectro de freqüências e observação também no domínio do tempo. Como nos testes anteriores, a saída de áudio do laptop é injetada no protótipo do medido de vibração.



Figura 35 - Diagrama de blocos para geração de um sinal composto por nove senóides, de 500 a 2500 Hz.

Na Figura 36 pode-se observar:

- Figura 36A: Sinal composto medido pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B. Observar valores impressos na tela, para as respectivas posições dos cursores do osciloscópio;
- Figura 36B a E: Espectros encontrados pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Figura 36F: Espectro encontrado pelo bloco B-FFT do Simulink;
- Figura 36G: Espectro calculado pelo Medidor de Vibração.



Figura 36 – Comparativo entre Tektronix TDS 1001B, Simulink e Medidor de Vibração - Senóides de 500 a 2500 Hz.

A Tabela 4 representa o desvio entre as raias das frequências localizadas pelo osciloscópio Tek TDS 1001B e o protótipo do medidor de vibração. O maior desvio é de 1,67%, novamente considerado satisfatório para a aplicação proposta.

Desvio entre o osciloscópio e o protótipo					
Frequência Ideal [Hz]	Valores Tek TDS 1001B [Hz]	Valores Medidor de Vibração [Hz]	Desvio % (entre Tek e o protótipo)		
500	500	505	1,00		
550	550	555	0,91		
600	600	610	1,67		
1000	1000	1015	1,50		
1300	1300	1315	1,15		
1800	1800	1825	1,39		
2000	2000	2025	1,25		
2150	2150	2175	1,16		
2500	2500	2530	1,20		

Tabela 4 - Valores encontrados no Simulink, Tek TDS 1001B e Medidor de Vibração.

# 4.4 TESTE 4 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA AM SSB COM PORTADORA DE 2,1 KHZ

AM SSB (*single-sideband modulation*) é uma modulação em amplitude de banda lateral única. Nesse tipo de modulação existe a portadora e apenas uma raia no espectro de frequência.

A Figura 37 ilustra uma AM SSB. Observar que a frequência do sinal modulante é duas vezes menor que a frequência do envelope.



Figura 37 - Exemplo de modulação em amplitude de banda lateral única.

A Figura 38 mostra o diagrama de blocos para a geração de um sinal AM SSB com a portadora igual a 2,1 kHz e o sinal modulante igual a 80 Hz. É de se esperar que a frequência do envelope deste sinal AM SSB seja duas vezes maior que a frequência do sinal modulante.



Figura 38 - Diagrama de blocos para geração de um sinal AM SSB com portadora igual a 2,1kHz.



Figura 39 - Comparativo entre Tektronix TDS 1001B, Simulink e Medidor de Vibração, sinal AM SSB Portadora 2,1kHz.

Na Figura 39 pode-se observar:

- Figura 39A: Sinal modulado medido pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Figura 39B: Espectros encontrados pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B. Observar valores impressos na tela, para as respectivas posições dos cursores do osciloscópio;
- Figura 39C: Espectro encontrado pelo bloco B-FFT do Simulink;
- Figura 39D: Espectro processado pelo Medidor de Vibração. Observe que a diferença entre os valores apresentados nesta figura é 155 Hz, que é o envelope do sinal modulado calculado através de espectro em freqüência, ou seja, não é utilizada a transformada de Hilbert. Como era de se esperar, esse valor é aproximadamente duas vezes o valor da frequência do sinal modulante.

A Tabela 5 apresenta o desvio entre as raias das frequências obtidas pelo osciloscópio Tek TDS 1001B e o protótipo do medidor de vibração, observa-se que o maior desvio é de 3,13%, também considerável aceitável.

Tabela 5 - Valores encontrados pelo Simulink, Tek TDS 1001B e pelo Medidor de Vibração.

