

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**FREDERICO GOULART SOARES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM DATA LOGGER DE VIBRAÇÃO DE BAIXO CUSTO  
PARA USO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA**

**Alegrete  
2015**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos  
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do  
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .


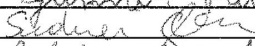

S676d	Soares, Frederico Goulart Desenvolvimento de um datalogger de vibração de baixo para uso em manutenção preditiva / Frederico Goulart Soares. 77 p.  Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2015. "Orientação: Jumar Luis Russi".  1. Manutenção preditiva. 2. Análise de vibração. 3. Datalogger. I. Título.	custo
-------	---	-------

Autoria: Frederico Goulart Soares

Título: DESENVOLVIMENTO DE UM DATALOGGER DE VIBRAÇÃO DE BAIXO CUSTO PARA USO EM MANUTENÇÃO PREDITIVA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

Os componentes da banca, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado

	Nome	Titulação	Instituição	Assinatura
1	Jumar Luís Russi	Prof. Dr.	unipampa	
2	Sidinei Ghissoni	Prof. Dr.	unipampa	
3	Paulo César Comassetto Aguirre	Prof. Me.	unipampa	

Data da aprovação: 3 de Dezembro de 2015.

*Aos meus pais, Edson e Ana Isabel, por  
não medirem esforços ao longo desses  
anos para eu conquistar o meu objetivo,  
sem eles, nada disso seria possível.*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Em especial meus pais, pela determinação e luta na minha formação.

À minha namorada e amiga, Mariana Sabo, pela compreensão, incentivo e pelas madrugadas adentro de dedicação a este trabalho ao meu lado, compartilhando momentos bons e ruins, sem nunca desanimar. Obrigado pelo carinho, pela paciência e por sua capacidade de me trazer paz nas horas difíceis.

Ao professor e orientador Jumar pela atenção e tempo disponibilizados a mim e, principalmente, pela persistência e paciência durante esta longa jornada.

Ao Bruno Muswieck e a toda a equipe do departamento de P&D da Eletroeste pela amizade, companheirismo e pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

E a todos os colegas e professores que durante a graduação contribuíram na minha formação acadêmica.

*“Se és capaz de manter a tua calma quando  
Todo o mundo ao teu redor já a perdeu e te culpa;  
De crer em ti quando estão todos duvidando, (...)  
E não parecer bom demais, nem pretensioso;  
Se encontrando a desgraça e o triunfo conseguires  
Tratar da mesma forma a esses dois impostores;  
Se és capaz de, entre a plebe, não te corromperes  
E, entre reis, não perder a naturalidade;  
(...) serás um homem, meu filho!”*

*“If”, Rudyard Kipling.*

## RESUMO

Neste trabalho desenvolveu-se um protótipo de equipamento de análise de vibração de baixo custo, utilizando um acelerômetro de tecnologia *Micro-Electro-Mechanical Systems* (MEMS) para coleta de dados, visando a manutenção preditiva em equipamentos de sistemas de bombeamento. A implementação consiste na montagem e projeto de um protótipo que utiliza um acelerômetro MEMS para coletar dados vibratórios em máquinas rotativas, que possibilitará a detecção de falhas no funcionamento dos equipamentos. Estes dados vibratórios são adquiridos por um microcontrolador e gravados em um cartão SD onde são armazenados para análise posterior. O custo estimado do data logger foi de R\$ 87,32, bem inferior aos equipamentos disponíveis no comércio. São apresentados como resultados do trabalho o próprio equipamento e um conjunto de dados coletados pelo mesmo. Os resultados obtidos nos testes experimentais foram satisfatórios, pois o *data logger* comportou-se de maneira esperada, alcançando os objetivos deste trabalho.

