

Roberto Carlos Díaz González

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO ANALISADOR DE
VIBRAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA USO EM MANUTENÇÃO
PREDITIVA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Arcanjo Lenzi.

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

González, Roberto Díaz

Desenvolvimento de um protótipo analisador de vibração de baixo custo para uso em manutenção preditiva / Roberto Díaz González ; orientador, Arcanjo Lenzi - Florianópolis, SC, 2014.

106 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. MEMS. 3. Manutenção preditiva. 4. Vibrações. I. Lenzi, Arcanjo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Roberto Carlos Díaz González

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO ANALISADOR DE
VIBRAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA USO EM MANUTENÇÃO
PREDITIVA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, março de 2014.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D. (UFSC)
Orientador

Prof. Acires Dias, Dr. Eng. (UFSC)

Prof. Roberto Jordan, Dr. Eng. (UFSC)

Prof. Paulo Roberto de Oliveira Bonifácio, Dr. Eng. (IFSC-Joinville)

Este trabalho é dedicado à minha querida família, aos meus amigos e colegas, e especialmente à minha mãe Mireya e ao meu pai José.

AGRADECIMENTOS

Ao povo brasileiro, por me acolher nesse país, do qual recebi carinho, apoio e compreensão nas mais diversas atividades e ações da vida.

À UFSC e ao POSMEC, pela possibilidade de realizar esta pesquisa, contribuindo com as instalações necessárias para a vida universitária.

Ao CNPq e à Fundação Certi, pelo suporte financeiro imprescindível em todo tempo deste trabalho.

Ao professor Arcanjo Lenzi, que me deu muito mais do que orientação no trabalho, com constante preocupação pela minha pessoa e minha família no Chile.

Ao Roberto Caeiro e José Carlos Boaretodo Labelectron, que colocaram toda confiança em mim para a realização deste trabalho.

A todos os pesquisadores do LVA que apoiaram diretamente neste trabalho: Marcelo Bustamante, Giovanni Bratti e Alexandre Teixeira.

À minha família, pela paciência, atenção e compreensão nesta difícil decisão de morar longe de casa.

A todos os amig@s que estiveram nas alegrias e nos momentos difíceis, que acompanham sempre o caminho de todo projeto de vida novo, que no final tem outras portas e outros desafios que levam a um futuro melhor.

Pensar é o trabalho mais difícil que existe, e esta é, provavelmente, a razão por que tão poucos se dedicam a ele.

(Henry Ford)

RESUMO

No presente trabalho foi desenvolvido e avaliado um protótipo de equipamento de análise de vibração de baixo custo, incluindo o micro controlador Arduino Due, e acelerômetros da nova tecnologia de micro máquinas MEMS, visando os requerimentos mínimos estabelecidos num programa de Manutenção Preditiva padrão. O Arduino Due é a última versão dos micro controladores Arduino e permite a comunicação entre o acelerômetro e o computador, já que incorpora os protocolos de comunicação SPI e USB. O acelerômetro digital MEMS é o elemento fundamental do protótipo, considerando a sua natureza capacitiva e custo muito inferior ao sensor piezo elétrico padrão, torna-se uma alternativa no desenvolvimento do protótipo. A avaliação do protótipo foi realizada em laboratório e em campo, mas, mostra diferenças consideráveis ao ser comparado com o equipamento de análise do laboratório. As principais deficiências do protótipo são instabilidade nas medições ou medições diferentes em dias diferentes, os espectros de frequências apresentam variações de amplitude e impossibilidade de realizar uma análise em tempo real. Mesmo assim, deve-se lembrar que os elementos selecionados para o desenvolvimento do protótipo são os mais econômicos do mercado, e portanto, um aumento na qualidade pode incidir favoravelmente nos resultados das medições em futuras pesquisas.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. MEMS. Vibrações. Acelerômetro. FFT.

ABSTRACT

In the present work it was developed and evaluated a low cost vibration analysis equipment prototype, including an Arduino Due micro controller, and the new micromachines technology MEMS accelerometers, aiming to fulfill the minimum requirements presented by a standard Predictive Maintenance program. The Arduino Due is the latest version of the Arduino controller cards and enables communication between the accelerometer and the computer, since it incorporates both communication protocols SPI and USB. Digital MEMS accelerometer is the prototype fundamental element, considering its capacitive nature and much lower cost than standard piezo-electric sensor, it becomes an alternative in the development of the prototype. Prototype evaluation was performed in the laboratory and in the field, but shows considerable differences when compared to equipment for laboratory analysis. The main weaknesses of the prototype are instability in different measurements when measured on different days, the frequency spectra amplitude variations and inability to perform a real-time analysis. Still, it should be remembered that selected elements for prototype development are the most economical in the market and therefore an increase in quality may relate favorably on the results to be obtained in future research.

Keywords: Predictive maintenance. MEMS. Vibrations. Accelerometer. FFT.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de taxa de falha.....	29
Figura 2. Fotografia normal e fotografia de infravermelho (direita).33	
Figura 3. Exemplo de equipamento de ultrassom.	34
Figura 4. Exemplo de espectro de desbalanceamento.	38
Figura 5. Exemplo de espectro de desalinhamento.	38
Figura 6. Exemplo de espectro de rolamento defeituoso.	40
Figura 7. Exemplo de espectro de folgas mecânicas.	40
Figura 8. Exemplo de máquina e seus pontos de medição, 1 e 2 para motor e 3 e 4 para bomba centrífuga.	43
Figura 9. Processo de digitalização do sinal.	44
Figura 10. Diferentes modelos de analisadores comerciais de vibração usando acelerômetros.	45
Figura 11. Imagens dos acelerômetros ICP e uma unidade de condicionamento do sinal.	47
Figura 12. Componentes principais do acelerômetro MEMS ADLX335 da <i>AnalogDevice</i>	48
Figura 13. Diagrama do acelerômetro MEMS.	50
Figura 14. Imagem microscópica do acelerômetro MEMS.....	51
Figura 15. Acelerômetro ADIS 16227 da <i>AnalogDevice</i>	52
Figura 16. Diagrama interno do ADIS 16227 da <i>AnalogDevice</i>	53
Figura 17. Exemplo de tabela com acelerômetrose suas características.	54
Figura 18. Top 30 fabricantes dos acelerômetros MEMS.	54
Figura 19. MicrocontroladorRaspberryPi.....	56
Figura 20. Níveis de referência para avaliar severidade de vibração.	59
Figura 21. Lista de acelerômetros logo da aplicação dos filtros de seleção da tabela 4.	61
Figura 22. Comparação entre micro controladores.	62
Figura 23. Micro controlador Arduino Due.	62
Figura 24. ADXL345, Arduino DUE e software IDE.	64

Figura 25. Equipamento de controle disponível no LVA.	68
Figura 26. Acelerômetro <i>Briuel&Kjaer</i> e protótipo com micro controlador <i>Arduino Due</i> e Acelerômetro MEMS <i>ADXL345</i>	68
Figura 27. Exemplo de espectros de frequência para três sinais senoidais, comprovando a sincronização dos dados nos três eixos. .	70
Figura 28. Tempo de leitura de uma sequência de amostras com dados de dois dígitos, ou seja de 10 até 99, pelo software MATLAB.	71
Figura 29.Exemplo de sinal com erros na leitura da aceleração do acelerômetro MEMS.....	72
Figura 30.Exemplo de sinal senoidal com dados consecutivos repetidos lidos desde o micro controlador.	73
Figura 31. Exemplo de gráfico gerado pelo protótipo ao ler um sinal senoidal com frequência igual a metade da frequência de amostragem.....	74
Figura 32. Exemplo de frequência de amostragem de teste 391 Hz, 7.500 amostras.	75
Figura 33. Efeito do Offset e Scaling Factor.	76
Figura 34. Offset medido com 1g em Z, 0g em X e Y, 5000 amostras.	77
Figura 35. Valor do Offset medido em senóides com diferentes frequências no eixo Z.	77
Figura 36. Valores do ScalingFactorcalculado para diferentes frequências no eixo X.	79
Figura 37. Montagem dos acelerômetros no excitador de vibração. .	80
Figura 38. Amplitude gerada pelo protótipo, para diferentes frequências de amostragem.	81
Figura 39. Medições realizadas pelo protótipo em dois dias diferentes.	81
Figura 40. Resposta de frequência do sistema disponível no LVA ao manter a tensão do amplificador constante, para três valores diferentes de tensão.	82
Figura 41. Resposta de frequência do protótipo ao manter a tensão do amplificador constante, para três valores diferentes de tensão.	83

Figura 42. Avaliação da linearidade do sistema de medição disponível no LVA.	83
Figura 43. Avaliação da linearidade do protótipo.	84
Figura 44. Comparação da amplitude de aceleração, Protótipo v/s sistema do LVA.....	85
Figura 45. Porcentagem de erro da diferença de leitura do protótipo v/s sistema disponível no LVA.	85
Figura 46. Espectro de compressor de nitrogênio obtido com equipamento Sinus.	86
Figura 47. Espectro de compressor de nitrogênio obtido com protótipo.Fonte: Autor.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores mínimos das características dos elementos.	44
Tabela 2. Exemplo de acelerômetros MEMS e seus fabricantes.....	55
Tabela 3. Falhas em máquinas rotativas e frequências.....	58
Tabela 4. Parâmetros esperados do acelerômetro.....	60
Tabela 5. Comparação entre diversas configurações para o protótipo. .	60
Tabela 6. Características do acelerômetro ADXL345.....	63
Tabela 7. Características da placa controladora Arduino Due (ARDUINO (b), 2013).	63
Tabela 8. Características do equipamento de controle.	67
Tabela 9. Tempos de envio de dados pelo micro controlador quando usados números com diferente quantidade de dígitos.	71
Tabela 10. Frequências de amostragem do acelerômetro.....	74
Tabela 11. Tempo de pausa entre as leituras da porta SPI.	75
Tabela 12. Valores escolhidos para <i>Offset</i> nos três eixos coordenados.	78
Tabela 13. <i>Scaling Factor</i> nos três eixos coordenados.	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$accel_{MEMS}$	–	Dado de aceleração fornecido pelo acelerômetro digital
A_{real}	–	Aceleração Real calculada
BPM	–	Ball Passing Frequency Inner race
BPFO	–	Ball Passing Frequency Outer race
BSF	–	Ball Spin Frequency
CAD	–	Conversor Analógico Digital
CERTI	–	Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
DSP	–	Digital Signal Processing
E/S	–	Entrada/Saída
FFT	–	Fast Fourier Transform
FTF	–	Fundamental Train Frequency
ICP	–	Integrated Circuit Piezoelectric
ISO	–	International Standard Organization
LED	–	Light-emitting Diode
LVA	–	Laboratório de Vibrações e Acústica
MATLAB	–	Matrix Laboratory
MEMS	–	Micro ElectroMechanical Systems
NAN	–	Not a Number
NBR	–	Norma Brasileira
RPM	–	Revolutions Per Minute
S/N	–	Serial/Number
SPI	–	Serial Peripheral Interface
USB	–	Universal Serial Bus
μs	–	Micro segundo
V_{sense}	–	Tensão de saída

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	25
1.1.	OBJETIVOS	27
1.1.1.	Objetivo geral	27
1.1.2.	Objetivos específicos.....	27
1.2.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	27
2.	REVISÃO DOS CONCEITOS E MÉTODOS BÁSICOS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA	29
2.1.	TIPOS DE ANÁLISES	31
2.1.1.	Termografia.....	32
2.1.2.	Ultrassom.....	33
2.1.3.	Análise de lubrificantes	34
2.1.4.	Análise de partículas de desgaste	35
2.1.5.	Análise de vibração	36
3.	ELEMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO ANALISADOR.....	42
3.1.	DESCRIÇÃO GERAL	42
3.2.	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PROTÓTIPO	42
3.3.	TRANSDUTORES DISPONÍVEIS NO MERCADO	45
3.4.	ACELERÔMETROS MEMS.....	49
3.4.1.	Tipos de sinais de saídas.....	52
3.4.2.	Alimentação do acelerômetro.....	53
3.5.	MICRO CONTROLADOR.....	55
3.5.1.	Periféricos.....	56

3.6. NÍVEIS TÍPICOS DE VIBRAÇÃO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA.....	57
3.6.1. Limite de amplitude de aceleração	59
4. RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO	67
4.1. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE.....	67
4.2. TESTES INICIAIS COM O MICRO CONTROLADOR (ARDUINO DUE).....	68
4.3. TESTES COM MICRO CONTROLADOR E ACELERÔMETRO.....	72
4.4. TESTES USANDO O PROTÓTIPO COMPLETO	80
5. CONCLUSÕES	88
5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	89
6. REFERÊNCIAS	90
ANEXO 1	97
ANEXO 2	100
ANEXO 3	104

1. INTRODUÇÃO

Grandes transformações têm-se apresentado nas últimas décadas nos mercados e na indústria. Novos conceitos como globalização, melhoria da qualidade de serviços, certificação de processos, sustentabilidade, entre outros, têm importância estratégica nas decisões gerenciais. O impacto desse novo ambiente atingiu todos os setores das empresas, incluindo a atividade de manutenção.

Pode-se definir a manutenção como o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos, visando garantir a continuidade de sua função dentro de parâmetros como disponibilidade, qualidade, prazo, custos e vida útil adequados. Assim, a manutenção também passa a buscar o reparo rápido, reduzindo os serviços de emergência (ASSIS e NOGUEIRA, 2006).

Este processo pode ser desenvolvido de diferentes formas, criando assim várias filosofias de manutenção e, considerando certas divergências quanto à classificação dos tipos de manutenção, são consideradas como principais as seguintes:

Manutenção Corretiva

A Manutenção Corretiva é a filosofia de manutenção mais utilizada, sendo empregada em qualquer indústria que possua algum tipo de máquina, e qualquer que seja o nível ou programa de manutenção. A definição apresentada na norma NBR 5462(1994) para a Manutenção Corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida. Em suma, é toda manutenção com a intenção de corrigir falhas em equipamentos, componentes, módulos ou sistemas, visando restabelecer sua função. Geralmente está associada aos custos elevados devido à sua natureza reativa.

Manutenção Preventiva

O objetivo principal da Manutenção Preventiva é a garantia da função ao longo do ciclo de vida. O conhecimento estatístico da taxa de falha dos itens é fundamental na Manutenção Preventiva, pois nesse conhecimento baseiam-se as intervenções programadas ao longo do tempo da vida útil do item. A Manutenção Preventiva também é chamada de manutenção baseada em intervalos/tempo.

A norma NBR 5462(1994) define Manutenção Preventiva como sendo a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritivos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

Manutenção Preditiva

Pode-se considerar que com o aperfeiçoamento das técnicas de processamento de sinais, tornou possível o acompanhamento da evolução na vida útil dos itens, e determinar tempos certos da intervenção baseados na medição dos parâmetros dos processos produtivos. A Manutenção Preditiva aponta na direção da disponibilidade, pois as medições e avaliações são realizadas com o equipamento em operação.

A definição da NBR 5462(1994) para a Manutenção Preditiva é a manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a Manutenção Preventiva e diminuir a Manutenção Corretiva.

A Manutenção Preditiva requer mão de obra qualificada nos diferentes tipos de análise para que as ações de intervenção tenham qualidade equivalente aos dados registrados (ISO 18436-2, 2003).

O desenvolvimento e integração de novas tecnologias apresentam uma oportunidade de pesquisa e avaliação de equipamento de análise de sinais. Toda máquina rotativa gera vibração, fenômeno que se torna fundamental ao considerar a filosofia da Manutenção Preditiva baseada no comportamento deste e outros sintomas mensuráveis. Mas, geralmente as tecnologias modernas requerem investimentos em equipamento, recursos humanos, e tempo que não sempre estão disponíveis na medida necessária para atingir resultados aceitáveis na equação custo-benefício. Este é o objetivo deste trabalho, levar as vantagens da Manutenção Preditiva a um maior campo de aplicações, mediante o desenvolvimento de ferramentas de baixo custo e aplicação mais simplificada, visando a uma filosofia de manutenção intrinsecamente científica.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Desenvolver um equipamento de baixo custo que permita o monitoramento de máquinas, considerando as vantagens da Manutenção Preditiva, baseada numa análise de vibração. Este equipamento será desenvolvido em parceria com a Fundação CERTI.

1.1.2. Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo padrão de análise de vibração e analisar seus limites de aplicação.
- Fornecer a especificação e as características técnicas do equipamento de aquisição dos sinais devibração.
- Fornecer o algoritmo de processamento digital de sinais como base para a programação do software.
- Validar o modelo desenvolvido realizando medições em uma máquina típica, com o protótipo de equipamento e software desenvolvidos pela Fundação CERTI.

1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Nesta dissertação é apresentado o desenvolvimento do protótipo de analisador de vibração de baixo custo. Ao longo dos capítulos são apresentadas as diferentes partes da pesquisa inicial, que levaram à escolha dos elementos essenciais do protótipo e, finalmente, os testes de desempenho realizados.

O Capítulo 2 apresenta uma visão geral da Manutenção Preditiva e as características principais que a compõem. São apresentados os métodos de estudo de máquina mais usuais na indústria, as vantagens de realizar este tipo de análise, com especial foco na análise de vibração. Também nesta seção, são apresentados exemplos deste último tipo de análise, para os principais tipos de falha reconhecidos como os mais frequentes.

O desenvolvimento do protótipo é apresentado no Capítulo 3. São analisadas as características técnicas dos equipamentos de análise de vibração utilizados na Manutenção Preditiva, e as características dos componentes que serão utilizados no protótipo, ou seja, o acelerômetro

MEMS e o micro controlador. Já no final do capítulo são apresentados os componentes do protótipo adquiridos para esta pesquisa.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da pesquisa, considerando as características mínimas impostas pelo programa de Manutenção Preditiva padrão. Apresentam-se os testes realizados ao protótipo, com validações para cada componente, e provas no equipamento completo. Já testado o comportamento do protótipo, os resultados deste foram comparados com os de um equipamento de maior precisão, normalmente usados em laboratórios de Vibrações e Acústica.

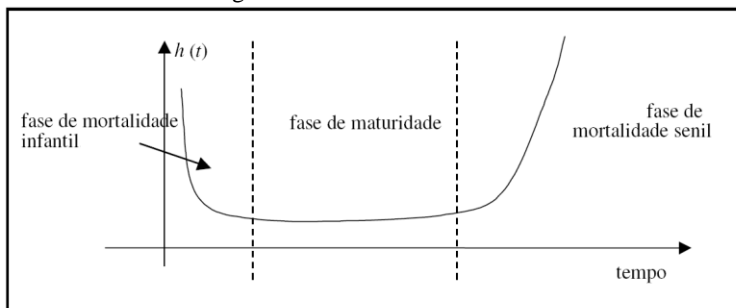
Finalmente, o Capítulo 5 apresenta a discussão final deste trabalho e as propostas para futuras pesquisas na área.

2. REVISÃO DOS CONCEITOS E MÉTODOS BÁSICOS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

A Manutenção Preditiva é conhecida também como manutenção sob condição ou manutenção baseada no estado do equipamento (*ConditionBasedMaintenance*). A premissa da Manutenção Preditiva baseia-se no fato de que o monitoramento regular das condições mecânicas reais das máquinas, e do rendimento operativo dos sistemas de processo, garante um intervalo máximo entre os reparos (MOBLEY, 2002). Prever (ou prevenir) as falhas nos equipamentos ou sistemas é o objetivo da Manutenção Preditiva, através de acompanhamento dos diferentes parâmetros, permitindo a operação contínua por períodos maiores possíveis.

O comportamento da taxa de falha de um equipamento pode ser descrito pela curva da banheira mostrada na figura 1. Esta curva representa as etapas típicas de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e mortalidade senil (WUTTKE, 2008).

Figura 1. Curva de taxa de falha.



Fonte: adaptado de Wuttke, 2008.