Desvio entre o osciloscópio e o protótipo					
Frequência Ideal [Hz]	Valores Tek	Valores Medidor de Vibração [Hz]	Desvio %		
	TDS		(entre Tek e o		
	1001B [Hz]		protótipo)		
2100	2180	2200	0,92		
160	160	155	3,13		

## 4.5 TESTE 5 : RESPOSTA DO PROTÓTIPO PARA AM SSB COM PORTADORA DE 1 KHZ

A Figura 40 mostra o diagrama de blocos para a geração de um sinal AM SSB com a portadora igual a 1 kHz e o sinal modulante igual a 80 Hz. É de se esperar que a

frequência do envelope deste sinal AM SSB seja duas vezes maior que a frequência do sinal modulante.



Figura 40 - Diagrama de blocos para geração de um sinal AM SSB com portadora de 1 kHz.

Na Figura 41 pode-se observar:

- Figura 41A: Sinal medido pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Figura 41B: Espectro encontrado pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B
  Observar valores impressos na tela, para as respectivas posições dos cursores do osciloscópio;
- Figura 41C: Espectro encontrado pelo bloco B-FFT do Simulink;
- Figura 41D: Mostrador GLCD marcando as raias calculadas pelo dsPIC33. Observe que entre os parênteses está o número 160 Hz, que é o envelope calculado após a transformada de Hilbert. Como era de se esperar, esse valor é duas vezes o valor da frequência do sinal modulante.
- Figura 41E: Espectro processado pelo Medidor de Vibração. Observe que a diferença entre os valores apresentados nesta figura é 165 Hz, que é o envelope do sinal modulante calculado através de espectro de freqüência, ou seja, não é utilizada a transformada de Hilbert. Como era de se esperar, esse valor é aproximadamente duas vezes o valor da frequência do sinal modulante.



Figura 41 – Comparativo entre Tektronix TDS 1001B, Simulink e Medidor de Vibração. Sinal AM SSB com portadora de 1kHz.

A Tabela 6 apresenta o desvio entre as raias das frequências calculadas pelo osciloscópio Tek TDS 1001B e pelo protótipo do medidor de vibração. Mais uma vez, o desempenho do protótipo em relação ao osciloscópio é satisfatório.

Desvio entre o osciloscópio e o protótipo Valores Tek Desvio % Frequência Valores Medidor TDS (entre Tek e o Ideal [Hz] de Vibração [Hz] 1001B [Hz] protótipo) 1000 1080 1095 1,39 160 160 160 0

Tabela 6 - Valores encontrados pelo Tek TDS 1001B e pelo Medidor de Vibração.

AM DSB (*double-sideband modulation*) é uma modulação em amplitude com dupla banda lateral, onde DSB significa. Nesse tipo de modulação existe a portadora e duas raias no espectro de frequência.

A Figura 42 ilustra uma AM DSB. Observe que a frequência do sinal modulante é igual à frequência do envelope do sinal modulado.



Figura 42 - Exemplo de modulação em amplitude de banda lateral dupla

A Figura 43 mostra o diagrama de blocos para a geração de um sinal AM DSB com a portadora igual a 1 kHz e o sinal modulante igual a 90 Hz. É de se esperar que a frequência do envelope deste sinal AM SSB seja igual à frequência do sinal modulante.



Figura 43 - Diagrama de blocos para geração de um sinal AM DSB com portadora igual a 1 kHz

Na Figura 44 pode-se observar:

- Figura 44A: Sinal medido pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B;
- Figura 44B a D: Espectros encontrados pelo osciloscópio Tektronix TDS 1001B. Observar valores impressos na tela, para as respectivas posições dos cursores do osciloscópio;
- Figura 44E: Espectro encontrado pelo bloco B-FFT do Simulink;
- Figura 44F: Mostrador GLCD marcando as raias calculadas pelo dsPIC33.
  Observe que entre os parênteses está o número 90 Hz, é a frequência do envelope calculado após a transformada de Hilbert. Como era de se esperar, esse valor é igual ao valor da frequência do sinal modulante.
- Figura 44G: Espectro processado pelo Medidor de Vibração. Observe que a diferença entre os valores apresentados nesta figura é 95 Hz, para a raia da esquerda, e 90 Hz, para a raia da direita. Esse é o envelope do sinal modulado calculado através de espectro em freqüência, ou seja, não é utilizada a transformada de Hilbert. Como era de se esperar, esse valor é aproximadamente igual ao valor da frequência do sinal modulante.