**Palavras-chave:** MEMS. Manutenção Preditiva. Análise de Vibração. Acelerômetro.

## ABSTRACT

This work develops a low-cost vibration analysis equipment prototype, using an accelerometer Micro-Electro-Mechanical Systems technology (MEMS) for data collection, aiming to predictive maintenance of pumping systems equipment. The implementation consists of the assembly and design of a prototype that uses a MEMS accelerometer to collect vibration data on rotating machines, which enables the detection of failures in the operation of equipment. The vibration data are collected by a microcontroller and then saved on an SD card, where they are stored for later analysis. The estimated *data logger* price was R\$ 87.32, well below similar equipment commercially available. The results presented from this work are the equipment itself and the data collected by it. The results of experimental tests were satisfactory, since the *data logger* worked in an expected way, reaching the objectives of this work.

**Keywords:** MEMS. Data logger. Vibration analysis. Accelerometer.



**LISTA DE EQUAÇÕES**

EQUAÇÃO 1. Cálculo do ROOT MEAN SQUARE (RMS).....	27
EQUAÇÃO 2. Lei de Hooke.....	31
EQUAÇÃO 3. Segunda Lei de Newton.....	31

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1. Curva de taxa de falha.....	19
FIGURA 2. Escolha do método de manutenção.....	21
FIGURA 3. Níveis de referência para avaliar severidade de vibração .....	26
FIGURA 4. Quantificações da amplitude.....	27
FIGURA 5. Sistema massa – mola.....	28
FIGURA 6. Esquema de um acelerômetro capacitivo .....	29
FIGURA 7. Esquema de um acelerômetro Piezelétrico .....	30
FIGURA 8. Imagem microscópica do acelerômetro MEMS.....	32
FIGURA 9. Visão geral do protótipo .....	34
FIGURA 10. Circuito de alimentação .....	35
FIGURA 11. Tipos de encapsulamentos utilizados no desenvolvimento do protótipo. ....	37
FIGURA 12. Circuito de programação.....	38
FIGURA 13. Programador AVRISP mkII .....	38
FIGURA 14. Circuito do Acelerômetro MMA8451Q .....	40
FIGURA 15. Encapsulamento QFN-16 .....	41
FIGURA 16. Acelerômetro comparado a uma moeda.....	41
FIGURA 17. PCI desenvolvida para adaptar o acelerômetro à <i>protoboard</i> .....	42
FIGURA 18. Linhas de comunicação I <sup>2</sup> C .....	42
FIGURA 19. Circuito do barramento I <sup>2</sup> C.....	43
FIGURA 20. Cartão micro SD e adaptador utilizados no protótipo.....	44
FIGURA 21. Esquema de memória Flash .....	44
FIGURA 22. Cartão SD adaptado para a <i>protoboard</i> .....	45
FIGURA 23. Protocolo SPI.....	46
FIGURA 24. Fluxograma do código .....	48
FIGURA 25. Protótipo na <i>protoboard</i> .....	50
FIGURA 26. <i>Layout</i> da camada superior da PCI.....	51
FIGURA 27. <i>Layout</i> da camada inferior da PCI.....	52
FIGURA 28. PCI do data logger .....	53
FIGURA 29. Teste preliminar considerando a aceleração da gravidade.....	57
FIGURA 30. Gráfico do teste preliminar considerando a aceleração da gravidade ..	57
FIGURA 31. Teste preliminar com bola de tênis .....	58

FIGURA 32. Gráfico dos 3 eixos do teste com bola de tênis a 30cm da superfície ..	59
FIGURA 33. Gráfico dos 3 eixos do teste com bola de tênis a 60cm da superfície ..	60
FIGURA 34. Figura esquemática do sistema de bombeamento .....	61
FIGURA 35. <i>Data logger</i> fixado ao motor.....	62
FIGURA 36. Gráficos do funcionamento normal da bomba em função dos três eixos .....	63
FIGURA 37. Gráfico do funcionamento com a válvula de sucção fechada em função dos três eixos .....	64
FIGURA 38. Comparação dos gráficos de funcionamento normal e com a válvula de sucção fechada do eixo Y .....	65