No primeiro período denominado mortalidade infantil, tem-se uma taxa decrescente, geralmente as falhas são prematuras e decorrem de má especificação de projeto ou por falhas na fabricação de componentes, peças defeituosas, processos de fabricação inadequados, mão-de-obra desqualificada, estocagem inadequada, instalação imprópria, partida deficiente, entre outras.

Na maturidade, já não acontecem mais falhas prematuras, pois foram todas corrigidas e se observa uma taxa de falha constante. As falhas que ocorrem nesta fase são aleatórias, causadas por incidentes imprevisíveis, tais como catástrofes naturais ou erros de operação, nos

quais o sistema produtivo é exposto a quantidades de energia liberadas em uma taxa que o sistema não suporta.

Finalmente, a uma taxa de falhas crescente se associa o período de mortalidade senil, fundamentalmente por desgaste dos materiais. Neste período as falhas se tornam inevitáveis por perda na resistência dos materiais, originadas por corrosão, fadiga, trincas, deterioração mecânica, elétrica ou química, manutenção insuficiente, entre outras. A curva da banheira é um gráfico que expressa a expectativa de falha de um item ao longo do tempo, considerando que ainda não falhou até este tempo (SELLITO, 2005). Mas, do ponto de vista da expectativa de vida de um item pode-se considerar como ponto de partida num programa de Manutenção Preditiva.

A Manutenção Preditiva aumenta a disponibilidade global das plantas industriais, minimizando o número e o custo das paradas não programadas criadas por falhas. A inclusão da Manutenção Preditiva num programa de gerência total da planta oferece a capacidade de otimizar a disponibilidade dos equipamentos do processo, reduzindo o custo da manutenção.

Mesmo sendo a Manutenção Preditiva um processo comprovado, requer um planejamento detalhado para obter um programa bem sucedido. Assim, para desenvolver um conceito eficaz de manutenção, esta tem que ser considerada de forma holística, isto é, devem-se abordar fatores que descrevem tecnicamente cada sistema para manter, fatores que descrevem as inter-relações entre os diferentes sistemas e a relação com o processo, bem como fatores que descrevem a estrutura geral da organização (WAEYENBERGH, PINTELON, 2004). O sistema de Manutenção Preditiva, assim concebido, é personalizado para cada organização e deve reunir os requerimentos particulares, incorporando o treinamento do pessoal envolvido no processo, incluindo os níveis gerenciais da empresa. Este último é essencial, considerando que o processo de aquisição de dados e posterior análise atingem um grande nível de complexidade técnica.

Dentro dos principais motivos pelos quais uma organização decide incorporar um programa de Manutenção Preditiva, pode-se mencionar a proteção de ativos financeiros, reconhecimento das capacidades de melhorias pelo nível diretivo, menores taxas de seguros e maiores possibilidades de obtenção da certificação ISO 9001 (MOBLEY, 2002). Tudo isso é possível ao atingir as vantagens da Manutenção Preditiva, que são:

- Redução dos custos de manutenção

- Redução de falhas nas máquinas
- Redução do tempo de parada para reparo
- Redução no estoque de peças sobressalentes
- Aumento da vida útil das peças
- Aumento da produção
- Melhoria na segurança do operador
- Verificação das condições do equipamento novo
- Verificação dos reparos
- Lucro global

Estudos têm demonstrado que a implementação de um adequado plano de manutenção resulta numa economia média de 20% a 25% nos custos diretos de manutenção, em conjunto com o dobro deste valor no aumento da produção. Também é necessário observar o fato de que as técnicas de Manutenção Preditiva exigem instrumentação tecnicamente sofisticada para efetuar a detecção e diagnóstico das máquinas. Estes instrumentos têm, geralmente, custo muito elevado e tecnicamente necessitam de pessoas treinadas para a análise dos resultados. As implicações de custo, seja em instrumentação sofisticada ou mão de obra qualificada, muitas vezes levam a um ponto de interrogação sobre o plano de adoção de Manutenção Preditiva. (SCHEFFER, GIRDHAR, 2004).

2.1. TIPOS DE ANÁLISES

O monitoramento preditivo é principalmente baseado nas técnicas (Manutenção Industrial, 2012):

- Análise de vibração
- Termografia
- Análise de lubrificantes
- Propriedades físico-químicas
- Cromatografia gasosa
- Espectrometria
- Ferrografia
- Radiografia
- Energia acústica (ultrassom)
- Energia eletromagnética (partículas magnéticas, correntes parasíticas)

- Fenômenos de viscosidade (líquidos penetrantes)
- Radiações ionizantes (Raio X ou Gamagrafia)
- Tribologia
- Monitoria de processos
- Inspeção visual
- Outras técnicas de análise não-destrutivas

A seguir serão destacados alguns destes métodos frequentemente usados em Manutenção Preditiva.

2.1.1. Termografia

Num programa de Manutenção Preditiva, a termografia é uma técnica aplicável não só nos componentes ou equipamentos elétricos, é também útil em máquinas, estruturas e outras aplicações. O instrumental utilizado tem a capacidade de detectar emissões de energia infravermelha, por exemplo, a temperatura superficial. Ao detectar variações da temperatura é possível diagnosticar muitos problemas incipientes.

A termografia baseia a análise no fato de que todos os objetos que tem uma temperatura maior do que o zero absoluto emitem energia ou radiação. A radiação infravermelha é um tipo de energia com o comprimento de onda mais curto de todas as radiações e, portanto é invisível aos nossos olhos, e só pode ser verificada com equipamento especial. O objeto, ao aumentar a temperatura, aumenta também a quantidade de energia emitida.

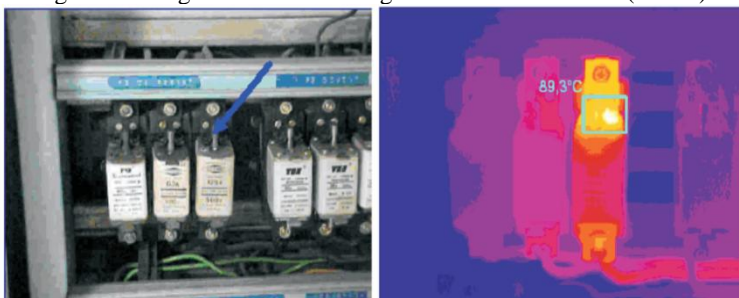
Todos os sistemas de infravermelho (dos simples aos mais complexos) são sensíveis apenas à energia infravermelha irradiada. Não medem a temperatura, mas são úteis em aplicações em que uma variação de temperatura na condição da superfície ou material pode causar uma diferença no nível de energia irradiada, que pode ser detectada pela câmara de infravermelhos. A termografia é uma técnica de Manutenção Preditiva quando usada nestas condições (SCHEFFER, GIRDHAR, 2004):

- Não faz contato com a superfície.
- A técnica não envolve quaisquer ações perigosas.
- Pode ser utilizado em zonas de risco.
- Não é afetado por ondas eletromagnéticas.
- Pode ser usado quando os sistemas estão operando.

- Fornece informações instantâneas.
- Os dados podem ser coletados e armazenados num formato digital.

A radiação térmica é a energia emitida continuamente por todo corpo que se encontra a uma temperatura não nula. Essa energia é transmitida no espaço na forma de ondas eletromagnéticas ou fótons. Os resultados obtidos com os termógrafos são apresentados instantaneamente (figura 2), durante a inspeção, na forma de imagens térmicas ou termogramas, com o auxílio de um software adequado à técnica da termografia.

Figura 2. Fotografia normal e fotografia de infravermelho (direita).



Fonte: Oliveira, 2010.

Os termogramas representam as temperaturas dos corpos na forma de cores e, como a imagem obtida com o termógrafo é provida de uma escala que correlaciona cor e temperatura, é possível a obtenção de resultados esclarecedores quanto aos problemas ligados direta ou indiretamente à temperatura. Com essas imagens, também é possível obter-se a temperatura em um ponto ou área do objeto analisado (SOUSA, 2010).

2.1.2. Ultrassom

O ultrassom utiliza conceitos similares aos de análise de vibração. Ambos monitoram o ruído gerado pelas máquinas ou sistemas da planta para determinar a sua condição operacional efetiva. Ao contrário de monitoramento de vibração, no entanto, por ultrassom são monitoradas as frequências mais altas produzidas pelos processos mecânicos das máquinas. A gama de monitoramento normal das técnicas ultrassônicas atinge frequências na faixa de 20 kHz até 100 kHz.

As três aplicações principais dos instrumentos (figura 3) de ultrassom, quando usados como parte de um programa de Manutenção Preditiva: análise de ruído, detecção de vazamentos, e testes de materiais.

A principal aplicação para monitoramento de ultrassom é na detecção de vazamentos. O fluxo turbulento de líquidos e de gases através de um orifício (ou vazamento) produz uma assinatura de alta frequência que pode ser facilmente identificada usando técnicas de ultrassons, considerando que tem um comprimento de onda pequeno e muito direcional. Esta técnica é ideal na detecção de vazamentos em válvulas, purgadores, tubulações, entre outros (MOBLEY, 2002).

Figura 3. Exemplo de equipamento de ultrassom.



Fonte: SDT, 2014.

Esta técnica pode ser utilizada em conjunto com atividades de lubrificação, para determinar se a graxa atingiu o rolamento dentro de um mancal. Isso é avaliado pela melhora no nível de ruído detectado pelo aparelho.

2.1.3. Análise de lubrificantes

A análise de óleo tornou-se uma importante contribuição para a Manutenção Preditiva. Os laboratórios recomendam que as amostras de lubrificante de máquina sejam tomadas em intervalos programados, para determinar a condição da película de lubrificante, que é crítica, na operação da máquina. A análise dos óleos permite identificar os primeiros sintomas de desgaste de um componente. A identificação é feita a partir do estudo da quantidade de partículas, tamanho, forma e composição, que fornecem informações precisas sobre as condições das superfícies que estão em movimento relativo sem a necessidade de se

desmontar o conjunto (LAGO, 2007). Tipicamente, são realizados os seguintes testes de óleos:

- *Viscosidade*: A viscosidade determina a capacidade do óleo de evitar o contato metal-metal e, por outro lado, a capacidade de lubrificar.
- *Contaminação*: A contaminação do óleo por água ou refrigerante pode causar grandes problemas em um lubrificante.
- *Conteúdo de sólidos*: A presença de sólidos em um sistema de lubrificação pode aumentar significativamente o desgaste das peças lubrificadas.
- *Fuligem de combustível*: A fuligem provocada pela queima de combustíveis é um indicador importante no óleo usado em motores diesel.
- *Oxidação*: Oxidação de óleo lubrificante pode resultar em depósitos de laca, corrosão do metal, ou espessamento do próprio óleo.
- *Índice de Acidez Total*: A acidez do óleo é uma medida da quantidade de material ácido, ou semelhante aos ácidos, na amostra de óleo.
- *Número total Base*: O número base indica a capacidade do óleo para neutralizar a acidez. Quanto maior o Número Total Base, maior será a sua capacidade para neutralizar a acidez.
- *Contagem de Partículas*: Neste teste, um elevado número de partículas indica que as máquinas podem estar trabalhando de forma anormal, ou que falhas podem ocorrer por causa de orifícios bloqueados temporária ou permanentemente.

2.1.4. Análise de partículas de desgaste

O desgaste é uma consequência inevitável na superfície de contato entre as peças da máquina, como eixos, rolamentos, engrenagens, mesmo em sistemas adequadamente lubrificados. A análise das partículas no lubrificante pode dar informações importantes do estado ou condição da máquina. Essa informação deriva do estudo da forma, composição, tamanho e quantidade das partículas presentes na amostra.

Principalmente são usados dois métodos para analisar amostras de partículas de desgaste. O primeiro método, chamado espectroscopia ou análise espectrográfica, usa filtros graduados para separar sólidos por tamanhos. Análise espectrográfica normal é limitada à contaminação por

partículas com uma dimensão de 10 microns, ou menos. Assim, os contaminantes maiores são ignorados, limitando os benefícios que podem ser obtidos a partir da técnica. O segundo método, chamado ferrografia, separa partículas de desgaste usando um campo magnético. Obviamente, a limitação desta abordagem é que apenas as partículas magnéticas são removidas para análise. Materiais não magnéticos, tais como cobre ou alumínio, que formam parte do desgaste de materiais em máquinas típicas, são excluídos da amostra. A análise ferrográfica normal conseguiu identificar partículas de até 100 microns, e fornece uma melhor representação da contaminação total da amostra.

2.1.5. Análise de vibração

Neste trabalho, o objetivo está direcionado à técnica de análise de vibração, a que pode fornecer maior quantidade de informações em comparação com outras técnicas (ILEARNVIBRATION, 2009).

Todas as máquinas em operação geram vibração que as levam a um processo de deterioração. Ao acompanhar o progresso do nível de vibração, é possível obter informações sobre a condição da máquina. Essas vibrações se transmitem a todo o conjunto da máquina, terminando por produzir um espectro de frequências próprio daquele sistema, chamada “assinatura”. A análise dessa assinatura possibilita verificar se o equipamento está em condições normais de funcionamento ou com algum defeito incipiente que pode levar a uma falha (MARAN 2012).

O desenvolvimento dos instrumentos de medição, equipamento de monitoração e softwares especializados, utilizados atualmente, permite que sejam reconhecidos, em forma incipiente, diversos tipos de falhas como, por exemplo, desbalanceamento, desalinhamento, empenamento de eixos, excentricidade, desgaste em engrenagens e mancais, má fixação da máquina ou de componentes internos, roçamentos, erosão, ressonância, folgas, desgastes em rolamentos e outros componentes rotativos, fenômenos aerodinâmicos e/ou hidráulicos e problemas elétricos.

As técnicas de análise de vibração estão bastante desenvolvidas envolvendo desde os métodos mais simples como medição dos valores médios das amplitudes de vibração, até os mais complexos, chegando aos cálculos de correlação e espectros de frequência (HAMMOND e SHIN, 2008). A tecnologia eletrônica moderna pode melhorar a capacidade das equipes de manutenção para evitar falhas nas máquinas. Usando um analisador de vibração portátil, os técnicos de manutenção

podem monitorar vários tipos de equipamentos, reunindo as assinaturas de vibração do equipamento num período de tempo relativamente curto (MOSHAGE, 1993).

A técnica de vibração não avalia todos os sintomas presentes numa máquina, portanto, num programa de Manutenção Preditiva, esta técnica deve ser usada em conjunto com outras análises como ferrografia. Assim, pode-se avaliar melhor a condição real de funcionamento de uma máquina (MATHEW, STECKI, 1986).

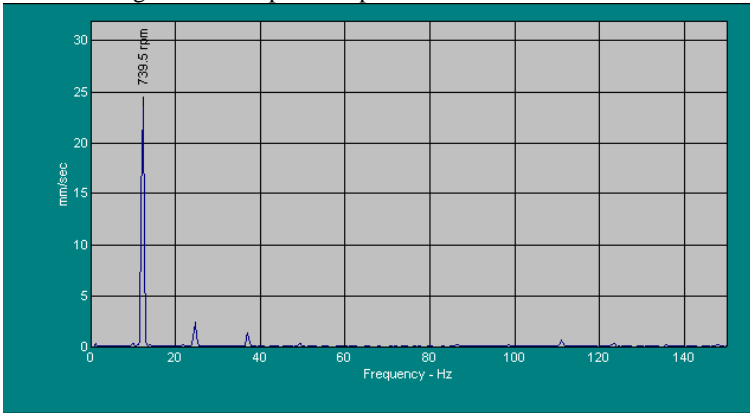
Em diagnose de falhas de máquinas, é preciso conhecer as frequências de vibração características de uma possível falha e analisar aquelas que coincidem com as frequências que sofreram aumento nos componentes do espectro. Isto implica no estudo inicial das especificações e desenhos de engenharia para cada máquina, fazer um plano esquemático e registrar nele as características geométricas e dinâmicas do equipamento, tais como: o número de pólos do motor, as velocidades de rotação, número de dentes das engrenagens, os dados das bolas/rolos dos mancais de rolamentos, etc.

Dentre as diversas fontes de vibração as mais comuns e que podem ser responsabilizadas pela maior parte das vibrações mecânicas indesejáveis estão listadas a seguir (MANTENIMIENTO MUNDIAL, 2012):

Desbalanceamento

É muito comum que as máquinas rotativas apresentem desbalanceamento. Existe quando a distribuição de massas de um rotor não é uniforme em relação a um eixo de rotação e tem-se um aumento da amplitude de vibração na frequência de rotação 1xRPM (figura 4).

Figura 4. Exemplo de espectro de desbalanceamento.

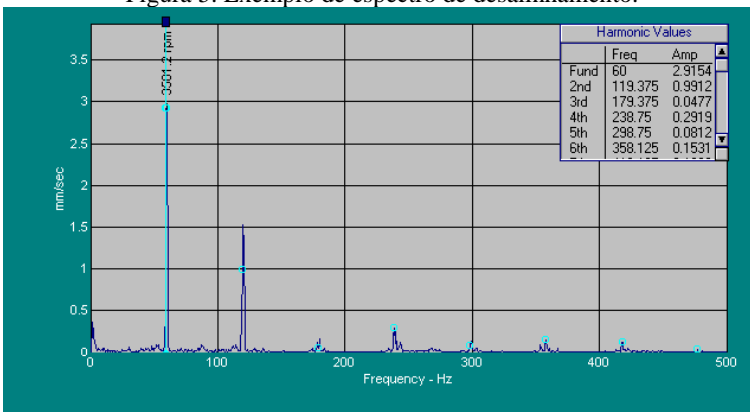


Fonte: Manutenimento Mundial, 2012.

Desalinhamento

Com o passar do tempo, as partes rotativas apresentam desvios do eixo de rotação em relação a outras peças no mesmo eixo original. Problemas sérios de vibração podem ocorrer mesmo quando acoplamentos são alinhados dentro da tolerância especificada pelo fabricante. Neste tipo de falha pode-se perceber a existência de harmônicas da frequência fundamental em 2X e 3X (figura 5).

Figura 5. Exemplo de espectro de desalinhamento.



Fonte: Manutenimento Mundial, 2012.

Mancais de rolamento defeituosos

Os rolamentos geram quatro frequências características de defeitos que são (ADITEQ, 2012):

Rotação da Gaiola:

$$FTF = \frac{S}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \emptyset\right) \quad (1)$$

Rotação do Elemento Rolante:

$$BSF = \frac{SD}{2d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \emptyset\right)^2\right) \quad (2)$$

Passagem de Elementos pela Pista Externa:

$$BPFO = \frac{Sn}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \emptyset\right) \quad (3)$$

Passagem de Elementos pela Pista Interna:

$$BPFI = \frac{Sn}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \emptyset\right) \quad (4)$$

onde:

$S = S_i - S_e$

S_e = frequência de rotação da pista externa

S_i = frequência de rotação da pista interna

d = diâmetro dos elementos rolantes

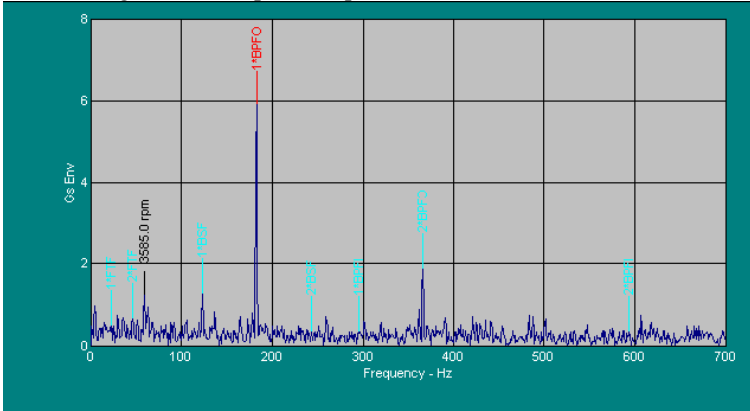
D = diâmetro primitivo

n = nº de elementos rolantes

\emptyset = ângulo de contato

Com estas frequências é possível identificar qual dos componentes do rolamento apresenta falha, como o exemplo mostrado na figura 6.