Figura 44 - Comparativo entre Tektronix TDS 1001B, Simulink e Medidor de Vibração. Sinal AM SSB Portadora 1kHz

A Tabela 7 representa o desvio entre as raias das frequências localizadas pelo osciloscópio Tek TDS 1001B e o protótipo do medidor de vibração. O desvio de 1,5% é aceitável para a aplicação proposta.

Desvio entre o osciloscópio e o protótipo					
Frequência Ideal [Hz]	Valores Tek TDS 1001B [Hz]	Valores Medidor de Vibração [Hz]	Desvio % (entre Tek e o protótipo)		
1000	1000	1015	1,50		
90	90	90	0		

Tabela 7 - Valores encontrados pelo Tek TDS 1001B e pelo Medidor de Vibração.

# 5 CONCLUSÃO

As máquinas elétricas são amplamente utilizadas, sendo consideradas o núcleo da maioria dos processos produtivos. Fazer medições, para avaliar a degradação dos rolamentos de motores de indução, é atacar a causa raiz de muitas paradas não programadas no ambiente industrial. Em se tratando de motores de indução, 41% de todas as falhas estão relacionadas com os rolamentos (CUSIDÓ et al., 2009).

Um Medidor de Vibração foi projetado e implementado, o protótipo satisfaz todas as etapas para identificação da frequência de falha utilizando transformada direta e inversa de Fourier, bem como a transformada de Hilbert, para encontrar o envelope do sinal. Conhecer o envelope do sinal é imprescindível, pois é este que indica a frequência característica do tipo de falha do rolamento.

O protótipo do Medidor de Vibração proposto apresentou um desvio máximo, para os testes apresentados de 3,13%, na identificação do envelope. Contudo, esse demonstrou ser preciso, pois os valores se repetiam para as várias medições do mesmo sinal de entrada.

A IHM apresentada neste trabalho representa uma interface básica, com o intuito apenas de apresentar, em alguns casos, o espectro processado.

Para trabalhos futuros poderá ser implementada a etapa, citada na introdução, do acelerômetro MEMS e montada bancada com rolamentos contendo defeitos de único ponto conhecidos, ou seja, defeitos inseridos propositalmente em posições do rolamento e com dimensões conhecidas. Conhecendo-se os defeitos, será possível testar efetivamente o desempenho do protótipo, possibilitando, por exemplo, a implementação de uma rede neural para analisar o espectro de vibração, detectando automaticamente as falhas e disparando alarmes quando o problema existir.

Futuramente poderá ser desenvolvida outra placa dedicada apenas para a IHM. Desta forma, o processamento matemático ficaria concentrado no dsPIC33 e a IHM seria implementada utilizando outro microcontrolador. Isso é viável para desocupar memória de programa e de dados do dsPIC33, liberando este para tarefas mais dedicadas ao processamento de sinais.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ANSARI, S. A.; BAIG, R.; PC-based Vibration Analyzer for Condition Monitoring of Process Machinery. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 47, n. 2, p. 378-383, Apr. 1998.

ARATO JUNIOR, A.; Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações; Editora Manole, 1ª Edição, 2004.

BAZU, M. et al.; Reliability Accelerated Testing of MEMS Accelerometers. **Semiconductor Conference**, 2007. CAS 2007, v. 1, p. 103-106, Oct. 15 2007.

BETTA, G. et al.; A DSP-based FFT-analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis. **IEEE Transactions Instrumentation and Measurement**, v. 51, p. 1316-1322, Issue 6, Dec. 2002.

CONTRERAS-MEDINA, L. M. et al.; FPGA-Based Multiple-Channel Vibration Analyzer for Industrial Applications in Induction Motor Failure Detection; **IEEE Transactions Instrumentation and Measurement**, accepted for future publication Volume PP, Forthcoming, p. 1-1, 2009.

CUSIDÓ, J. et al.; On-Line Measurement Device to Detect Bearing Faults on Electric Motors. **Intrumentation and Measurement Technology Conference**, 2009. I2MTC '09. IEEE 5-7, p. 749-752, May 2009.