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 01. Tabelas de Diagnóstico – Desbalanceamento .....	22
TABELA 02. Tabelas de Diagnóstico – Desalinhamento .....	23
TABELA 03. Tabelas de Diagnóstico – Instabilidade nos Mancais .....	24
TABELA 04. Tabelas de Diagnóstico – Componentes Frouxos .....	24
TABELA 05. Tabelas de Diagnóstico – Problemas em Engrenagens .....	25
TABELA 06. Estimativa de custo do <i>data logger</i> .....	54
TABELA 07. Comparação entre o valor RMS do funcionamento normal e da válvula fechada em função dos três eixos.....	65

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	OBJETIVOS .....	17
2.1	Objetivo geral .....	17
2.2	Objetivos específicos.....	17
3	DESENVOLVIMENTO TEÓRICO.....	18
3.1	Conceito de manutenção.....	18
3.1.1	Manutenção preventiva.....	18
3.1.2	Manutenção corretiva .....	18
3.1.3	Manutenção preditiva.....	18
3.1.3.1	Análise por vibração .....	21
3.1.3.2	Falhas detectadas na análise por vibração.....	22
3.1.3.3	Limite de amplitude de aceleração .....	25
3.2	Conceito de vibração .....	26
3.3	Acelerômetros .....	27
3.3.1	Tipos de acelerômetros .....	28
4	DESENVOLVIMENTO PRÁTICO.....	33
4.1	Descrição geral.....	33
4.2	Circuito de alimentação .....	34
4.3	Microcontrolador – ATmega328P .....	35
4.3.1	Programação ISP.....	37
4.4	Acelerômetro – MMA8451Q.....	39
4.4.1	Protocolo de comunicação I <sup>2</sup> C.....	42
4.5	Armazenamento de dados .....	43
4.5.1	Protocolo de comunicação SPI.....	45
4.6	Firmware .....	47
4.6.1	Interface .....	49
4.7	Montagem do protótipo .....	50
4.8	Estimativa de custo do protótipo.....	53
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	56
5.1	Testes preliminares.....	56
5.1.1	Aceleração da Gravidade.....	56
5.1.2	Teste com bola de tênis.....	58

	14
<b>5.2 Teste em uma bomba d'agua centrífuga de 1,5 CV</b> .....	<b>61</b>
<b>5.2.1 Funcionamento normal</b> .....	<b>62</b>
<b>5.2.2 Funcionamento com válvula da sucção fechada</b> .....	<b>63</b>
<b>5.2.3 Cálculo do Valor Eficaz (RMS)</b> .....	<b>65</b>
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
<b>ANEXO I</b> .....	<b>72</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O uso da tecnologia propagou-se em ritmo acelerado em todos os setores econômicos com o decorrer dos anos. Com isto, o uso de equipamentos eletroeletrônicos tornou-se essencial para o desenvolvimento de todo e qualquer negócio. Porém, o uso constante destes equipamentos leva à falhas nestes sistemas, exigindo uma manutenção contínua, onde se destacam as manutenções preventiva, corretiva e preditiva. Pode-se definir a manutenção como o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos, visando garantir a continuidade de sua operação 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).

A manutenção não terá a sua importância reduzida nos próximos anos, muito pelo contrário, assim como o corpo humano, as instalações industriais precisarão de acompanhamento e prevenção sempre. Quanto mais automatizado for o processo de manufatura, a manutenção será mais dependente do homem, seja daqui há 20 ou 50 anos. (Lobato, 2008).

Existem várias técnicas de manutenção atualmente, mas somente a manutenção preditiva oferece maior disponibilidade de maquinário no processo, pois como esta complementa a manutenção preventiva - que é uma técnica com objetivo de planejar paradas pré-determinadas - ela evita que uma peça seja trocada pelo seu tempo de atuação, mesmo estando em perfeito estado, diminuindo significativamente os custos de produção. Ambas as técnicas buscam evitar a manutenção por quebra, que seria a manutenção corretiva.