Figura 6. Exemplo de espectro de rolamento defeituoso.

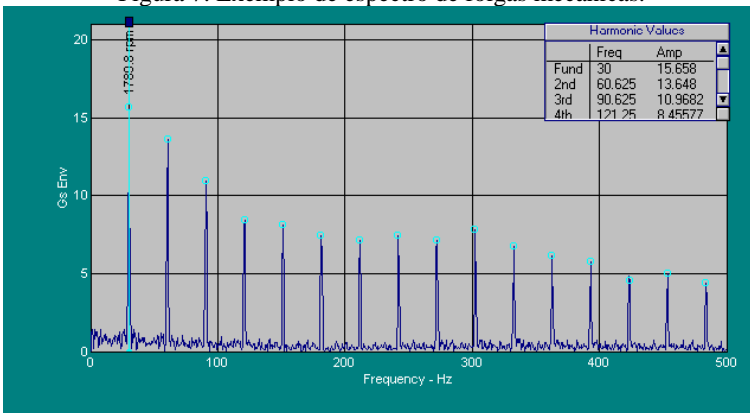


Fonte: Manutenimento Mundial, 2012.

Folgas mecânicas

Todo tipo de peças soltas que estiverem em contato com os eixos rotativos, como bases trincadas, ocas e parafusos soltos, geram vibração com grande número de picos harmônicos e com ruído de fundo elevado. Estes picos são causados pelos impactos entre as peças soltas ou com folgas mecânicas. A figura 7 mostra um exemplo de espectro de vibração em máquina com folga mecânica.

Figura 7. Exemplo de espectro de folgas mecânicas.



Fonte: Manutenimento Mundial, 2012.

A Manutenção Preditiva é um conjunto de técnicas que, baseado no acompanhamento das condições da máquina, permite determinar o momento oportuno no qual é necessário desenvolver ações de manutenção, otimizando o tempo da vida útil dos equipamentos do processo. Porém, é uma técnica que necessita de equipamento tecnologicamente avançado e pessoal treinado especificamente para os diversos tipos de análise. Dentro destas análises, o acompanhamento da vibração é uma ferramenta fundamental, mas na atualidade somente é realizado na indústria por empresas que possuem máquinas consideradas críticas no processo produtivo.

Neste trabalho o foco está no desenvolvimento e avaliação de um analisador de vibração de baixo custo. Com esse objetivo, quer-se integrar dentro do protótipo a nova tecnologia de sensores MEMS e avaliar o potencial de aplicação na Manutenção Preditiva destes acelerômetros, que apresentam um custo inferior quando comparados com o acelerômetro piezo-elétrico, típico na indústria.

Um analisador de vibração de baixo custo tem o potencial de atingir um volume maior de aplicações, e não somente nas máquinas críticas mencionadas. Desta forma, pode-se tornar uma ferramenta acessível para os profissionais da área de manutenção e, conseqüentemente, encaminhar numa maior extensão as vantagens da Manutenção Preditiva aos processos produtivos.

3. ELEMENTOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO DO ANALISADOR.

Para auxiliar na definição dos componentes básicos a serem usados no desenvolvimento do protótipo do equipamento de aquisição de dados de vibração, foram considerados diversos aspectos relacionados às diferentes alternativas de aquisição de sinais, transdutores, fluxos de dados e programação.

3.1. DESCRIÇÃO GERAL

O sistema de análise de vibração para Manutenção Preditiva considera, numa primeira etapa, um sistema ou equipamento que seja capaz de obter dados analógicos e converterem dados digitais. Estes dados analógicos são gerados por um transdutor de vibração conhecido como acelerômetro. Após, será realizado o processamento digital dos sinais obtidos (DSP pelas siglas em inglês). Isto será iniciado justamente no momento da digitalização do sinal analógico. Uma vez digitalizados os sinais, será realizado o processamento digital necessário para a análise, através de um micro controlador que seja capaz de se comunicar com o software de programação.

3.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO PROTÓTIPO

Para o desenvolvimento do protótipo do analisador de vibração serão consideradas as seguintes características:

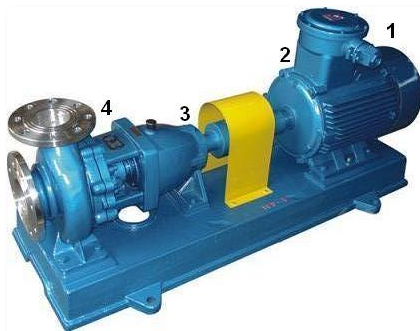
- Condições mínimas de análise impostas pelo programa de Manutenção Preditiva baseado em vibração.
- Capacidade de manuseio de dados gerados por um mínimo de doze canais analógicos de dados.
- Digitalização dos dados analógicos.
- Micro controlador de programação aberta.
- Programação em MATLAB.
- Baixo custo.

As características técnicas dos elementos deverão respeitar as condições mínimas necessárias para o desenvolvimento do programa de Manutenção Preditiva baseado na análise de vibração, o qual é determinado por uma faixa de frequência de medição de 1 Hz até 10

kHz, garantindo assim a análise de falhas observadas nos sinais de alta frequência, como por exemplo rolamentos e seus harmônicos (HOWARD, 1994).

A análise de vibração é realizada em máquinas rotativas, as quais em grande maioria são acionadas por um motor externo, e considerando que deve-se realizar a análise de fase entre dois pontos de medição tanto na máquina e no motor, tem-se como resultado quatro pontos de medição (figura 8). A análise de fase entre dois pontos é útil para confirmar diagnóstico de desbalanceamento (SEMAPI, 2008). Além disso, nos pontos de medição deverão ser adquiridos os dados dos três eixos coordenados, sempre que possível. Assim, o protótipo deverá ter uma capacidade de manuseio de dados gerados por um mínimo de quatro pontos de medição, nas direções dos três eixos ortogonais, resultando em doze canais de entrada de sinais.

Figura 8. Exemplo de máquina e seus pontos de medição, 1 e 2 para motor e 3 e 4 para bomba centrífuga.

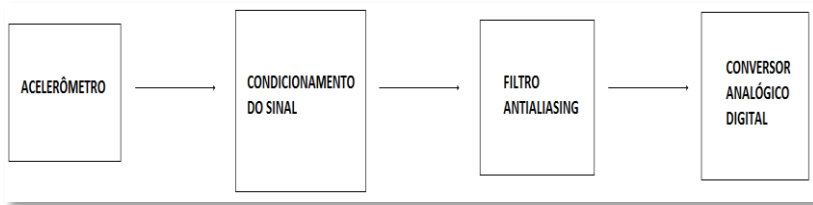


Fonte: Adaptado de JiangsuSuhuaPumpCo. Ltd., 2012.

Os sinais analógicos gerados nos pontos de medição deverão ser digitalizados para seu posterior análise no software. Nesse processo o Conversor Analógico Digital, CAD, necessita de uma frequência mínima de amostragem de 20 kHz para garantir a faixa de frequência de análise até 10 kHz e, o filtro anti-aliasing terá uma frequência de corte de 10 kHz, necessário porque garante que não ocorrerá o fenômeno de *aliasing* no Conversor Analógico Digital. Geralmente, os analisadores comerciais possuem uma frequência de amostragem de 2,3 ou 2,5 vezes a frequência máxima de análise.

A figura 9 mostra um esquema dos principais componentes necessários para o processo de digitalização do sinal analógico.

Figura 9. Processo de digitalização do sinal.



Fonte: Autor.

Os componentes que aparecem na figura 9 estão descritos a seguir:

- *Acelerômetro*: Transdutor que converte uma vibração num sinal elétrico.
- *Condicionamento do sinal*: O sinal elétrico fornecido pelo acelerômetro deve ser ajustado segundo as condições de entrada do conversor analógico digital (CAD).
- *Filtro anti-aliasing*: Os cálculos matemáticos envolvidos no DSP geram a necessidade deste filtro.
- *CAD*: Transforma o sinal elétrico num sinal digital.

Tabela 1. Valores mínimos das características dos elementos.

Elemento	Característica	Valor
Acelerômetro	Faixa de frequência	1-10.000 Hz
Filtro anti-aliasing	Frequência de corte	10.000 Hz
CAD	Frequência de amostragem	20.000 Hz

Fonte: Autor.

Geralmente, nas aplicações de medição de vibração o filtro anti-aliasing e o conversor estão incorporados no equipamento de análise. Assim, a faixa de frequência é determinada pelas características do analisador (tabela 1). A figura 10 apresenta dois exemplos de analisadores portáteis de vibração disponíveis no mercado.

Figura 10. Diferentes modelos de analisadores comerciais de vibração usando acelerômetros.



Fonte: Semapi, 2012; Atec, 2012.

A manipulação dos dados será realizada por um micro controlador, o qual deverá aceitar diferentes protocolos de comunicação e formatação dos sinais de entrada e saída, com velocidade necessária para operar com doze canais na mais completa das situações, possibilidade de entradas analógicas e digitais, realizar cálculos matemáticos trigonométricos, e cuja programação seja compatível com o ambiente MATLAB.

MATLAB é um software de cálculo de ferramentas de engenharia, o qual inclui aplicações para processamento digital de sinais, como Transformada Rápida de Fourier (FFT), análise de fase, cespectrum, envolvente, entre outras. Além disso, permite a aplicação de ferramentas estatísticas nos dados obtidos.

3.3. TRANSDUTORES DISPONÍVEIS NO MERCADO

Atualmente, são encontradas muitas configurações e combinações que às vezes realizam mais de uma função no mesmo dispositivo, tais como acelerômetros com saídas digitais, CAD que incluem filtro anti-aliasing, entre outros. Além disso, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo, fator determinante na escolha dos componentes. Numa pesquisa da literatura e de fornecedores, foram encontrados muitos dispositivos para cada componente, mas nem todos têm a credibilidade da comunidade científica e, portanto, requerem uma análise maior em laboratório.

No caso dos acelerômetros disponíveis no mercado, são encontrados componentes piezo elétricos, piezo resistivos e

capacitivos, os quais são utilizados para converter um movimento mecânico em um sinal elétrico. Acelerômetros piezo elétricos são feitos de materiais piezo cerâmicos ou cristais simples. São insuperáveis em termos do limite superior da faixa de frequência, baixo peso e ampla faixa de temperatura. Os piezo resistivos são preferidos em aplicações de impacto. Os acelerômetros capacitivos tipicamente utilizam elementos de micro máquinas sensíveis de silicone (MEMS), e são os mais econômicos no mercado.

Especificações básicas dos transdutores de vibração:

- *Sensibilidade*: relaciona o sinal elétrico (muitas vezes em tensão (V)) com a amplitude de vibração.
- *Faixa de frequência*: gama de frequências em que a medição de vibração é efetuada e considerada útil.
- *Limite de amplitude*: especifica o valor máximo de vibração que pode ser medido com precisão.
- *Limite de Choque*: nível máximo de vibração que o transdutor pode resistir sem sofrer dano.
- *Linearidade*: precisão da amplitude da vibração medida, na faixa de frequência de medição.
- *Frequência natural*: é indiretamente indicativo da faixa de frequência de medição. Quanto maior a frequência natural do transdutor, maior o intervalo de frequência de medição, de um modo geral.

O acelerômetro piezo elétrico é o mais recomendado para aplicações em Manutenção Preditiva (MARTINS, 2000), pois a resposta de frequência estende-se até dezenas de kHz, deslocamento e velocidade podem ser obtidos a partir da integração elétrica da aceleração e, medição de transientes é geralmente melhor relatada por aceleração do que deslocamento ou velocidade. São também comercializados os do tipo *Integrated Circuit Piezoelectric*, ICP, que possuem incorporado o circuito integrado de condicionamento do sinal. Este tipo de transdutor necessita, para isso, ser alimentado com uma corrente externa fornecida por outro dispositivo conhecido como *Signal Conditioner* (figura 11). Em seguida, o sinal é enviado para o filtro *antialiasing* incorporado no CAD. Entretanto, o uso de acelerômetros é limitado devido ao relativo alto custo deste transdutor.

Figura 11. Imagens dos acelerômetros ICP e uma unidade de condicionamento do sinal.



Fonte: Edprevent, 2012; EC Systems, 2012.

Os acelerômetros MEMS foram lançados recentemente no mercado e possuem baixo custo (figura 12). Ainda persistem muitas dúvidas a respeito da confiabilidade destes transdutores, apesar de já estarem sendo utilizados por algumas empresas de Manutenção Preditiva. Porém, esse tipo de acelerômetro é o mais econômico, apresentando um custo da ordem de 10% do valor de um acelerômetro piezo elétrico.

Segundo Thanagasundrame Schindwein (2006), acelerômetros MEMS, mesmo sendo uma tecnologia nova, e seu uso em análise de vibração ter sido limitado devido ao alto nível do ruído e sensibilidade à variação da temperatura, podem ser considerados uma alternativa para Manutenção Preditiva com qualidade padrão e baixo custo. Neste trabalho foi analisado o comportamento do acelerômetro MEMS ADXL105 da *AnalogDevice*.

Figura 12. Componentes principais do acelerômetro MEMS ADLX335 da *AnalogDevice*.



Fonte: Sparkfun, 2013.

O trabalho de Albarbaret *al.* (2008) mostra que acelerômetros MEMS apresentam mudanças significativas nas leituras de amplitude e fase, quando comparados com um acelerômetro piezo-elétrico do tipo ICP, tipicamente usados nos laboratórios de análise. Infelizmente, o estudo não identifica o acelerômetro MEMS analisado.

Abdellatef (2011) concorda, na sua tese de doutorado, que o acelerômetro MEMS ainda necessita de maior aprimoramento para ser utilizado na Manutenção Preditiva, e propõe diversos tipos de melhorias, incluindo na fabricação do próprio MEMS, que tem como objetivo o aprimoramento na leitura da fase e da amplitude do acelerômetro.

3.4. ACELERÔMETROS MEMS

Micro ElectroMechanical Systems, MEMS, consistem em dispositivos mecânicos e componentes de máquinas que variam em tamanho desde poucos microns até algumas centenas de microns. Podem ser as interconexões mecânicas dos microssistemas e podem ser classificados tanto como sensores ou atuadores. Geralmente integram sinais de um domínio físico para outro, como mecânico para elétrico (O'NEAL, 1999).

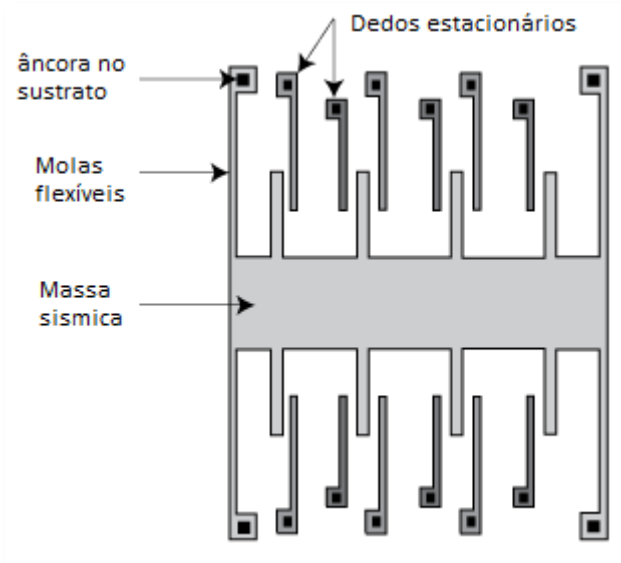
É uma tecnologia de *micro fabricação*, a qual utiliza processos de fabricação semelhante ao de semicondutores e circuitos integrados para criar microdispositivos discretos ou integrados, tais como as estruturas mecânicas, microssensores, microatuadores, entre outras. Produtos MEMS encontram larga aplicação em instrumentação, automação industrial, telecomunicações, optoeletrônica, tecnologia da informação, automóveis, entre outras.

Atualmente existem várias técnicas de fabricação de micro máquinas, sendo *bulk micromachining* a mais antiga. Esta técnica envolve a remoção seletiva do material de substrato a fim de realizar os componentes mecânicos miniaturizados. A remoção é realizada com a técnica de corrosão química que envolve a imersão de um substrato numa solução de um produto químico reativo para gravar regiões expostas do substrato. Esta técnica é popular em MEMS, pois pode proporcionar uma elevada taxa de corrosão e seletividade. Além disso, as taxas de corrosão e de seletividade podem ser modificadas por alteração da composição química da solução de corrosão, ajustada temperatura da solução de corrosão, entre outras (MEMS-EXCHANGE, 2014).

Outra técnica utilizada é *surfacemicromachining*, baseada no modelado do MEMS em camadas. O processo inicia com a deposição de uma película fina de material que atua como uma camada mecânica temporal, na qual as camadas do dispositivo real são construídas. A camada de material do dispositivo é colocada e modelada com a forma do dispositivo, sendo chamada de camada estrutural. Finalmente a camada temporal é removida deixando a camada estrutural livre, que pode se movimentar como uma viga engastada livre. A vantagem da técnica *surfacemicromachining* é a fácil integração com elementos micro eletrônicos. Com essa técnica são construídos alguns acelerômetros produzidos pela *AnalogDevice* (JIANGFENG, 2004).

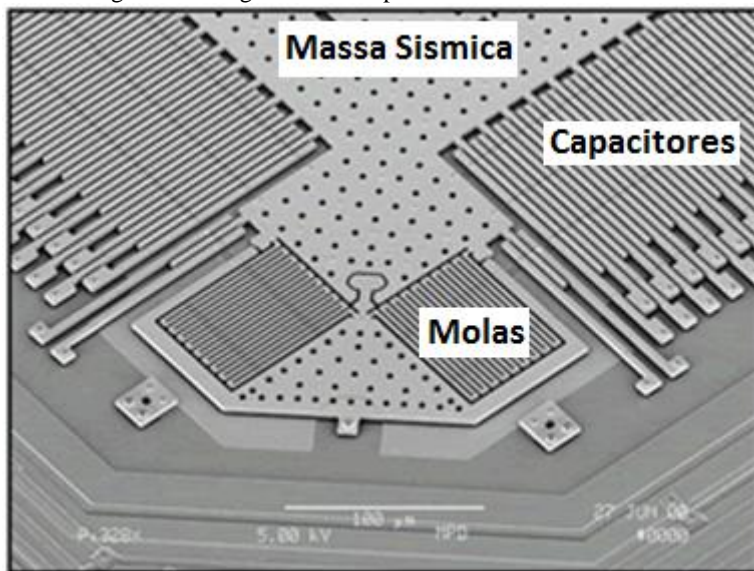
O acelerômetro MEMS é um transdutor o qual permite transformar energia mecânica em energia elétrica, sendo sua fonte de informação a aceleração do sistema. É formado por três estruturas fundamentais, a massa sísmica, uma região de molas e as estruturas ou dedos capacitivos (figuras 13 e 14). Os dedos capacitivos se encontram nos dois lados da massa sísmica, e tem a mesma capacitância na posição de equilíbrio mecânico. Ao se aplicar uma aceleração na massa sísmica que conectada fisicamente com as placas dos condensadores, altera a distância ou a superfície entre os dedos capacitivos, alterando a capacitância do condensador. Essa capacitância é proporcional à aceleração aplicada no sistema (TEZ; AKIN, 2013).

Figura 13. Diagrama do acelerômetro MEMS.



Fonte: Compliantmechanisms, 2014.

Figura 14. Imagem microscópica do acelerômetro MEMS.



Fonte: adaptado de SoboyejoResearchGroup, 2014.

O acelerômetro capacitivo MEMS é governado pela seguinte equação:

$$V_{sense} = \frac{2C_s}{2C_s + C_p + C_{gs} + C_{gd}} * \frac{V_m}{\omega_n^2 d} * a \quad (5)$$

onde V_{sense} é a tensão de saída, C_s é capacitância nos dedos capacitivos, C_p é a capacitância parasita, C_{gs} e C_{gd} são duas capacitâncias do transistor MOS, V_m é amplitude do sinal modulado, d é a distancia entre os dedos capacitivos do sensor, ω_n é a frequência de ressonância mecânica do transdutor e, a é aceleração a ser medida.