GOODENOW, T.; HARDMAN, W.; KARCHNAK, M.; Acoustic emissions in broadband vibration as an indicator of bearing stress. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, v. 6, p. 95-122, 2000.
HUAGENG, L.;XINGJIE, F.; BUGRA, E.; Hilbert Transform and Its Engineering Applications; AIAA JOURNAL v. 47, n. 4, p. 923-932, April 2009.

JAGANNATH, V.M.D.; RAMAN, B.; WiBeaM:Wireless Bearing Monitoring System; Communication Systems Software and Middleware, 2007. COMSWARE 2007. 2nd International Conference, p. 1-8, Jan. 2007.

KARDEC, A.; NASCIF, J.; **Manutenção Função Estratégica**; Editora Qualitymark, 2ª Edição, 2001.

MCFADDEN, P.D.; SMITH, J.D.; Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing. **Journal of Sound and Vibration**, v. 96, n. 1, p. 69-82, Sep. 1984.

MCINERNY, S. A.: DAÍ; Y.; Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection. **IEEE Transactions on Education**, v. 46, n. 1, p 149-156, 2003.

MOBLEY, R. K.; Vibration Fundamentals, Vibration Analysis Overview - Chapter 3; Elsevier Butterworth-Heinemann, 1999.

MONSON H. H.; Processamento Digital de Sinais; Editora Artmed, 2006.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, W. S.; **Digital Signal Processing**; Prentice-Hall International Editions, 1975.

ORHAN, S.; AKTÜRK, N.; ÇELIK, V.; Vibration Monitoring for Defect Diagnosis of Rolling Element Bearings as a Predictive Maintenance Tool: Comprehensive Case Studies. **NDT and E International**, v. 39, n. 4, p. 293-298, June 2006.

PATEL, R. ; GUPTA, S.P.; KUMAR, V.; Real-time identification of Distributed Bearing Faults in Induction Motor; **2006 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems**, PEDES '06.

QING, H. ; BIN, T.; DONGMEI, D.; Design of Portable System of Measurement and Analysis for Vibration Based on S3C2440; **2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation**, ICMTMA 2009, v. 3, p. 370-373, 2009.

RATCLIFFE, C. et al.; Investigation into the Use of Low Cost MEMS Accelerometers for Vibration Based Damage Detection; **Composite Structures**, v. 82, n. 1, p. 61-70, Jan. 2008.

SADOUGHI, A.; BEHBAHANIFARD, H.; A Practical Bearing Fault Diagnoser. **Proceedings of 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**, CMD 2008, p. 151-154, 2008.

SCHUBRING, A.; FUJITA, Y.; Ceramic Package Solutions for MEMS Sensors; A Practical Bearing Fault Diagnoser; **Proceedings of the IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology (IEMT) Symposium**, p. 268-272, 2007.

*Site* da SKF, Fotos dos rolamentos. Disponível em 19/08/2009 < <u>http://www.skf.com/</u> portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=pt&newlink=5\_15\_020010 >

STACK, J.R.; HABETLER, T.G.; HARLEY, R.G.; Fault Classification and Fault Signature Production for Rolling Element Bearings in Electric Machines; **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 40, p. 735-739, Issue 3, June 2004.

TANDON, N.; CHOUDHURY, A.; Review of vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element bearings; **Tribology International**, v. 32, n. 8, p. 469-480, Aug. 1999. WANG, W.; JIANU, O. A.; A Smart Sensing Unit for Vibration Measurement and Monitoring; **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**, v. 15, p. 70-78, Issue 1, Feb. 2010.

WEI Z.; HABETLER, T.G.; HARLEY, R.G.; Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review; **IEEE International Symposium** -**Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives**, 2007. SDEMPED 2007. on 6-8, p. 3-6, Sept. 2007.

YANG, D.-M.; Induction Motor Bearing Fault Detection with Non-stationary Signal Analysis. **4th IEEE International Conference - Mechatronics**, ICM2007 on 8-10, p. 1-6, May 2007.

YUH-TAY, S.; An Analysis Method for the Vibration Signal with Amplitude Modulation in a Bearing System. **Journal of Sound and Vibration**, 303, p. 538-552, 2007.