Sendo assim, pesquisas relacionadas com novas tecnologias para manutenção são realizadas frequentemente, visando melhorias na sua eficácia, confiabilidade e em seu custo.

O presente trabalho foca-se na manutenção preditiva de sistemas de bombeamentos - que são sistemas que possuem como característica principal o transporte de água de um reservatório inferior para um reservatório superior - fazendo o uso de acelerômetros MEMS, que atuarão como sensores, coletando dados vibratórios no equipamento. O movimento medido pelo sensor é então convertido em um sinal analógico ou digital, podendo-se assim comparar os dados

coletados com os dados de referência do equipamento analisado.

O acelerômetro MEMS é o elemento principal do protótipo a ser desenvolvido; considerando sua natureza capacitiva e seu baixo custo, torna-se uma alternativa para o desenvolvimento de novos projetos. Possuem como função a transdução de sinais de um domínio físico para outro, como do mecânico para elétrico (O'NEAL, 1999).

Além do acelerômetro MEMS, usou-se um microcontrolador de 8 bits para coletar os dados vibratórios do acelerômetro e registrá-los em um cartão SD (dispositivo responsável pelo armazenamento de dados para uma análise posterior), e uma Interface, constituída por um botão que inicia e interrompe os registros manualmente, juntamente com um LED, que indica o seu estado vigente.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Sabendo-se das vantagens da manutenção preditiva e do custo elevado de equipamentos eletrônicos, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um protótipo de baixo custo capaz de coletar os dados de vibração para análise, em prol de realizar a manutenção preditiva em sistemas de bombeamento.

### **2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um protótipo de tamanho reduzido e simples de operar;
- Planejar um sistema de atualização de firmware no próprio sistema (ISP);
- Garantir a compatibilidade com cartões de memória disponíveis no mercado para o armazenamento dos dados;
- Disponibilizar os dados coletados em formato compatível com softwares específicos, facilitando a análise;
- Obter um sistema com baixo custo de fabricação.

### **3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO**

#### **3.1 Conceito de manutenção**

Manutenção é um conjunto de ações designadas para manter ou recolocar um item no estado em que o mesmo possa desempenhar uma função requerida.

##### **3.1.1 Manutenção preventiva**

O termo “manutenção preventiva” significa manutenção periódica. Nesse contexto, ela deve, portanto, ser entendida como uma atividade periódica ou agendada que tem o objetivo de prevenir os modos de falha ou defeitos. Em sua forma mais simples, essa atividade envolve lubrificação periódica, revestimento, impregnação ou limpeza dos componentes da máquina, para aumentar seu tempo de vida (BLOCH,2014).

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.

##### **3.1.2 Manutenção corretiva**

A definição, apresentada na norma NBR 5462 (1994), determina a manutenção corretiva como a manutenção efetuada após a ocorrência de uma falha, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

É aquela que corrige alguma falha, restabelecendo a função. Geralmente está associada a custos elevados.

##### **3.1.3 Manutenção preditiva**

Enquanto a manutenção preventiva deve procurar os modos de falhas predominantemente dependentes do tempo, a manutenção preditiva aborda os modos de falha que ocorrem aleatória e subitamente, buscando por eles e realizando os reparos no momento certo. Em termos ideais, a manutenção preditiva