Um acelerômetro típico MEMS tem frequência de ressonância 6 kHz, 1,5 μm na separação dos dedos capacitivos e uma sensibilidade de capacitância de 0,4 fF/g. Em um sinal de modulação de um 1 V de amplitude, a sensibilidade da tensão global é de cerca de 1 mV/g (JIANGFENG, 2004).

No caso da Manutenção Preditiva, as vibrações das máquinas rotativas geram sinais estacionários, que normalmente resultam da superposição de sinais senoidais com amplitudes e

frequências diferentes. As características do acelerômetro que tem relação com esses dados são:

- Faixa de frequência (*Bandwith*) de medição.
- O limite de amplitude (*Acceleration Range*) que especifica o valor máximo de aceleração que pode ser medido com precisão, em “g”.

Outro fator importante é a sensibilidade do acelerômetro, que fornece a relação tensão gerada por unidade de aceleração, normalmente expressa em mV/g. Quanto maior a sensibilidade, maior a capacidade do acelerômetro para medir níveis de menor amplitude.

3.4.1. Tipos de sinais de saídas

Os sinais de saída dos acelerômetros podem ser classificados em analógicos e digitais. Um acelerômetro é chamado de analógico se o sinal de saída é uma tensão proporcional à aceleração ao qual está submetido. Se o acelerômetro tem incorporado um circuito eletrônico que digitaliza o sinal analógico e, portanto, o sinal de saída é previamente digitalizado, então é chamado de acelerômetro digital. Neste caso a sensibilidade do acelerômetro não pode mais ser medida em mV/g, e cada fabricante tem uma forma particular de relacionar a aceleração com as unidades digitais, como por exemplo mg/digit, LSB/g, mg/LSB e count/g. O acelerômetro digital comunica-se através do protocolo de comunicação SPI. A figura 15 apresenta o acelerômetro digital *ADIS 16227* da *AnalogDevice*.

Figura 15. Acelerômetro ADIS 16227 da *AnalogDevice*.

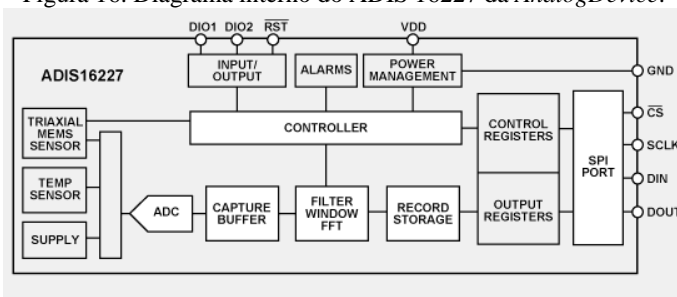


Fonte: AnalogDevice (a), 2014.

3.4.2. Alimentação do acelerômetro

Os acelerômetros MEMS são fabricados com circuitos integrados de condicionamento de sinal, sejam estes analógicos ou digitais, e requerem uma tensão de alimentação para o seu funcionamento. A unidade de medida é Volts (V). Em alguns casos também é determinada a corrente elétrica consumida pelo acelerômetro em mA. A figura 16 apresenta o Diagrama interno do ADIS 16227 da *AnalogDevice*.

Figura 16. Diagrama interno do ADIS 16227 da *AnalogDevice*.



Fonte: AnalogDevice (b), 2014.

A aceleração de qualquer ponto de um sistema é uma grandeza vetorial com três componentes espaciais ortogonais. Cada componente é representada pela componente do sistema cartesiano de eixos X, Y e Z. Considerando esse aspecto, os acelerômetros são classificados em uniaxiais, biaxiais ou triaxiais, sendo o triaxial o acelerômetro com capacidade de medir a aceleração nos três eixos, simultaneamente. Cuidado torna-se necessário na escolha de biaxial pois nem sempre consegue medir qualquer combinação dos eixos uma vez que depende da montagem na placa eletrônica utilizada. A figura 17 apresenta um exemplo de tabela com as características dos acelerômetros MEMS.

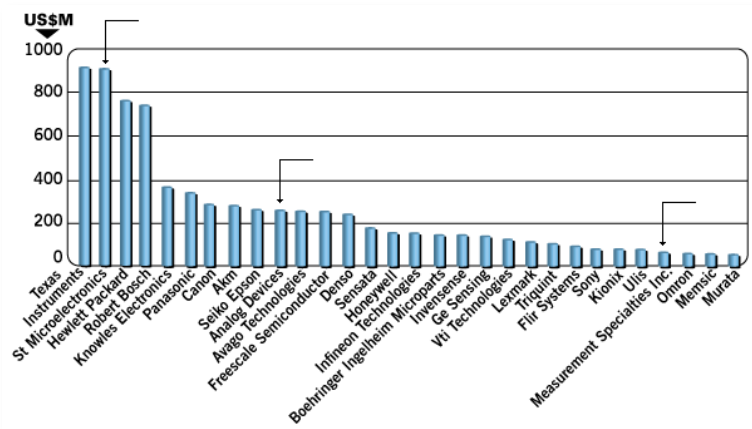
Figura 17. Exemplo de tabela com acelerômetrosse suas características.

1	Manufacturer Part	Manufacturer	Axis Range	Accel	Sensitivity	Bandwidth	O
2	MMA8653FCR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 256 count/g,	128 count/g, 64 count/g	800 Digits	
3	MMA8652FCR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 1024 count/g,	512 count/g, 256 count	800 Digits	
4	LS331DL	STMicroelectronics	X, Y, Z	9 18mg/digit,	72mg/digit	800 Digits	
5	MMA8452QR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 1024 count/g,	512 count/g, 256 count	800 Digits	
6	MMA8453QR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 256LSB/g,	128LSB/g, 64LSB/g	800 Digits	
7	MMA8491QR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 1024 count/g		800 Digits	
8	MMA8451QR1	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	8 4096 count/g,	2048 count/g, 1024 cou	800 Digits	
9	MMA7341LCT	Freescale Semiconductor	X, Y, Z	9 440, 117.8 mV/g		800 Analo	
10	MMA6361LT	Freescale Semiconductor	X, Y	6 800, 206 mV/g		800 Analo	
11	MMA6341LT	Freescale Semiconductor	X, Y	9 440, 117.8 mV/g		800 Analo	
12	LS3DHTR	STMicroelectronics	X, Y, Z	16 1mg/digit,	2mg/digit, 4mg/digit, 12mg	800 Digits	
13	KXC19-1008	Kionix Inc	X, Y, Z	8 1024 count/g,	512 count/g, 256 count	800 Digits	
14	KXCNL-1010	Kionix Inc	X, Y, Z	8 1024 count/g,	512 count/g, 341 count	800 Digits	

Fonte: Adaptada de Digikey, 2013.

Os dispositivos MEMS têm muitas aplicações na atualidade, sendo a maioria em automóveis, iluminação, *smartphones*, entre outras, que incluem sensores MEMS dos quais os acelerômetros tem grande aplicação. Dos 30 maiores fabricantes de acelerômetros MEMS (figura 18), somente três fornecem acelerômetros para aplicações de análise de vibração. A tabela 2 apresenta exemplos de acelerômetros MEMS e seus fabricantes.

Figura 18. Top 30 fabricantes dos acelerômetros MEMS.



Fonte: SolidState Technologies, 2013.

Tabela 2. Exemplo de acelerômetros MEMS e seus fabricantes.

Fabricante de MEMS	Modelo	Frequência máxima	Eixos	Tipo
ST Microelectronics	LIS2DH	5,3 KHz	3	Digital SPI
MeasurementSpecialties	834M1	6 KHz	3	Análogo
AnalogDevice	ADXL 001	22 KHz	1	Análogo
AnalogDevice	ADIS 16223	10 KHz	3	Digital SPI

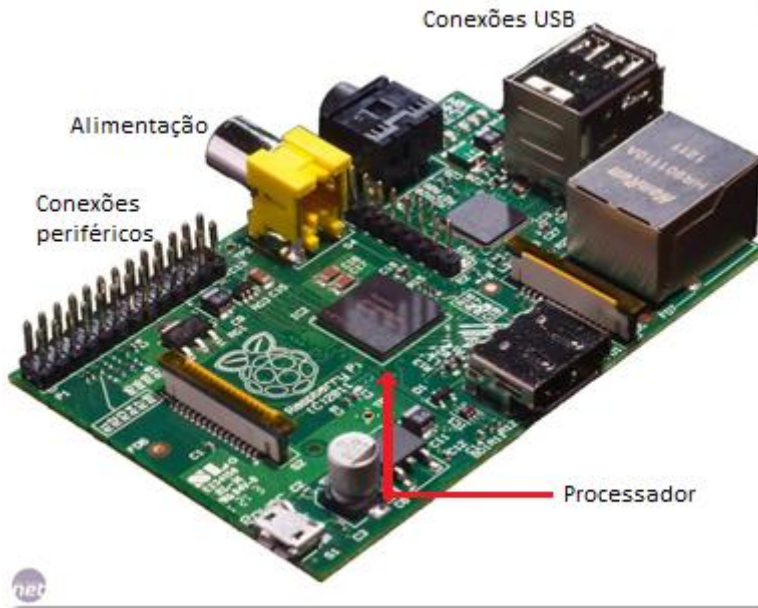
Fonte: Autor.

3.5. MICROCONTROLADOR

Um microcontrolador é um circuito integrado programável capaz de executar as ordens gravadas na sua memória. Consiste de vários blocos funcionais que podem cumprir uma tarefa específica. Um microcontrolador inclui as três principais unidades funcionais de um computador: a unidade central de processamento, memória e periféricos de entrada/saída.

Microcontroladores são geralmente utilizados em automação e controle de produtos e periféricos, como sistemas de controle de motores automotivos, controles remotos, máquinas de escritório e residenciais, brinquedos e sistemas de supervisão. Para reduzir o tamanho, custo e consumo de energia, comparados à forma de utilização de microprocessadores convencionais, aliados à facilidade de desenho de aplicações, juntamente com o seu baixo custo, os microcontroladores são uma alternativa eficiente para controlar muitos processos e aplicações. A figura 19 mostra um micro controlador típico.

Figura 19. Microcontrolador Raspberry Pi.



Fonte: Raspberry PI, 2014.

3.5.1. Periféricos

A organização básica de um microcontrolador contém um conjunto de periféricos que estão localizados ou tem conexões com periféricos externos. Alguns dos periféricos que mais frequentemente são encontrados em microcontroladores são:

Entrada/saída

Também conhecida como porta de E/S, geralmente agrupados em portas de 8 bits, permite a leitura de dados a partir do exterior ou escrever para eles desde o microcontrolador. O destino usual é trabalhar com dispositivos simples, como relés, LED e sensores. Algumas portas E/S têm características especiais que permitem lidar com determinadas exigências atuais, ou incorporar mecanismos especiais para interromper o processador.

Conversor Analógico/Digital

Os micro controladores incorporam um conversor analógico-digital, que é usado para obter os dados de diferentes entradas que são selecionados por um multiplexador. As resoluções mais comuns são 8 e 10 bits, que são suficientes para aplicações simples. Para aplicações em controle e instrumentação as resoluções disponíveis costumam ser de 12bit, 16bit e 24bit. Também é possível conectar uma unidade externa, se necessário.

Protocolos de comunicação

Para a comunicação com os diferentes periféricos são utilizados protocolos digitais conforme a aplicação. Os protocolos preferidos são a porta USB e SPI. Cada fabricante do periférico indica o melhor protocolo para se comunicar com o dispositivo, as condições das conexões, registros e outras características de programação interna. O *Universal Serial Bus*, USB, é um protocolo padrão usado na indústria, desenvolvido nos anos 90's, que define cabos, conectores e protocolos de comunicação utilizados em um "bus" de conexão entre um computador e outros dispositivos eletrônicos. Por outro lado, o protocolo *Serial Peripheral Interface*, SPI, não define um tipo de cabo especial nem um conector, simplesmente devem se conectar cabos entre os terminais dos componentes definidos para a comunicação. O protocolo SPI é ótimo para envio de informação digitalizada, numa velocidade compatível com as frequências de geração dos dados desde periféricos como, por exemplo, um acelerômetro digital.

3.6. NÍVEIS TÍPICOS DE VIBRAÇÃO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA

O presente trabalho considera que as falhas numa máquina alteram os espectros de vibração referenciais, assim é importante ter um conhecimento geral do comportamento de frequência em relação à falha e correlacionar isso com a resposta obtida pelo transdutor. A tabela 3 mostra as falhas mais comuns e suas ordens de harmônicas. A frequência fundamental é representada por 1X e seus harmônicos por 2X, 3X... Os exemplos da tabela 3 apresentam as frequências em Hz, para velocidades de rotação da máquina de 60 e 120 Hz.

Tabela 3. Falhas em máquinas rotativas e frequências.

Falha	Baixa	1X	2X	3X	4X	5X	6X	7X	8X	9X	10X	20X	30X	40X	60Hz	120 Hz
Desgaste dos elementos do rolamento 5																
Desgaste dos elementos do rolamento 3																
Desgaste dos elementos do rolamento 4																
Desgaste dos elementos do rolamento 2																
ruijão no engrenagem																
Engrenagem excêntrica																
Engrenagem desalinhada																
Cevilhado																
Dente de engrenagem gasto																
Excentricidade de engrenagem																
Excentricidade de rolamento																
Barra do rotor solta																
Desgaste dos elementos do rolamento 6																
Piso de lâminas em bombas e ventiladores																
Dente quebrado e gresado de engrenagem																
Dente de engrenagem com carga																
solteira relativa																
Falhas no acoplamento de engate																
Desalinhamento																
Ruído no eixo devido a falha																
Ruído no eixo devido a falha																
Ruído no eixo devido a falha																
Rotor solto																
Desalinhamento angular																
Desalinhamento paralelo																
Rolamento inclinado																
Soltura no rolamento de pedestal																
Ressonância																
Excentricidade de estator																
Rotor excêntrico																
Problemas de lubrificação																
Problemas de lubrificação																
Problemas de lubrificação																
Problemas de lubrificação																
Enrolamento do estator solto																
Eixo torto																
Falhas no acoplamento entre eixos paralelos																
Falhas no acoplamento de desbalanceamento																
Desbalanceamento dinâmico																
Desbalanceamento estático																
Desbalanceamento acústico																

Fonte: Adaptada de Vibration Training QuickReference, 2009.

As falhas mais comuns nas máquinas rotativas são (DA COSTA, 2008):

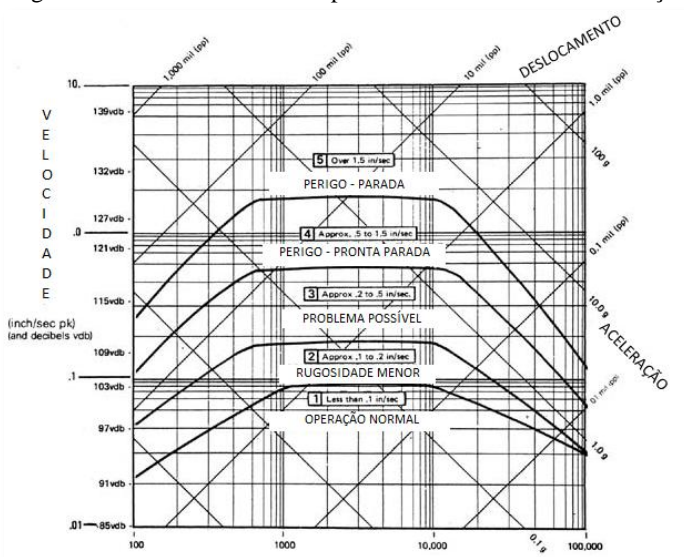
- Desbalanceamento
- Desalinhamento
- Desgaste de rolamentos, engrenagens e correias.

Da tabela 3 é possível observar que o desgaste de rolamentos, engrenagens e correias é a falha que gera as maiores frequências no espectro e, portanto, o acelerômetro selecionado deverá ser capaz de medir nesta faixa.

3.6.1. Limite de amplitude de aceleração

A figura 20 mostra os níveis de severidade de vibração de equipamentos e fornece valores das amplitudes de vibração para os respectivos graus de severidade. Estes valores devem ser considerados na seleção dos transdutores de vibração. Indica que a faixa de aceleração de falha para 1 kHz compreende valores entre 0,01 g até 0,5 g e, para 10 kHz, desde 0,3 g até mais de 10 g, aproximadamente. Deve-se lembrar de que o acelerômetro típico piezo elétrico pode medir uma faixa de ± 50 até ± 100 g, já que a tabela não indica um limite máximo superior.

Figura 20. Níveis de referência para avaliar severidade de vibração.



Fonte: Vibration Training Quick Reference, 2009.

A tabela 4 mostra os valores mínimos das características mais importantes do acelerômetro a ser usado neste trabalho, incluindo o custo.

Tabela 4. Parâmetros esperados do acelerômetro.

Característica do acelerômetro	Valores
Eixos	X, Y, Z
Amplitude de vibração	Maior que 10 g
Frequência máxima	Maior que 1 kHz
Preço	Menor que US\$ 100

Fonte: Autor.

A tabela 5 mostra uma comparação que inclui as diversas possibilidades de configuração do protótipo.

Tabela 5. Comparação entre diversas configurações para o protótipo.

	Sistema de monitoramento de Vibração Comercial	Protótipo MEMS Análogo	Protótipo MEMS Digital SPI
Acelerômetro	Mono axial	Tri axial	Tri axial
Montagem eletrônica	Não precisa	Test board	Test board
Condicionamento do sinal		Não incluso	
Filtro Anti-aliasing	Todo incluso no aparelho	Não incluso	Todo incluso no acelerômetro
Conversor análogo digital ADC		Não incluso	
Micro controlador		Não incluso	Não incluso
Canais	2	12	9
Pontos de monitoramento contínuo	---	4	3
Quantidade de acelerômetros	2	4	3
Faixa de frequência	1-10 KHz	10 KHz	1-10 KHz

Fonte: Autor.

Foi realizada uma pesquisa na literatura e consultados os distribuidores de acelerômetros MEMS, sendo o distribuidor *DigiKey* um dos maiores do mundo. A partir da lista de produtos oferecidos no mercado (DIGIKEY, 2013), com quase 1000 tipos, modelos e outros produtos afins, foi elaborada uma tabela com as características dos

acelerômetros (a maioria deles com o preço) no arquivo em anexo. Da lista original foi preciso confirmar informações com o fabricante, unificar nomenclatura e excluir elementos repetidos ou redundantes, para obter uma lista útil na escolha do acelerômetro. A lista final contém 226 acelerômetros dos maiores fabricantes do mundo e com todas as características anteriormente mencionadas. Assim foi possível realizar uma escolha precisa do acelerômetro a ser utilizado neste projeto.

Ao aplicar os filtros com todas as características da tabela 4, foram encontrados 10 registros, dos quais quatro apresentam as maiores faixas de frequência até 1600 Hz, sendo do fabricante *AnalogDevice* com um preço entre US\$7,00 e US\$ 14,00 e, um modelo da *STMicroelectronics* com preço de US\$ 3,34 (figura 21).

Figura 21. Lista de acelerômetros logo da aplicação dos filtros de seleção da tabela 4.