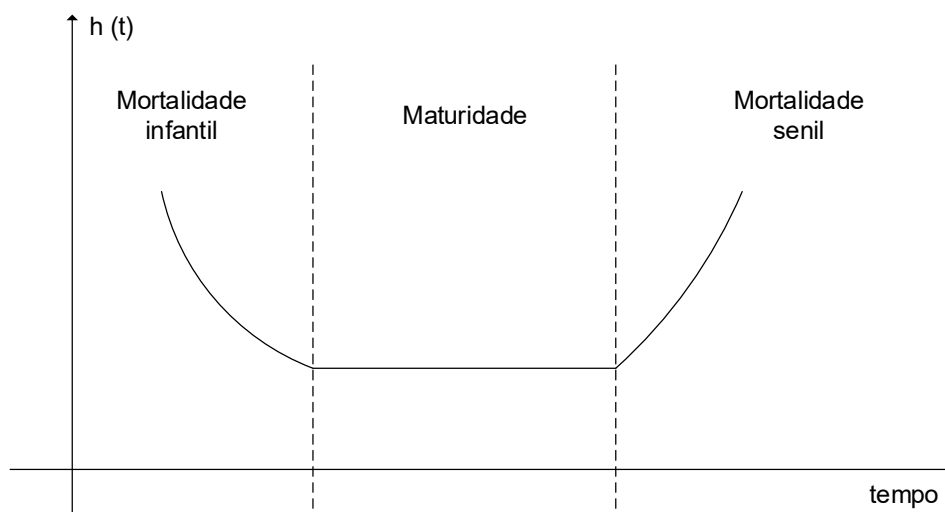
deve estabelecer uma busca contínua de defeitos, ou seja, o monitoramento contínuo da condição e do desempenho das máquinas (BLOCH, 2014). Predizer as falhas nos sistemas ou equipamentos é o objetivo da manutenção preditiva.

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 comportamento da taxa de falha de um equipamento pode ser descrito pela chamada “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.**



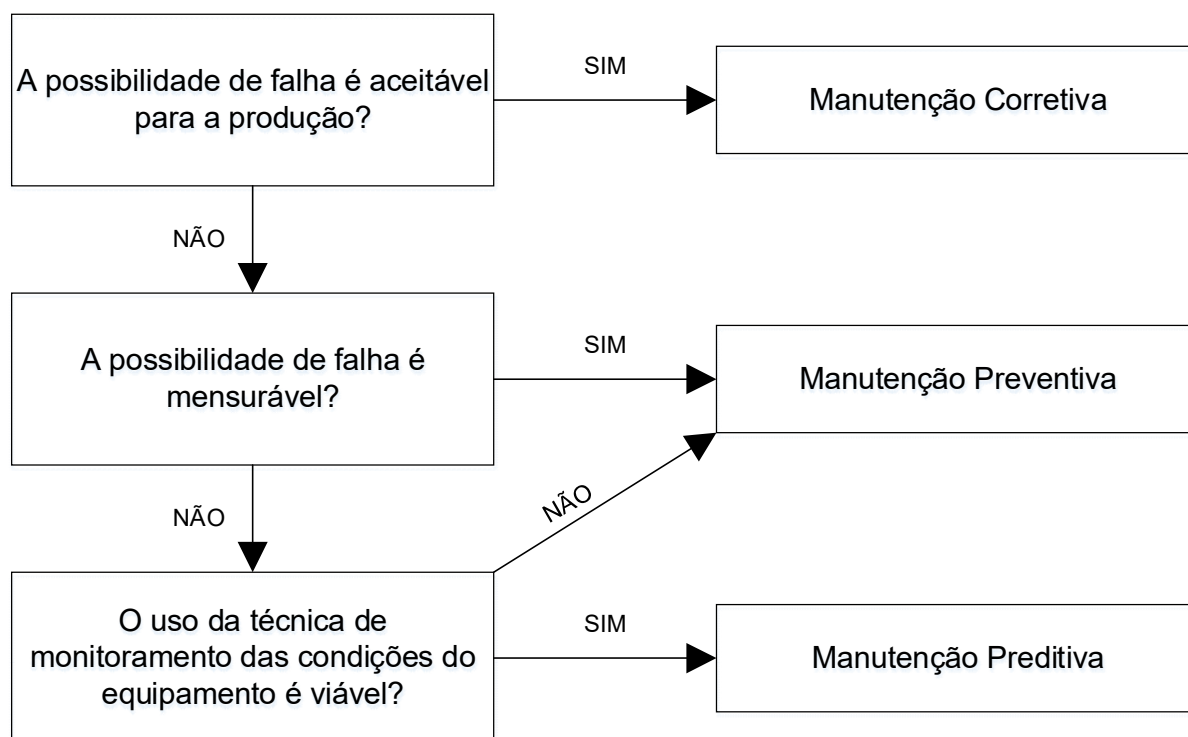
No primeiro período, denominado mortalidade infantil, percebe-se uma taxa decrescente, onde se encontram as falhas prematuras, geralmente de fabricação. Na maturidade ocorrem as falhas aleatórias, de causas imprevisíveis. No momento em que a taxa torna-se crescente, na mortalidade senil, ocorrem as falhas inevitáveis por perda da resistência dos materiais. 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).