Manufacturer Part Number	Manufacturer	Axis	Range	Sensitivity	Bandwidth	Output Type	Interface	Voltage	Supply	Unit Price	Minimum
27 BMA220	Bosch Sensortec	X, Y, Z	16 16LSB/g, 8LSB/g, 4LSB/g, 2LSB/g	1.000 Digital	1.62V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	1.62V ~ 3.6 V	3.3300	1		
28 LIS3DHTR	STMicroelectronics	X, Y, Z	16 0.06mg/digit, 0.12mg/digit, 0.18mg/digit	1.600 Digital	1.71V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	1.71V ~ 3.6 V	3.3400	1		
29 BMA220	Bosch Sensortec	X, Y, Z	16 16LSB/g, 8LSB/g, 4LSB/g, 2LSB/g	1.000 Digital	1.62V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	1.62V ~ 3.6 V	3.4000	1		
30 BMA222	Bosch Sensortec	X, Y, Z	16 64LSB/g, 32LSB/g, 16LSB/g, 8LSB/g	1.000 Digital	1.2V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	1.2V ~ 3.6 V	3.9800	1		
36 BMA250	Bosch Sensortec	X, Y, Z	16 256LSB/g, 128LSB/g, 64LSB/g, 32LSB/g	1.000 Digital	1.62V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	1.62V ~ 3.6 V	4.1900	1		
38 LIS35HH	STMicroelectronics	X, Y, Z	24 12mg/digit, 6mg/digit, 3mg/digit	1.000 Digital	2.0V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	2.0V ~ 3.6 V	5.3600	1		
51 ADXL345ACCZ-RL	Analog Devices Inc	X, Y, Z	16 256LSB/g, 128LSB/g, 64LSB/g, 32LSB/g	1.600 Digital	2.0V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	2.0V ~ 3.6 V	7.2500	1		
51 ADXL345ACCZ-R2	Analog Devices Inc	X, Y, Z	16 256LSB/g, 128LSB/g, 64LSB/g, 32LSB/g	1.600 Digital	1.7V ~ 2.75 V	I ² C, SPI	1.7V ~ 2.75 V	7.7200	1		
105 ADXL312ACFZ	Analog Devices Inc	X, Y, Z	12 345LSB/g, 172LSB/g, 86LSB/g, 43LSB/g	1.600 Digital	2V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	2V ~ 3.6 V	10.5700	1		
105 ADXL345ACCZ-EP	Analog Devices Inc	X, Y, Z	16 256LSB/g, 128LSB/g, 64LSB/g, 32LSB/g	1.600 Digital	2V ~ 3.6 V	I ² C, SPI	2V ~ 3.6 V	14.0600	1		

Fonte: Autor.

Uma pesquisa foi também realizada para a seleção do micro controlador. Para o propósito de desenvolvimento do protótipo foi encontrado o micro controlador *Arduino Due*, cuja versatilidade cumpre todos os níveis do projeto; contém entradas para sinais digitais e analógicos e permite conectar os periféricos disponíveis no mercado. A velocidade de trabalho do micro controlador é de 84 MHz, o que permite também a possibilidade de manuseio de muitas entradas, e de ser controlado usando o software MATLAB. A figura 22 mostra uma comparação entre diferentes micro controladores de baixo custo,

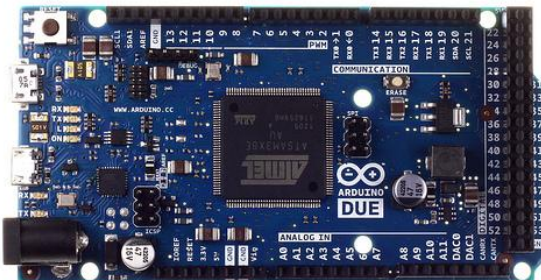
disponíveis no mercado. Este micro controlador tem a maior comunidade de usuários e documentação. Do ponto de vista técnico, possui entradas e saídas analógicas e digitais, comunicação USB, ótimo para o desenvolvimento de protótipos. A figura 23 mostra um exemplo do micro controlador *Arduino Due*.

Figura 22. Comparação entre micro controladores.

Comparação entre micro controladores																	
Brand name	Price	Version	License	Community	Docs	Processor	Clock Speed	SoC	GPU	RAM	Memory	Max Memory	GPIO	Analog In	Analog Out	USB	USB host
Arduino Uno	\$27.20€	Rev 3	CC BY-SA	👤	📄	ATmega328	16Mhz	/	/	2KB	32KB	32KB	14	6	🔴	1	🔌
Arduino Due	\$53.39€	Rev 1	CC BY-SA	👤	📄	AT91SAM3X8E	85MHz	/	/	96KB	512KB	512KB	54	12	2	1	1
Raspberry Pi, model B	\$35.26€	Rev 2	📄	👤	📄	ARM11	700MHz	Broadcom BCM2835	VideoCore IV	512MB	None	32GB via SD	26	🔴	🔴	2	🔴
CubieBoard	\$49.36€	Rev 1	📄	👤	📄	ARM Cortex-A8	1GHz	Alwinner A10	ARM Mali-400	1GB	4GB NAND flash	32GB via SD	96	🔴	🔴	2	1
Gooseberry	\$63.46€	Rev 1	📄	👤	📄	ARM Cortex-A8	1GHz	Alwinner A10	ARM Mali-400	📄	4GB NAND flash	32GB via SD	None	🔴	🔴	0	1
APC Rock	\$79.59€	Rev 1	📄	👤	📄	ARM Cortex-A9	800MHz	Wondermedia Prizm WM9950	ARM Mali-400	512MB	4GB NAND flash	32GB via SD	24	🔴	🔴	2	1
A13 OLinuXino Wifi	\$74.55€	Rev. E	CC BY-SA	👤	📄	ARM Cortex-A8	1GHz	Alwinner A13	ARM Mali-400	512MB	4GB NAND flash	32GB via SD	68/74	🔴	🔴	3	1
A10 OLinuXino	📄	TBA	CC BY-SA	👤	📄	ARM Cortex-A8	1GHz	Alwinner A10	ARM Mali-400	1GB	4GB NAND flash	32GB via SD	132	🔴	🔴	2	1
Hackberry A10	\$65.48€	Rev 1	📄	👤	📄	ARM Cortex-A8	1.2GHz	Alwinner A10	ARM Mali-400	1GB	4GB NAND flash	32GB via SD	None	🔴	🔴	2	0

Fonte: adaptado de Techwath, 2013.

Figura 23. Micro controlador Arduino Due.



Fonte: Arduino (a), 2013.

Assim, os componentes iniciais do protótipo que foram adquiridos são:

- Acelerômetro digital **ADXL345** da *AnalogDevice*. A tabela 6 mostra as características do acelerômetro MEMS.

Tabela 6. Características do acelerômetro ADXL345.

Característica	Valor
Faixa de frequência	1600 Hz (selecionável)
Faixa de aceleração	16 g (selecionável)
Protocolo de comunicação	SPI
Tipo de saída	Digital

Fonte: AnalogDevice (b), 2013.

- Placa micro controladora **Arduino Due** com as características indicadas na Tabela 7.

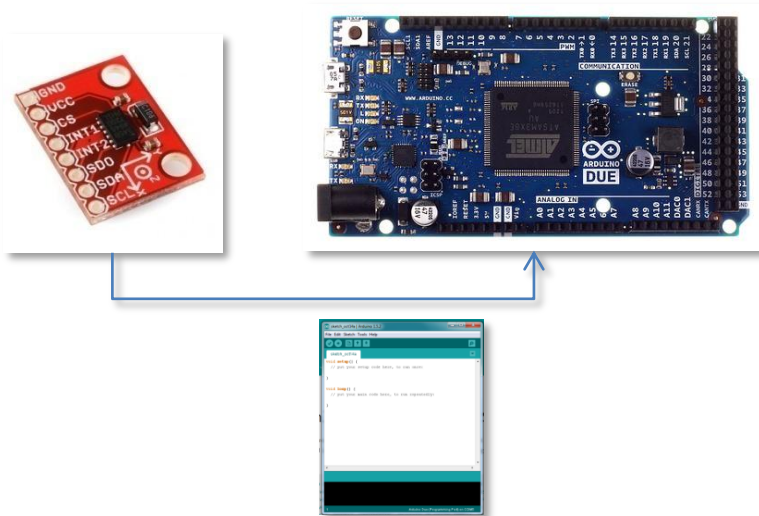
Tabela 7. Características da placa controladora Arduino Due (ARDUINO (b), 2013).

Característica	Valor
Velocidade do processador	84 MHz
Entradas digitais SPI	3
Protocolo USB	Sim

Fonte: Arduino, 2013.

Numa primeira tentativa de comunicação entre o acelerômetro, o micro controlador e o computador usando MATLAB (figura 24), percebeu-se que as alterações no *Arduino Due* (última versão da serie *Arduino*, no mercado desde início do ano 2013), a respeito das versões anteriores, impediram o correto funcionamento do protótipo.

Figura 24. ADXL345, Arduino DUE e software IDE.



Fonte: Adaptada de AnalogDevice; Arduino; Autor, 2014.

O micro controlador Arduino Due possui um processador diferente das versões anteriores, mesmo assim, conseguiram-se identificar as seguintes mudanças:

- *Sintaxes do protocolo SPI*: o novo processador tem uma sintaxe diferente para escrever as instruções de controle do acelerômetro na escrita de registros e na leitura dos dados e, portanto, o código fornecido pelo distribuidor não é compatível com esta versão do micro controlador. Assim, foi preciso reescrever o código na linguagem de programação da placa, até conseguir estabelecer a comunicação entre os dois dispositivos. Outra alteração em relação do protocolo SPI foram os pinos de conexão, tipicamente pinos 10, 11, 12 e 13 nas versões anteriores do Arduino, e pinos 4 (ou 10 ou 52), 74, 75 e 76 na versão Arduino Due (ARDUINO (c), 2013).
- *Código de controle de MATLAB desatualizado*: uma das vantagens mais importantes do micro controlador Arduino está no fato de possuir um código de comunicação serial com o software MATLAB, desenvolvido pela própria Mathworks. Porém, esse código também não é compatível com

Arduino Due. A assistência técnica informou que não seria desenvolvida uma correção durante o prazo desta pesquisa. A solução encontrada consistiu em programar diretamente a comunicação com o micro controladora partir do MATLAB com as instruções de comunicação serial padrão, disponíveis na biblioteca do software (MATLAB (a e c), 2013).

Uma vez corrigidas as mudanças no micro controlador e programado MATLAB para calcular a FFT, e apresentar os espectros de frequência, foi realizado um primeiro teste com o calibrador de vibração; porém o espectro obtido divergiu do esperado. Com a finalidade de ter um sistema de provas com maior flexibilidade, o segundo teste foi realizado com um excitador de vibração, sendo possível controlar a frequência e a amplitude do sinal de entrada. Os resultados deste segundo teste foram:

- O espectro apresenta um pico de amplitude numa frequência que não corresponde à frequência de excitação do shaker.
- Os espectros obtidos alteram a frequência e a amplitude com a amplitude de excitação do shaker.
- O sistema leva 9 s para gerar três espectros de frequência.
- Em algumas ocasiões o software MATLAB enviou mensagem de erro indicando não conseguir calcular a FFT com os dados de entrada.

Do ponto de vista global, o protótipo deve criar os espectros de frequências em MATLAB, a partir dos dados enviados pelo acelerômetro, com o seguinte sequenciamento:

- O micro controlador ativa o acelerômetro, e modifica os registros dos parâmetro de leitura e formatação dos dados (frequência de amostragem, amplitude de aceleração e bits).
- Lê uma amostra de aceleração obtida pelo acelerômetro.
- Transforma os dados do acelerômetro num número inteiro, chamado $acel_{MEMS}$.
- Calcula a aceleração real a partir da $acel_{MEMS}$ e dos valores para $Offset$ e $ScalingFactor$, com a seguinte fórmula fornecida pelo fabricante (ANALOG DEVICE (b), 2013):

$$A_{real} = accel_{MEMS} - Offset * ScalingFactor \quad (6)$$

- Uma vez obtido o valor da aceleração real para os três eixos, estes são enviados através da porta USB onde são lidos pelo software MATLAB.
- MATLAB inicia a comunicação com a porta USB e cria três vetores, um para cada eixo coordenado, onde são armazenados os dados de aceleração.
- (Este ciclo é repetido 3200 vezes de acordo com a frequência de amostragem do acelerômetro e os dados necessários para calcular a FFT).
- Calcula a FFT e cria os três espectros de frequência.

Foi, então, realizada uma análise dos códigos de programação para detectar as fontes de erros e quais seriam as soluções. Foram realizados múltiplos testes apresentados a seguir no Capítulo 4.

Da análise das características dos equipamentos de análise de vibração disponíveis no mercado e utilizados num programa de Manutenção Preditiva, foram obtidos os parâmetros fundamentais que determinaram a escolha dos componentes do protótipo, incorporando os acelerômetros MEMS e o micro controlador de baixo custo.

No mercado existem diversos tipos e modelos de acelerômetros e micro controladores, mas cuja compatibilidade nem sempre é automática. No caso do acelerômetro digital, este é um periférico que deve ser programado pelo micro controlador, e esta comunicação incorpora protocolos de linguagem, conexões e conhecimentos específicos dos registros internos do periférico. Para este trabalho, foram desenvolvidos e atualizados os códigos de comunicação necessários para o correto funcionamento do protótipo. Mesmo assim, são requeridos testes em todos os componentes para determinar o real comportamento e avaliar a aplicação num programa de Manutenção Preditiva padrão.

4. RESULTADOS DE APLICAÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1. EQUIPAMENTOS DE CONTROLE

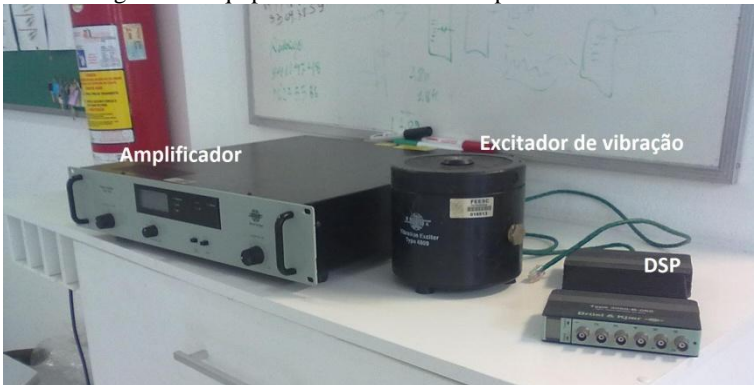
Para testar os resultados gerados pelo protótipo, estes foram comparados com os gerados pelos equipamentos disponíveis no Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA), listados na tabela 8. A figura 25 mostra estes equipamentos montados para os ensaios e a figura 26 mostra os componentes do protótipo.

Tabela 8. Características do equipamento de controle, LVA.

Acelerômetro Brüel&Kjaer	
Modelo	Type 4520
Sensibilidade x, y, z	10,46, 10,33, 10, 99 mV/g
Faixa de frequências	1,9 Hz – 7.000 Hz
Nível máximo de choque	5.000 g
S/N	31070
Analisador DSP Pulse, Brüel&Kjaer	
Modelo	Type 3050-B-6/0
Número de Canais	6
Faixa de frequência	0 Hz – 51.200 Hz
S/N	1582011
Amplificador Brüel&Kjaer	
Modelo	Type 2718
Número de Canais	1
Potência de saída	75 VA
S/N	B2718E02A03k0324
Excitador de vibração Brüel&Kjaer	
Modelo	Type 4809
Número de Canais	1
Faixa de frequências	10 Hz – 20.000 Hz
S/N	2252983

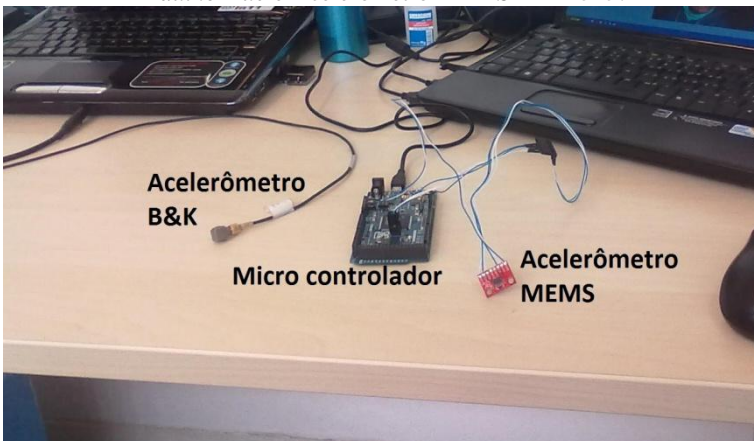
Fonte: Brüel&Kjaer, 2013.

Figura 25. Equipamento de controle disponível no LVA.



Fonte: Autor.

Figura 26. Acelerômetro *Brüel&Kjaer* e protótipo com micro controlador *Arduino Due* e Acelerômetro MEMS *ADXL345*.



Fonte: Autor.

4.2. TESTES INICIAIS COM O MICRO CONTROLADOR (ARDUINO DUE)

Foram desenvolvidos códigos de programação de testes para verificar o desempenho de cada elemento do protótipo, um código para monitorar o tempo das diferentes instruções no micro controlador, um gerador de sinais senoidais e um código para gerar sequências de números (códigos apresentados no Anexo 1).

Cálculo da fórmula de aceleração real

O cálculo da fórmula de aceleração real foi realizado inicialmente no micro controlador, logo foi realizado um teste de cálculo da aceleração com o MATLAB. Essa mudança diminuiu o tempo total do processo em até 50% do tempo inicial.

Dados no vetor de MATLAB e sincronização

O software MATLAB permite inspecionar cada um dos dados do vetor criado para armazenar a aceleração, sendo possível reconhecer alguns dados, como por exemplo o lixo eletrônico. Por exemplo, o número 5678 foi reconhecido como 5b78, o que obviamente com esse dado não é possível nenhum cálculo matemático. Portanto, foi incluída uma linha de verificação de dados no código de programação para que no caso de encontrar um dado não numérico, este não seja armazenado no vetor.

O software lê os dados da porta USB, mas não identifica a sua origem, tipo ou formato, não reconhece qual dos três eixos está lendo e não tem sincronismo com o micro controlador. Somente lê os dados e armazena no vetor na sequência de chegada na porta USB. Para solucionar esse problema, o micro controlador foi programado para, além de enviar os três dados de aceleração, enviar também um dado adicional chamado “Sync” no início da sequência. Desta forma, os dados recebidos pelo software MATLAB possuem a seguinte configuração:

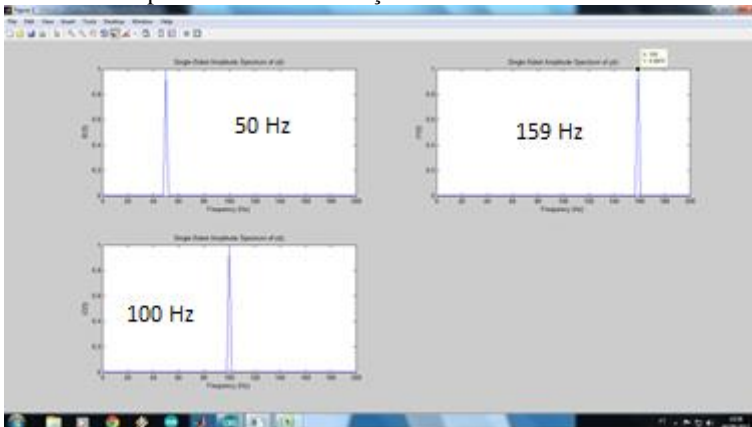
- Cria uma variável chamada de “a” onde armazena temporalmente tudo o que chega na porta USB, que é transformado num formato *string*.
- Num ciclo *while*, compara essa variável até ser igual ao valor “Sync”.
- Quando encontra o valor “Sync” cria uma outra variável chamada de “Resto” onde são armazenados dois *bytes* que chegam com o valor “Sync”.
- Cria três variáveis chamadas eixoX, eixoY e eixoZ, que armazenam os três dados de aceleração, mas transformados num formato *double*.
- Verifica se os valores das variáveis eixoX, eixoY e eixoZ, são numéricos, se forem todos numéricos armazena os valores nos vetores VetorX, VetorY e VetorZ, respectivamente. Se algum

deles não é numérico, acusa um erro e inicia um novo ciclo de leitura.

É importante mencionar que foi utilizada a função *str2double* (MATLAB (b)) para transformar o *stringnum* dado numérico, porque esta função transforma tudo o que não é número em um dado padrão chamado “NAN” (em inglês, Not a Number). O NAN é um dado que pode ser admitido como um valor válido numa matriz (eixo X, por exemplo) e, portanto, pode ser tratado numa sentença lógica de comparação.

Para verificar a sincronização dos dados, foi utilizado um código que gera três sinais senoidais no micro controlador que representam os três eixos. As frequências selecionadas foram de 50 Hz, 159 Hz e 100 Hz para os eixos X, Y e Z, respectivamente. No caso de obter o sincronismo entre os sinais de entrada e espectros de frequência, estes devem apresentar picos nas frequências de cada senóide. A figura 27 mostra os espectros esperados para cada eixo, confirmando o sincronismo nos elementos do protótipo.

Figura 27. Exemplo de espectros de frequência para três sinais senoidais, comprovando a sincronização dos dados nos três eixos.



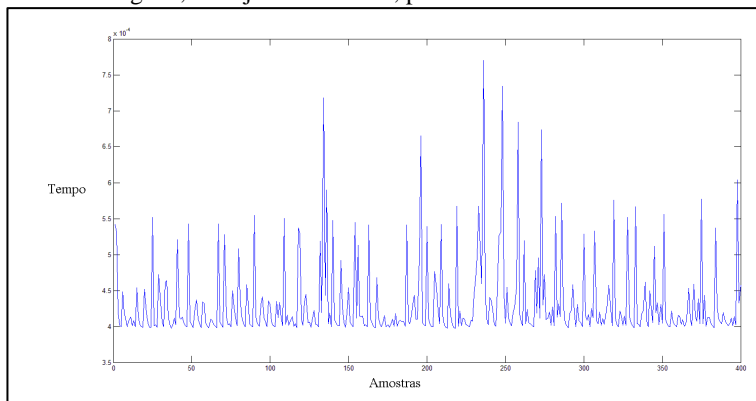
Fonte: Autor.

Verificação do tempo de envio de dados desde o micro controlador

No software MATLAB foi incluído um relógio para verificar o tempo para cada uma das leituras das amostras, utilizando as funções

tice toc. Foi verificado que esse tempo não é uniforme e as variações distorcem a frequência de amostragem (figura 28).

Figura 28. Tempo de leitura de uma sequência de amostras com dados de dois dígitos, ou seja de 10 até 99, pelo software MATLAB.



Fonte: Autor.

Foi também realizado um teste a fim de avaliar o tempo para enviar números com diferente quantidade de dígitos, sendo os resultados mostrados na tabela 9.

Tabela 9. Tempos de envio de dados pelo micro controlador quando usados números com diferentes quantidades de dígitos.

Série de números	Tempo min (s)	Tempo máx (s)
1 - 9	$3,9456 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$
10 - 99	$3,9448 \cdot 10^{-4}$	$5,2 \cdot 10^{-3}$
100 - 999	$3,9400 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-3}$
1.000 - 9.999	$3,9400 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-3}$
10.000 – 10.500	$3,9456 \cdot 10^{-4}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
100.000 – 100.500	$3,9696 \cdot 10^{-4}$	$90,7 \cdot 10^{-3}$
0,001	$3,9792 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
0,00001	$3,9456 \cdot 10^{-4}$	$43,8 \cdot 10^{-3}$

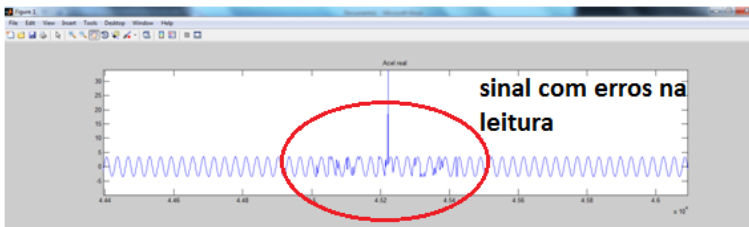
Fonte: Autor.

Devido às diferenças nas taxas de envio dos dados, dependendo da quantidade de dígitos, o procedimento de envio dos dados, um de cada vez, ou seja, lê e envia, não pode mais ser utilizado e deve-se

modificar o código no micro controlador para que leia toda a sequência completa de dados e envie um pacote com a quantidade de amostras necessárias para o cálculo da FFT. Assim, no código, foi criado um vetor com os valores da aceleração, cuja dimensão depende da frequência de amostragem selecionada e, em seguida, envia todos esses dados de uma única vez através da porta USB.

Também foi monitorado o tempo para o envio do pacote completo, sendo uma frequência de 2000 Hz a maior frequência que pode ser enviada em 1 s. Portanto, a frequência de amostragem máxima permitida no protótipo é de 1600 Hz, determinada pelas frequências de amostragem disponíveis no acelerômetro MEMS. A figura 29 mostra um sinal com erros por conter frequências maiores que 2000 Hz.

Figura 29. Exemplo de sinal com erros na leitura da aceleração do acelerômetro MEMS.



Fonte: Autor.

Da figura 29 pode-se verificar que as variações dos dados estão dentro da faixa de valores esperados, porém um dado está fora dessa faixa. Destes dados pode-se supor que a fonte de erros é o próprio acelerômetro MEMS, porque é quem lê os dados de aceleração e, pelas características dos dados, as variações podem ser produzidas por variações na frequência de amostragem no acelerômetro.

4.3. TESTES COM MICRO CONTROLADOR E ACELERÔMETRO

Teste de sincronismo

O software IDE do Arduino DUE, permite monitorar o que está sendo enviado através da porta USB e, portanto, é possível analisar os dados fornecidos pelo acelerômetro. Nos primeiros testes foi possível determinar que, dependendo da frequência de amostragem, existiam

dados repetidos entre amostras consecutivas e, portanto, conclui-se que não existia sincronismo entre a frequência de amostragem do acelerômetro e a velocidade de leitura do micro controlador na porta digital SPI.

A presença de dados repetidos indica que o micro controlador lê com velocidade maior do que o acelerômetro envia as amostras. A solução para este problema consistiu em incluir no código do micro controlador uma linha de tempo de pausa entre uma leitura e a próxima. A figura 30 mostra um sinal com exemplos de dados consecutivos repetidos em círculos, o qual é indicador da falta de sincronismo entre o acelerômetro e o micro controlador.

Figura 30. Exemplo de sinal senoidal com dados consecutivos repetidos lidos desde o micro controlador.



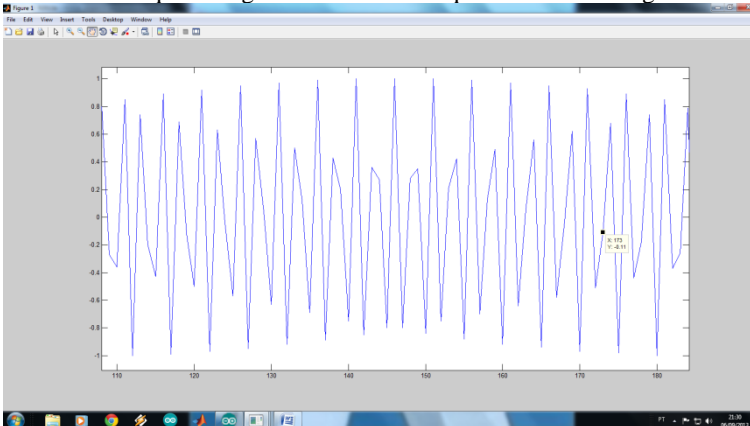
Fonte: Autor.

Para determinar o tempo exato desta pausa foi utilizado o seguinte procedimento: foi gerada uma vibração senoidal no excitador de vibração com uma frequência igual à metade da frequência de amostragem do acelerômetro. Neste caso, o vetor deve conter dois dados diferentes, um para o valor positivo e um para o valor negativo da senóide, mas devem ser os mesmos valores para todos os ciclos no tempo de leitura. O gráfico resultante destes dados deve ser um retângulo perfeito quando considerados múltiplos ciclos.

Na análise do gráfico, além de conter dados repetidos, o vetor continha múltiplos dados diferentes, mostrados na figura 31, o que significa que a frequência de amostragem *não coincide com a informada*

no datasheet do acelerômetro. Foram realizados testes para 400 Hz, 800 Hz e 1600 Hze em todos foi obtido o mesmo resultado. Decidiu-se, então, realizar testes de tentativa e erro para determinar a frequência de amostragem real do acelerômetro, até encontrar a frequência que pudesse reproduzir o retângulo perfeito.

Figura 31. Exemplo de gráfico gerado pelo protótipo ao ler um sinal senoidal com frequência igual a metade da frequência de amostragem.



Fonte: Autor.

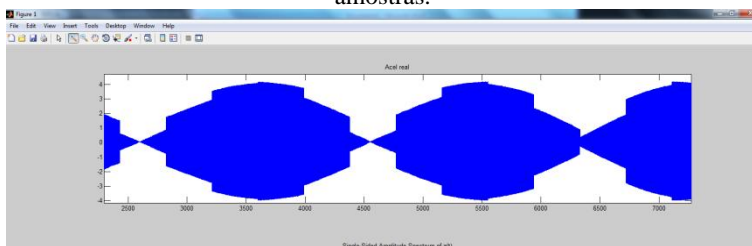
Dos testes realizados, todos resultaram num aumento ou diminuição dos valores gerados pelo acelerômetro, descrevendo curvas que variam a forma com o tempo (figuras 32). O significado disso só pode ser explicado considerando que *a frequência de amostragem não é fixa*. Para dar continuidade a esta investigação, foram selecionadas as frequências de amostragem apresentadas na tabela 10.

Tabela 10. Frequências de amostragem do acelerômetro.

Frequência de amostragem indicada no datasheet (Hz)	Frequência de amostragem aproximada (Hz)
400	390
800	780
1600	1560

Fonte: Autor.

Figura 32. Exemplo de frequência de amostragem de teste 391 Hz, 7.500 amostras.



Fonte: Autor.

Uma vez determinada a frequência de amostragem, é possível determinar o tempo de pausa entre as leituras dos dados na porta SPI. Nos testes, novamente de tentativa e erro, foram obtidos valores de tempo para cada frequência de amostragem. Estes valores estão apresentados na tabela 14.

Tabela 11. Tempo de pausa entre as leituras da porta SPI.

Frequência de amostragem (Hz)	Tempo de pausa (μs)
400 (390)	2540
800 (780)	1260
1600 (1560)	617

Fonte: Autor.

O fato da frequência de amostragem não ser fixa apresenta um obstáculo importante na determinação do tempo de sincronismo necessário nas leituras dos dados do acelerômetro MEMS. Essa variação na frequência de amostragem pode ser explicada por deficiências na qualidade dos componentes internos, tendo em vista que se trata de um acelerômetro MEMS, que é um elemento de baixo custo.

Testes de Offset e ScalingFactor (compensador e fator de escala)

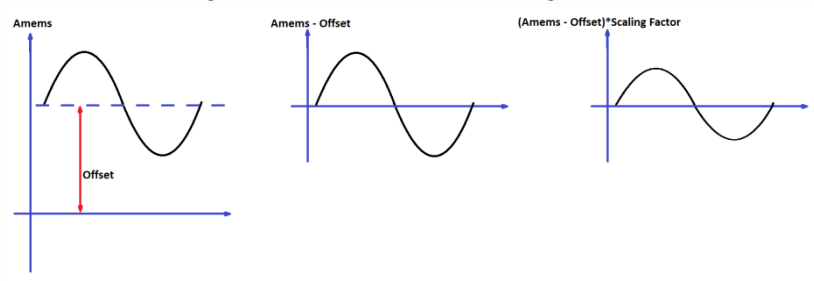
Offset e *ScalingFactor* são parâmetros fornecidos pelo fabricante do acelerômetro, necessários no cálculo da aceleração real, segundo a equação (2).

Acelerômetros são estruturas mecânicas que contêm elementos que são livres para se moverem. Estas peças móveis podem ser muito

sensíveis às tensões mecânicas, muito mais do que a eletrônica de estado sólido. O 0 g bias ou *Offset* é uma característica importante do acelerômetro porque define a linha de base para medir a aceleração. Tensões adicionais podem ser aplicadas durante a montagem de um sistema contendo o acelerômetro. Estas tensões podem ser geradas, mas não estão limitadas à solda do componente, estresse na placa durante a montagem e à aplicação de quaisquer compostos sobre, ou ao longo, do componente. Se a calibração for considerada necessária é recomendável que a calibração seja executada após a montagem do sistema para compensar estes efeitos.

O fator de escala é necessário, pois os dados de aceleração dependem da quantidade de bits utilizados pelo acelerômetro MEMS, que no caso do ADXL345 é selecionável. A figura 33 mostra graficamente o efeito destes dois parâmetros.

Figura 33. Efeito do Offset e Scaling Factor.

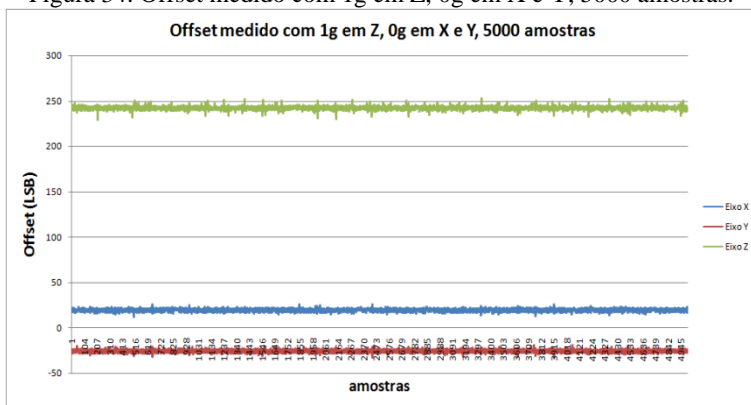


Fonte: Autor.

Foram realizados testes para determinar o valor real desses parâmetros. No caso do compensador (*Offset*) pode-se observar na figura 34 que é a média dos dados de uma senóide. No caso de um sinal discreto, quanto maior a quantidade de amostras consideradas, mais próximo do valor real é a média.

Através dos testes realizados foi comprovado que o compensador não é um parâmetro fixo e varia para cada medição, independente da frequência do sinal. Apresenta-se o gráfico (figura 34) obtido utilizando o método de calibração recomendado pelo fabricante, que consiste em colocar o acelerômetro em um campo de aceleração conhecido, ou 1 g em Z, e 0 g em X e Y. Neste caso, o compensador pode ser calculado como a média de várias medições.

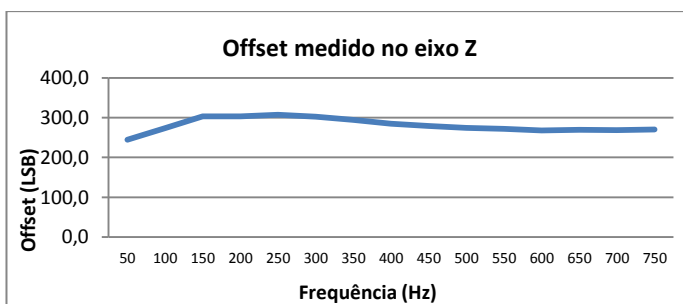
Figura 34. Offset medido com 1g em Z, 0g em X e Y, 5000 amostras.



Fonte: Autor.

Um teste adicional foi realizado para determinar se a média anterior é alterada quando se aplica uma aceleração senoidal. Foi escolhida uma frequência de amostragem de 1560 Hz e acelerações senoidais distribuídas a cada 50 Hz. O resultado mostra uma grande variação no valor do compensador para as diferentes frequências de análise (figura 35).

Figura 35. Valor do Offset medido em senóides com diferentes frequências no eixo Z.



Fonte: Autor.

Devido à grande variação dos valores registrados do compensador e a impossibilidade de obter um valor representativo, foram escolhidos os seguintes valores para o cálculo da aceleração real,

sendo eles uma aproximação do valor encontrado com o método do fabricante (tabela 12).

Tabela 12. Valores escolhidos para *Offset* nos três eixos coordenados.

Eixo	Offset (LSB)
X	20
Y	- 27
Z	240

Fonte: Autor.

Para verificar o valor do fator de escala(*ScalingFactor*) e determinar se existe alguma variação, considera-se a expressão:

$$A_{real} = accel_{MEMS} - Offset * ScalingFactor \quad (7)$$

ou

$$A_{real} = accel_{MEMS} * ScalingFactor - Offset * ScalingFactor \quad (8)$$

O termo $Offset * ScalingFactor$ tem um valor máximo de 0,99, e pode ser considerado desprezível para calcular o fator de escala:

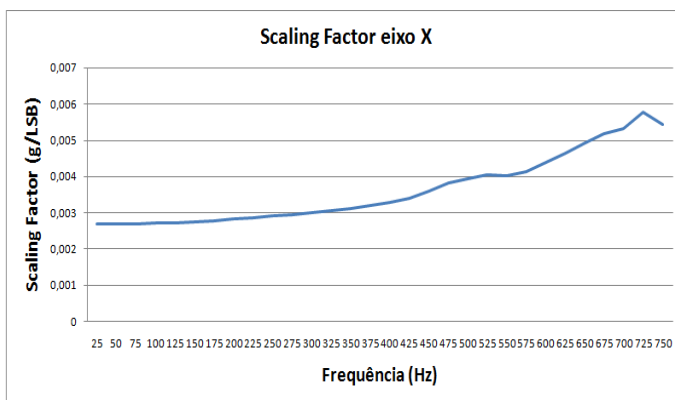
$$A_{real} = accel_{MEMS} * ScalingFactor \quad (9)$$

ou

$$ScalingFactor = \frac{A_{real}}{accel_{MEMS}} \quad (10)$$

O valor da aceleração real A_{real} pode ser obtido com medições do equipamento de medição de controle e o valor $accel_{MEMS}$ através de uma medição com o protótipo. A figura 36 mostra os resultados do cálculo para o eixo X. Percebe-se que no caso deste parâmetro, também não é possível encontrar um valor fixo.

Figura 36. Valores do ScalingFactor calculado para diferentes frequências no eixo X.



Fonte: Autor.

Os valores utilizados para ofator de escala são as médias destes valores para cada frequência até 500 Hz (tabela 13).

Tabela 13. *ScalingFactor* nos três eixos coordenados.

Eixo	ScalingFactor (g/LSB)
X	0,00305
Y	0,00303
Z	0,00326

Fonte: Autor.

Com estes valores a fórmula de cálculo para a aceleração real de cada eixo fica:

$$A_{real_x} = accel_{MEMS} - 20 * 0,00305 \quad (g) \quad (11)$$

$$A_{real_y} = accel_{MEMS} + 27 * 0,00303 \quad (g) \quad (12)$$

$$A_{real_z} = accel_{MEMS} - 240 * 0,00326 \quad (g) \quad (13)$$

O software MATLAB foi programado para obter os espectros de frequência a partir da fórmula anterior aplicando uma janela Hanning,

considerando que o sinal de entrada física é um sinal senoidal gerado pelo excitador de vibração. De acordo com a frequência de amostragem de 1560 Hz, no acelerômetro, foi calculada a FFT com 780 linhas. Assim, os testes seguintes foram realizados para verificar a estabilidade do sistema e a resposta de frequência comparando os resultados das medições do protótipo com o sistema de medição disponível no LVA (figura 37). Também foram realizadas medições em um compressor e obtida uma amostra de uma medição real em campo.

Figura 37. Montagem dos acelerômetros no excitador de vibração.



Fonte: Autor.

Os Anexos 2 e 3 apresentam os códigos finais de programação do micro controlador e MATLAB.

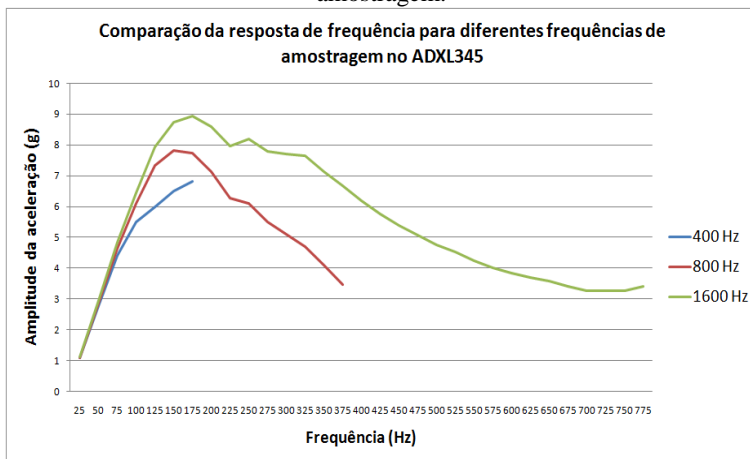
4.4. TESTES USANDO O PROTÓTIPO COMPLETO

Para a verificação da amplitude considerando diferentes frequências de amostragem, foram plotados os valores de amplitude de uma senóide quando utilizadas três frequências de amostragem, 390 Hz, 780 Hz e 1560 Hz na digitalização do sinal. Foram geradas vibrações senoidais distribuídas a cada 25 Hz, em cada frequência de amostragem de estudo e comparados os valores. Pode-se observar que a amplitude varia a partir de 75 Hz (figura 38).

A variação nas leituras de aceleração, dependendo da frequência de amostragem, apresenta uma dificuldade no caso de ser necessário

obter o valor verdadeiro da amplitude de aceleração. Na impossibilidade de comparar estes valores com um sistema de referência, não é possível determinar a validade do valor gerado pelo protótipo.

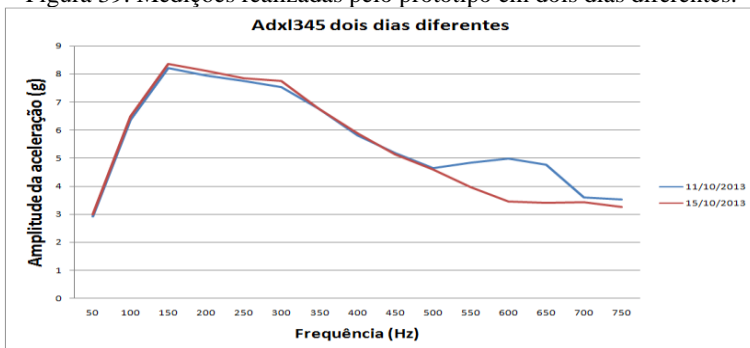
Figura 38. Amplitude gerada pelo protótipo, para diferentes frequências de amostragem.



Fonte: Autor.

Também foram comparadas medições realizadas em dois dias diferentes, para determinar a estabilidade do sistema ao longo do tempo. Na figura 39 é possível observar que a partir de 500 Hz foram encontrados valores diferentes de aceleração.

Figura 39. Medições realizadas pelo protótipo em dois dias diferentes.



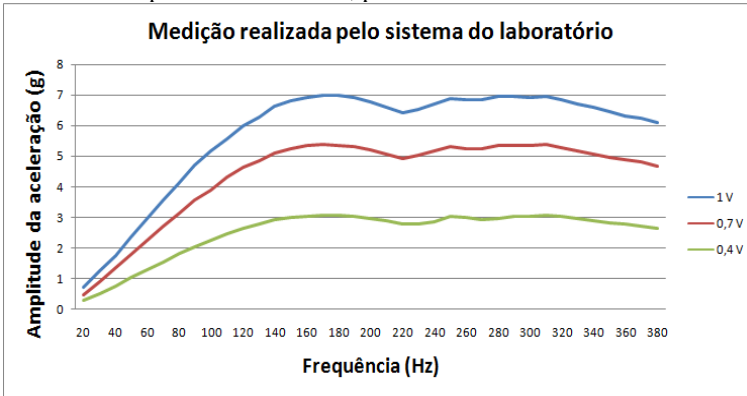
Fonte: Autor.

Neste caso, a faixa de frequência que poderia ser considerada útil (sem considerar as variações por frequência de amostragem) é limitada pelas variações nas leituras de aceleração. Da figura 39 é possível determinar uma frequência máxima de 500 Hz, sem variações no tempo.

Teste de linearidade da amplitude

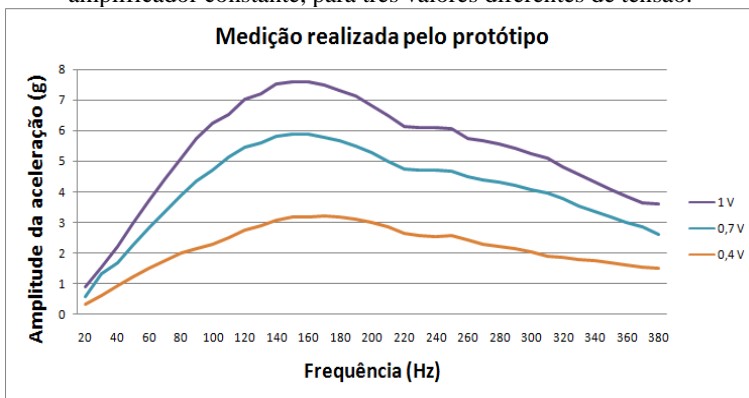
Para avaliar se o sistema de medição disponível no LVA e o protótipo apresentam linearidade na amplitude, foram realizadas medições para três valores diferentes de tensão do amplificador (figuras 40 e 41) e calculada a proporção entre os valores de amplitude para cada frequência (figuras 42 e 43). Foi utilizada uma frequência de amostragem de 390 Hz e as frequências das senóides foram distribuídas a cada 10 Hz. Os valores de tensão foram 0,4 V, 0,7 V e 1 V.

Figura 40. Resposta de frequência do sistema disponível no LVA ao manter a tensão do amplificador constante, para três valores diferentes de tensão.



Fonte: Autor.

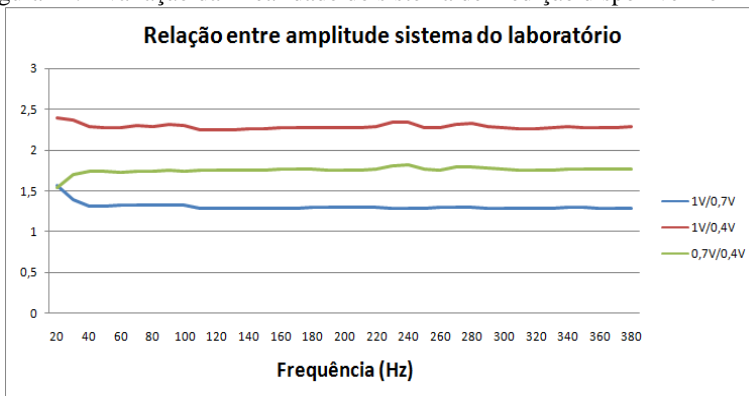
Figura 41. Resposta de frequência do protótipo ao manter a tensão do amplificador constante, para três valores diferentes de tensão.



Fonte: Autor.

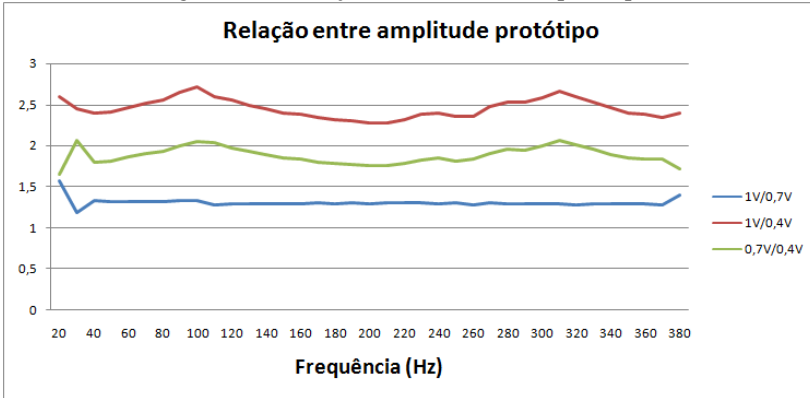
Caso o sistema apresente linearidade, a proporção da amplitude deve manter-se constante, com independência da frequência do sinal de entrada, e o gráfico para diferentes frequências deve gerar uma linha horizontal, paralela ao eixo x das frequências. Caso o gráfico não coincida com essas características, tem-se que o sistema não é linear (ver figuras 42 e 43).

Figura 42. Avaliação da linearidade do sistema de medição disponível no LVA.



Fonte: Autor.

Figura 43. Avaliação da linearidade do protótipo.



Fonte: Autor.

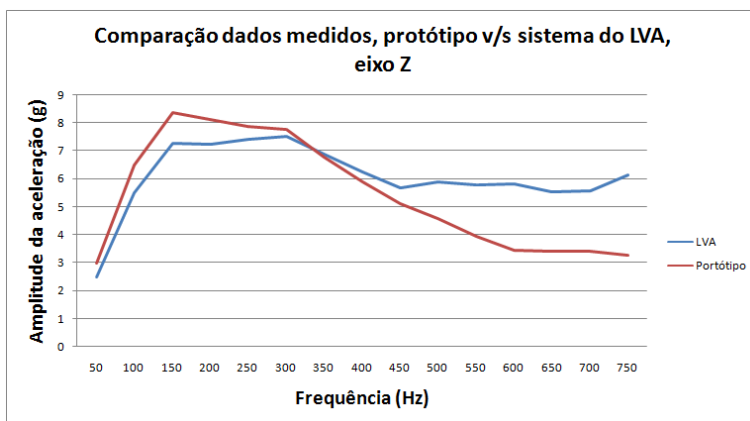
Com relação ao sistema de medição disponível no LVA, pode-se observar da figura 42 que a linearidade do sistema apresenta variações mínimas, conforme esperado. No caso do protótipo, este apresenta linearidade quando comparadas as amplitudes geradas por 0,7V e 1 V, mas ao serem comparadas essas mesmas amplitudes com aquelas geradas por uma tensão de 0,4 V, o gráfico já não é mais constante, apresentando um comportamento não linear (figura 43). Este comportamento apresenta-se numa faixa de aceleração menor que 3 g, e portanto, tem-se um limite de validade das medições quando medidas vibrações de máquinas e equipamentos nesta faixa de aceleração.

Comparação dos resultados do protótipo e o sistema de medição do LVA

Um teste adicional foi realizado no LVA para comparar as amplitudes entre o protótipo e um sistema de medição disponível no laboratório, com uma frequência de amostragem de 1560 Hz. Da figura 45 pode-se observar que o protótipo apresenta diferentes valores de resposta quando comparado com os valores gerados pelo equipamento de medição disponível no LVA.

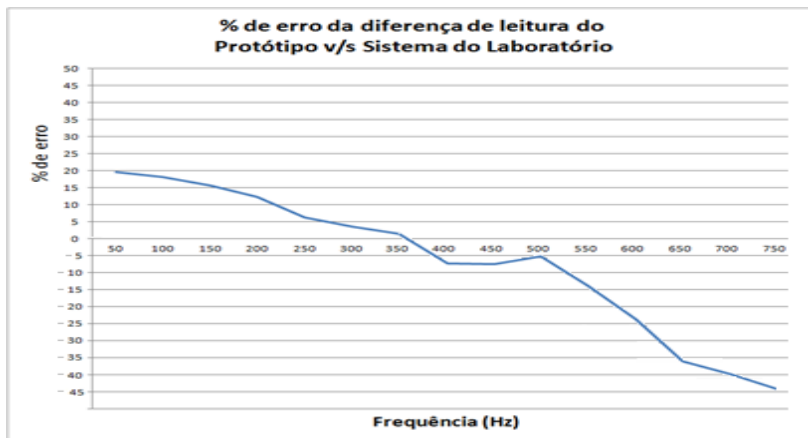
Foi calculada a porcentagem do erro a fim de avaliar os valores de aceleração gerados pelo protótipo, quando comparados com o sistema de medição do laboratório.

Figura 44. Comparação da amplitude de aceleração, Protótipo v/s sistema do LVA.



Fonte: Autor.

Figura 45. Porcentagem de erro da diferença de leitura do protótipo v/s sistema disponível no LVA.



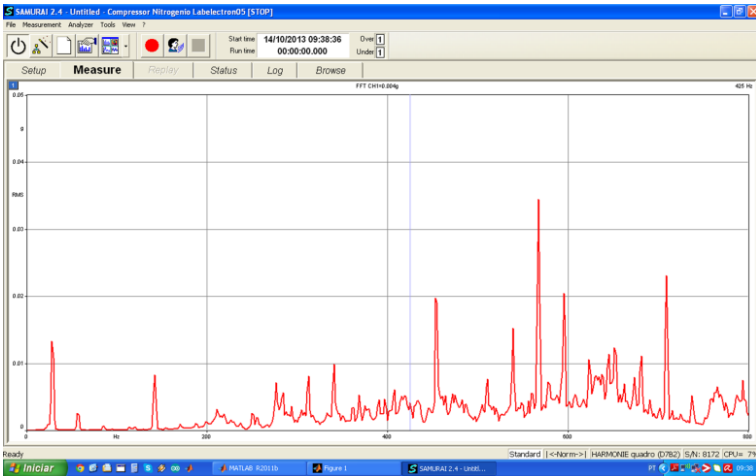
Fonte: Autor.

Da figura 45 pode-se observar que as variações das diferenças de leitura entre o protótipo e o sistema disponível no LVA estão numa faixa entre 20% e -40%.

Teste de vibração de um compressor de nitrogênio

Foi realizada uma medição referencial em um compressor de nitrogênio nas instalações do Labelectron da Fundação Certi, e comparados os espectros de frequência do sistema de medição Sinus(figura 46) e do protótipo (figura 47). Conforme esperado os espectros mostram diferenças nas leituras de amplitude da aceleração.

Figura 46. Espectro de compressor de nitrogênio obtido com equipamento Sinus.

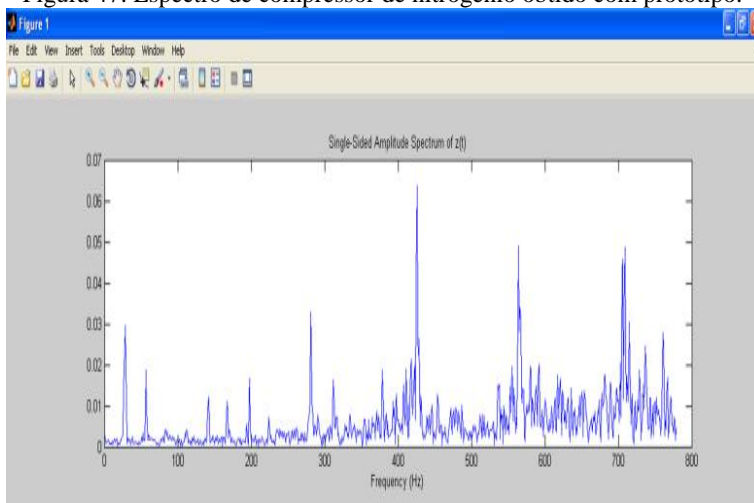


Fonte: Autor.

Foram realizados diversos testes a fim de avaliar o comportamento do protótipo. Este apresenta múltiplas variações em relação ao sistema de medição do LVA e mudanças significativas dentro das próprias características do acelerômetro MEMS e do micro controlador. Todas estas variações têm uma influência nos resultados finais das leituras da aceleração do protótipo, sendo estas divergentes dos valores verdadeiros gerados pelo sistema disponível no laboratório.

O tempo de leitura de dados e o tempo de envio de dados impossibilitam o desenvolvimento de um sistema de medição em tempo real, mas poderia ser considerado num sistema que não seja dependente desta variável, por exemplo, num sistema de monitoramento programado, onde o comportamento da máquina seja avaliado em intervalos de tempo bem maiores.

Figura 47. Espectro de compressor de nitrogênio obtido com protótipo.



Fonte: Autor.

As variações da frequência de amostragem e dos parâmetros do acelerômetro MEMS, geram incertezas nos valores de amplitude da aceleração gerados no protótipo e é comprometida a viabilidade de realizar uma análise para Manutenção Preditiva, sendo este dependente das comparações com tabelas de severidade baseadas justamente em dados precisos de aceleração ou velocidade.

A linearidade do protótipo também apresenta dificuldades para determinar a sua utilidade, pois a avaliação de máquinas depende da assinatura de vibração inicial. Nesta faixa de aceleração o protótipo apresenta um comportamento não linear e, conseqüentemente, não pode ser utilizado, ou pelo menos deve-se pensar em realizar algum tipo de compensação, ou ajuste, dos valores gerados nas medições.

5. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi desenvolvido um protótipo de analisador de sinais de baixo custo para uso em Manutenção Preditiva. A Manutenção Preditiva baseada em análise de vibração é uma técnica de análise de falha para máquinas rotativas, que é tipicamente onerosa e exclusiva para processos que podem incorporar este tipo de sistema e pessoal treinado em vibrações e processamento digital de sinais. Porém, com o advento da nova tecnologia MEMS com acelerômetros digitais é possível desenvolver equipamentos com custo menor, possibilitando que este tipo de análise seja aplicada a uma faixa maior de aplicações.

Os critérios básicos para um programa de Manutenção Preditiva baseado em análise de vibração determinaram as características iniciais a serem consideradas na definição dos componentes do protótipo. Estes critérios consideram a faixa de frequência das falhas mais comuns na indústria e as amplitudes de vibração que determinam os níveis de severidade de falha, nos três eixos coordenados.

O desenvolvimento deste protótipo apresentou uma série de desafios já que, do ponto de vista técnico, utiliza diversas outras tecnologias na programação dos parâmetros, integração de circuitos eletrônicos, comunicação entre dispositivos e software de análise, mantendo o foco na aplicação em Manutenção Preditiva como objetivo final.

O acelerômetro MEMS é um sensor do tipo capacitivo com aplicações nas áreas onde normalmente são usados acelerômetros do tipo piezo-elétrico. Apresenta um custo consideravelmente menor, incorporando no próprio chip elementos de condicionamento e digitalização do sinal, fornecendo os dados num formato de saída digital. Assim, é possível comunicar este dispositivo com o micro controlador através do protocolo de comunicação SPI e modificar os registros que contêm os parâmetros de funcionamento, tais como frequência de amostragem, faixa de aceleração e quantidade de bits, entre outras.

Foram desenvolvidos os códigos que permitiam a comunicação entre todos os elementos do protótipo e também códigos de testes de geração de sinais senoidais, séries de dados e um relógio controlador de tempo de instruções. Com estes códigos foi possível determinar o comportamento dos dispositivos, acelerômetro e micro controlador, e verificar os parâmetros necessários para a interpretação dos dados gerados pelo acelerômetro. Foi testado cada um dos passos na comunicação SPI entre o acelerômetro e o micro controlador, e a

comunicação USB entre este e o software MATLAB, registrando os resultados.

Desta forma foram determinados os valores dos parâmetros necessários para o cálculo da aceleração real nos três eixos e a criação dos vetores a partir dos quais foram calculados os espectros de frequência em MATLAB.

Considerando todas as análises desta pesquisa, pode-se concluir que o protótipo apresenta diferenças significativas nas leituras de aceleração, quando comparadas com as geradas por um equipamento de medição do laboratório. Essas diferenças têm origem nas variações das características do protótipo que não podem ser controladas, por exemplo, a variação na frequência de amostragem do acelerômetro, ou as variações de tempo de envio das amostras a partir do micro controlador.

5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve por objetivo principal o desenvolvimento de um analisador de vibração de baixo custo, utilizando a tecnologia MEMS. Foram desenvolvidos códigos de programação e testados os elementos do protótipo, que podem dar origem a uma serie de outras aplicações destas tecnologias:

- Desenvolvimento de bancadas ou protótipos com tecnologia sem fio, para realizar medições em condições de insegurança, comumente encontrada na indústria.
- Desenvolvimento de montagem para tecnologia de acelerômetros MEMS. Considerando que o acelerômetro MEMS é montado numa placa eletrônica, necessita-se compatibilizar com aplicações em máquinas.
- Incorporar avanços na comunicação SPI paralongas distâncias. O protocolo SPI é desenvolvido para aplicações de distâncias curtas.
- Os acelerômetros são um exemplo de tecnologia MEMS, mas existem outros transdutores, por exemplo, microfones MEMS, que podem ser avaliados em bancadas de baixo custo.

6. REFERÊNCIAS

ABDELLATEF, B. **Performance Improvement of MEMS Accelerometers in Vibration Based Diagnosis**. Tesisdoutoral, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, University of Manchester, 2011.

ADITEQ, **Previsão de falha de rolamento por análise espectral e de envelope**. Disponível em: <http://www.aditeq.com.br/download/Previsao_de_Falha_de_Rolamentos.pdf>. Acesso em: 18 out. 2012.

ALBARBAR, A.; BADRI, A.; SINHA, K.; STARR, A. **Performance evaluation of MEMS accelerometers**, Elsevier Technical Note, 2008.

ANALOG DEVICE (a). **ADIS 16227 MEMS accelerometer diagram**. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-accelerometers/adis16227/products/product.html>>. Acesso: 15 jan 2014.

ANALOG DEVICE (a). **ADIS 16227 MEMS accelerometer**. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/evaluation/eval-adis16227/eb.html>>. Acesso: 15 jan 2014.

ANALOG DEVICE (b). **ADX1345 Data Sheet**. Disponível em: <<http://www.analog.com/en/mems-sensors/mems-inertial-sensors/adxl345/products/product.html#product-documentation>>. Acesso em: 15 abr 2013.

ARDUINO (a). **Arduino Due Board**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue>>. Acesso em: 14 jan 2014.

ARDUINO (b). **Arduino Due Board**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue>>. Acesso em: 18 mar 2013.

ARDUINO (c). **Arduino Reference Page**. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Reference/HomePage#>>. Acesso em: 6 maio 2013.

ASSIS, F.; NOGUEIRA, J.C. **Aspectos da manutenção dos equipamentos científicos da Universidade de Brasília**. Dissertação apresentada na Faculdade de Economia, Administração, Contabilidade e Ciência da Informação e Documentação, Universidade de Brasília. 2006.

ATEC.**Commtest VB2000-T FFT Vibration Analyzer**.Disponível em: <<http://www.atecorp.com/products/commtest/vb2000-t.aspx>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

BIGOLIN ROLAMENTOS. Disponível em: <http://www.bigolinrolamentos.com.br/produtos_m.php?id=49>. Acesso em: 14 jan. 2014.

DA COSTA, Roberta. **Desenvolvimento de um a ferramenta virtual para análise de vibração em maquina rotativa: aplicação em uma bancada didática**. Trabalho de conclusão de curso apresentado á Faculdade de Engenharia Mecânica do Instituto de tecnologia da Universidade Federal do Pará, Belém, 2008. Disponível em: <http://www.ufpa.br/gva/Arquivos%20PDF/ROBERTA/TCC_Roberta.pdf>. Acesso em 19 nov. 2012.

DIGIKEY CORP. **Sensors-Transducers, accelerometers**. Disponível em: <<http://www.digikey.com/product-search/en/sensors-transducers/accelerometers/1966355>>. Acesso em 11 mar 2013.

EC SYSTEMS, **Signalconditionerpa-3000**. Disponível em: <<http://www.ec-systems.pl/en/pa-3000.html>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

EDEPREVENT. **CTC Vibrationsensors**. Disponível em: <<http://www.edprevent.com/vibration-sensors.html>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

GIRDHAR, P.; SCHEFFER, C. **Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance**.Newnes, Oxford, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780750662758500111>>. Acessoem: 13 nov. 2013.

HAMMOND, J.; SHIN, K. **Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers**.John Wiley & Sons Ltd, 2008.

HOWARD, I.A **review of Rolling element bearing vibration “Detection, diagnosis and Prognosis”**.Aeronautical and Maritime Research Laboratory Airframes and Engine Division.Department of Defense, Melbourne Australia.1994. Disponível em:<<http://www.dsto.defence.gov.au/publications/2624/DSTO-RR-0013.pdf>>. Acessoem: 14 jan 2014.

ILEARNVIBRATION, **Vibration Analyst Educational Software**, Mobius Institute, Australia. 2009.

ISO 18436-2:2003 **Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for training and certification of personnel -- Part 2: Vibration condition monitoring and diagnostics**.

JIANGSU SUHUA PUMP CO. LTD. Disponível em: <<http://www.shuibeng.com/en/ProductView.asp?ID=176>>. Acessoem: 18 out. 2012.

JIANGFENG WU. **A low-noise low-offset capacitive sensing amplifier for a 50- μ g/ \sqrt Hz monolithic CMOS MEMS accelerometer**. *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol.39, no.5, pp.722,730, May 2004. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1291677&number=28770>>. Acesso em: 15 jan 2014.

LAGO, D. **Manutenção de redutores de velocidade pela integração das técnicas preditivas de análise de vibrações e análise de óleo lubrificante**. Dissertação apresentada à faculdade de Engenharia, UNESP, Campus de Ilha Solteira 2007. Disponível em: <http://coruja.feis.unesp.br/dem/ppgem/teses_dissertacoes/2007/dissertacao_dflago.pdf>. Acesso 16 nov 2013

MANTENIMIENTO MUNDIAL. **Manutenção Preditiva – Análise de vibração**. Disponível em: <<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/Apostila.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2012.

MANUTENÇÃO INDUSTRIAL, **Manutenção Preditiva**. Disponível em: <http://wwwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_8.pdf>. Acesso em: 12 out. 2012.

MARAN, M. **Manutenção baseada em condição aplicada a um sistema de ar condicionado como requisito para sustentabilidade de edifício de escritórios**. São Paulo: EPUSP, 2012. 22 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/576). Disponível em: <http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00576.pdf>. Acesso em: 13 nov 2014.

MARTINS, R. **Um método para detectar falhas incipientes em máquinas rotativas baseado em análise de vibrações e lógica Fuzzy**. Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica de Minas e dos Materiais, UFRGS, Porto Alegre. 2000. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1969/000362586.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 maio 2013.

MATHEW, J. STECKI, J.S. 1986. **Comparison of vibration and direct reading ferrographic techniques in application to high-speed gears operating under steady and varying load conditions**. Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineers. V. 43, 8, 646-653.

MATHIAS, M. **Ferramentas de diagnóstico de Máquina**. Apostila curso, Programa de Pós-graduação em Mecânica, Área de Projetos, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <<http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/46460/13/Aula%2013%20-%20Diagnostico%20de%20Falhas%20-%20Parte%203.ppt>>. Acesso 2 set. 2012.

MATLAB (a). **Arduino support from Matlab**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/hardware-support/arduino-matlab.html>>. Acesso em: 13 maio 2013.

MATLAB (b). **String to double**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/str2double.html>>. Acesso em: 10 jun 2013.

MATLAB (c). **Serial portdevices**. Disponível em:
<<http://www.mathworks.com/help/matlab/serial-port-devices.html>>.
Acesso em: 3 jun 2013.

MOSHAGE, R. et al. **Vibration Monitoring for Predictive Maintenance in Central Energy Plants**. US Army Corp of Engineers. Technical Report FE-93/25. 1993. Disponível em:
<<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a286445.pdf>>. Acesso 13 nov 2013.

MOBLEY R. **An introduction to predictive maintenance**(Second Edition). Butterworth-Heinemann, Burlington, 2002. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978075067531450004X>>. Acesso em: 13 nov. 2013.

NBR 5294. **Confiabilidade e Manutenibilidade**. Associação brasileira de normas técnicas. Rio de Janeiro. 1994.

O'NEAL, C.B. "**Challenges in the packaging of MEMS**," *Advanced Packaging Materials: Processes, Properties and Interfaces*, 1999. *Proceedings. International Symposium on* , vol., no., pp.41,47, 14-17 Mar 1999. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=757284&isnumber=16387>>. Acesso em: 15 jan 2014.

RASPBERRY PI. Disponível em: <<http://www.raspberrypi.org/>>.
Acesso em 15 jan. 2014.

SDT.**Predictive Manteinance...for the masses**.Disponível em:<http://www.sdthearmore.com/products/sdt270>. Acesso em 15 jan 2014.

SELLITTO, M. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. RevistaProdução, v.15, n.1, p.44-59, 2005. Diponível em:<http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR450305_6975.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2013.

SEMAPI. DSP **Datalogger MX300**. Disponível em:
<<http://www.semapi.com.ar/mx300/en/index.php>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

SEMAPI, DSP DATA LOGGER MX300. **Manual de usuario** Versión 2.0_2013. Disponível em: <www.semapi.com>.

SENSORS, **The structure of a MEMS accelerometer**. Disponível em: <<http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/sonic-nirvana-mems-accelerometers-acoustic-pickups-musical-i-5852>>. Acesso em 15 jan. 2014.

SOBOYEJO RESEARCH GROUP. **MEMS/Nanoscale Thin Films**. Disponível em: <http://www.princeton.edu/mae/people/faculty/soboyejo/research_group/research/mems/>. Acesso em 15 jan. 2014.

SOLID STATE TECHNOLOGIES. **Top 30 MEMS companies of 2012**. Disponível em: <<http://electroiq.com/blog/2013/04/top-30-mems-companies-of-2012/>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

SOUSA, A. **O Emprego da Termografia na Manutenção Preditiva**. Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense v. 1, p. 43-46, 2010. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/artic/e/view/1790>>. Acesso 15 nov 15.

SPAMER, F. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica), Escola Politécnica da Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000900.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2012.

SPARKFUN, **Triple axis accelerometer ADXL335**. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/products/9269>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

TECHWATCH. **Board Comparison**. Disponível em: <<http://cdn.techwatch.keeward.com/wp-content/uploads/2013/02/Boards-Comparison.pdf>>. Acesso em: 11 mar 2013.

TEZ, S.; AKIN, T. **Fabrication of a sandwich type three axis capacitive MEMS accelerometer**. *Sensors, 2013 IEEE*, vol., no., pp.1,4, 3-6 Nov. 2013. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6688598&number=6688115>>. Acesso em: 15 jan 2014.

THANAGASUNDRAM, S.; SCHLINDWEIN F. S. **Comparison of integrated micro-electrical-mechanical system and piezoelectric accelerometers for machine condition monitoring.** IMechE Vol. 220 Part C: J. Mechanical Engineering Science, 2006.

Vibration Training Quick Reference, Glossary, Diagnostic Guide, Useful charts and tables. Mobius Institute. 2009.

WAEYENBERGH, G. Pintelon, L. **Maintenance concept development: A case study.** *Int. J. Production Economics* Vol. 89. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527303003013>>. Acesso em 15 nov, 2014.

WUTTKE, R. **Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico.** Revista Produção Online. ISSN 1676 - 1901 / Vol. VIII/ Num. IV/ 2008. Disponível em: <<http://producaoonline.org.br/rpo/article/viewFile/134/266>>. Acesso em: 13 nov. 2013.

ANEXO 1

Códigos de testes do Arduino Due

Código gerador de sinais senoidais no Arduino Due

```
floatsinVal[3];

void setup() {

Serial.begin(115200);

}

void loop() {

for (int x=0; x<400; x++)

{

Serial.println("Sync");

sinVal[0] = sin(159.2*2*3.1415*x*0.0025); // convertegrausa radianos e
obtém o valor do seno
sinVal[1] = sin(100*2*3.1415*x*0.0025); // convertegrausa radianos e
obtém o valor do seno
sinVal[2] = sin(50*2*3.1415*x*0.0025); // convertegrausa radianos e
obtém o valor do seno

Serial.println(sinVal[0]);

Serial.println(sinVal[1]);

Serial.println(sinVal[2]);

}

}
```

Código de relógio em Arduino Due

```
//declare aqui as variaveis do programa

int initial;
int final;

void setup()
{
  Serial.begin(115200); //instrução que inicia a comunicação serial
}

void loop()
{

  //contador com ciclo for

  for(int i = 0; i < 10; i++) //ciclo for con contador i
  {

    initial = micros();

    //aqui as instruções que deseja calcular o tempo;

    //o ciclo for permite calcular o tempo de 10 secuencias

    final = micros();

    Serial.println(final-initial);

  }
}
```

Código gerador de sequencia de números no Arduino Due

```
void setup() {  
  
  Serial.begin(115200);  
  
}  
  
void loop() {  
  
  for (int x=10; x<99; x++)  
  
  {  
    Serial.println(x);  
  }  
}
```

ANEXO 2

Código de programação do Arduino Due

```
// Programa de aquisição de dados do acelerômetro ADXL345

// Pode definir os pins 4, 10 e 52 para aproveitar as vantagens estendidas
do
// protocolo SPI do Arduino Due nesses pins só

// Define o pin 52 do Arduino para a conexão com o acelerômetro, nome
da variavel "ACCEL_SS_PIN"

#define ACCEL_SS_PIN52

// Define as constantes de leitura/escritura nos modos multi/single do
acelerômetro
// que serão usadas na função SPI.transfer
// ver datasheet

#define READ 0x80
#define WRITE 0x00
#define MULTI 0x40
#define SINGLE 0x00

// O acelerômetro envia os dados no formato 2's complement, por tanto
vai se precisar um arranjo
// de 6 elementos onde cada valor da aceleração utiliza 2 elementos por
cada eixo coordenado, logo
// deve-se combinar esse 2 dados para obter o valor bruto da aceleração,
por tanto cri-se outro arranjo
// de 3 elementos cada um representando um eixo XYZ

uint8_t acel_buffer[6];
int16_t acel_memsX[1560];
int16_t acel_memsY[1560];
int16_t acel_memsZ[1560];

#include <SPI.h> // inclui a biblioteca SPI
```

```

void setup() {

    // Abre o porto serial de visualização de dados

    Serial.begin(115200);

    // Inicia o SPI no pin 52

    SPI.begin(ACCEL_SS_PIN);

    // Determina o funcionamento geral do acelerômetro no protocolo SPI

    SPI.setBitOrder(ACCEL_SS_PIN, MSBFIRST);
    SPI.setDataMode(ACCEL_SS_PIN, SPI_MODE3);
    //SPI.setClockDivider(ACCEL_SS_PIN, 255); // ADXL345 max
    clock speed is 5 MHz

    // Muda os registros do acelerômetro

    // Registro 0x2C: BW_RATE
    // Linhas de código para mudar a frequência de amostragem (1560
    Hz 0x0F,
    // frequência máxima 1560/2=780 Hz)

    SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, WRITE | SINGLE | 0x2C,
    SPI_CONTINUE);
    SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x0e);

    // Registro 0x31: DATA_FORMAT
    // linhas de código para colocar o acelerômetro no modo
    fullresolution (0x08)
    // numa faixa de aceleração de +/- 16 g (0x03)

    SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, WRITE | SINGLE | 0x31,
    SPI_CONTINUE);
    SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x08 | 0x03);

    // Registro 0x2D: POWER_CTL
    // linhas de código que coloca o acelerômetro em
    measurementmode (0x08)

```

```

SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, WRITE | SINGLE | 0x2D,
SPI_CONTINUE);
SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x08);

// Verifica a conexão do acelerômetro

SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, READ | SINGLE | 0x00,
SPI_CONTINUE);
uint8_t acel_name = SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x00);

delay(1000);

}

void loop() {

    // ciclo for de leitura de 6 dados

for(int j = 0; j < 1560; j++) //Ciclo for de leitura de dados
{
SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, READ | MULTI | 0x32,
SPI_CONTINUE);
for(inti = 0; i < 5; i++)
    {
    acel_buffer[i] = SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x00,
    SPI_CONTINUE);
    }
    acel_buffer[5] = SPI.transfer(ACCEL_SS_PIN, 0x00);

// técnica 2's complemento

    //          _____MSB _____LSB _____
acel_memsX[j] = (acel_buffer[1] << 8) | acel_buffer[0];

acel_memsY[j] = (acel_buffer[3] << 8) | acel_buffer[2];

acel_memsZ[j] = (acel_buffer[5] << 8) | acel_buffer[4];

delayMicroseconds(617); // tempo de sincronização com o acelerômetro
}

```

```
// Ciclo for de impressão dos dados no porto serial

for(int m = 0; m < 1560; m++)
{
Serial.println("Sync");

Serial.println(accel_memsX[m]);

Serial.println(accel_memsY[m]);

Serial.println(accel_memsZ[m]);

}
delayMicroseconds(10); // tempo de espera em microsegundos para
estabilizar o sistema

}
```

ANEXO 3

Código de programação de Matlab

```

clc;
clearall

delete(instrfind({'Port'},{'COM5'})); %elimina qualquer atividade da
porta serial
s = serial('COM5','BaudRate',115200); %configuração porta serial
set(s, 'terminator', 'LF'); % define o terminator paraprntln
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');

fopen(s);          %abertura do porto serial

contador_errores=0; %Contador de erros ou valores não validos na
porta serial

%prompt = 'Quantos espectros ';
%espnum = input(prompt);

for n=1:3; %espnum;          %ciclo for dos grafico de espectros

contador_amostras=1; %Declaração do contador amostras
amostras=1560;      %Declaração do numero de amostras

tic%Contador de tempo do ciclo while

whilecontador_amostras<= amostras;          %ciclo de leitura de dados

a=fscanf(s,'%s',5); %variável de sincronização

while ~strcmp(a,'Sync');
    a=fscanf(s,'%s',5);
end

resto=fscanf(s,'%s',2);

```



```

eixoX = str2double(fscanf(s)); %valor da aceleração no eixo X no
formato str
eixoY = str2double(fscanf(s)); %valor da aceleração no eixo Y no
formato str
eixoZ = str2double(fscanf(s)); %valor da aceleração no eixo Z no
formato str

if ~isnan(eixoX) && ~isnan(eixoY) && ~isnan(eixoZ); %ciclo if que
garante o dado valido nos VetorXYZ
VetorX(contador_amostras)=eixoX;
VetorY(contador_amostras)=eixoY;
VetorZ(contador_amostras)=eixoZ;
contador_amostras=contador_amostras +1;
else
contador_errores=contador_errores+1;
end
% tempo(contador_amostras)=toc ;

end

tempo(n)=toc

VX=(VetorX-20).*0.00305; %Escalamento e Offset do
acelerometro
VY=(VetorY+27).*0.00303;
VZ=(VetorZ-240).*0.00326;

X=VX'.*hann(amostras); %Aplicacao da janela Hanning
Y=VY'.*hann(amostras);
Z=VZ'.*hann(amostras);

%NFFT = amostras; % Calcula o número de linhas da FFT ao
aproximar na potencia de 2 mais proxima
FFTX = fft(X)/amostras*2; % Calcula FFT de VetorX outra
formula FFTX = fft(X,NFFT)/L*2;
FFTY = fft(Y)/amostras*2; % Calcula FFT de VetorY
FFTZ = fft(Z)/amostras*2; % Calcula FFT de VetorZ
f = amostras/2*linspace(0,1,amostras/2+1); % define a faixa de
frequencia 0 até 1560 outra formula f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

```

```
ESPX(n,:)=2*abs(FFTX(1:amostras/2+1)); %calculo de espectros de
frecuencia
```

```
ESPY(n,:)=2*abs(FFTY(1:amostras/2+1));
```

```
ESPZ(n,:)=2*abs(FFTZ(1:amostras/2+1));
```

```
MediaESPX=mean(ESPX); %Calculo de medias dos espectros
```

```
MediaESPY=mean(ESPY);
```

```
MediaESPZ=mean(ESPZ);
```

```
% Plot Z single-sided espectro.
```

```
subplot (2,1,1);
```

```
plot(f,ESPZ(n,:));
```

```
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of z(t)')
```

```
xlabel('Frequency (Hz)')
```

```
% Plot Z single-sided espectro Media.
```

```
subplot (2,1,2);
```

```
plot(f,MediaESPZ);
```

```
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of z(t) MEDIA')
```

```
xlabel('Frequency (Hz)')
```

```
ylabel('|Z(f)|')
```

```
drawnow;
```

```
end
```

```
fclose(s);
```