O monitoramento preditivo é principalmente baseado nas técnicas descritas abaixo (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 parasitas);
- Fenômenos de viscosidade (líquidos penetrantes);
- Radiações ionizantes (Raio X ou Gamagrafia);
- Tribologia;
- Monitoria de processos;
- Inspeção visual;
- Outras técnicas de análise não-destrutivas.

Considerando que cada equipamento terá a necessidade de um método de manutenção pré-determinado, sujeito a futuras adaptações de acordo com suas necessidades, a figura 2 representa uma metodologia para auxiliar nesta escolha, baseando-se nas possibilidades de falha. Se numa produção é aceitável uma falha no equipamento, sendo viável a ausência deste equipamento durante seu reparo e seu alto custo, o ideal é a manutenção corretiva. Caso contrário, deve-se analisar a periodicidade da falha e se há condições de implantar um sistema de monitoramento do equipamento, para decidir entre manutenção preventiva e preditiva.

**Figura 2: Escolha do método de manutenção.**

### 3.1.3.1 Análise por vibração

A técnica de análise por vibração fornece uma maior quantidade de informações em comparação com outras técnicas (MOBIUS INSTITUTE, 2009), por este motivo, foi a técnica escolhida para o presente trabalho.

A análise vibratória identifica sinais que possam ser utilizados como conhecimento das características de um sistema. A resposta em frequência (conseguida através da transformada de Fourier) mostra as frequências em que a energia vibratória se concentra (NETO, 2012).

Todo equipamento rotativo gera vibração, que leva a uma deterioração dos mesmos. Um acompanhamento diário dos níveis de vibração identifica as condições da máquina. Essas vibrações se propagam a todo o conjunto do equipamento, 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).

### 3.1.3.2 Falhas detectadas na análise por vibração

A análise por vibração pode detectar várias falhas no equipamento por alterações nos espectros de vibrações referenciais, implicando a necessidade do conhecimento do comportamento da frequência em relação à falha. A frequência fundamental é representada por 1X e seus harmônicos por 2X, 3X, etc. Estão entre as principais falhas detectadas por análise de vibração:

- *Desbalanceamento*: Causado por balanceamento executado de maneira inadequada, “deixando” o desbalanceamento residual; Perda de parte do rotor por qualquer razão; depósito de material estranho em alguma das pás do rotor, desbalanceamento das massas; empeno permanente ou temporário; excentricidade entre os componentes acoplados e outros.

No livro “*Introduction to Machine Vibration*”, do autor Glenn D White, está disponibilizada uma série de tabelas que interpretam e geram dados em relação às situações resultantes de problemas com vibração, como exemplos as tabelas de 1 a 5, disponibilizadas neste capítulo.

**Tabela 1: Tabelas de Diagnóstico - Desbalanceamento. Fonte: Autor. Baseado em WHITE, 2008.**

Fonte de vibração	Frequência de Excitação	Plano de Ação	Amplitude	Características do Espectro
Estático	1X	Radial	Estável	Faixa estreita
Dinâmico	1X	Radial	–	Geralmente, Harmônicos na ordem 1X
No acoplamento	1X	Radial e Axial	–	–
Motor em balanço	1X	Radial e Axial	–	–

- *Desalinhamento*: A vibração só se manifestará quando as forças provocadas pelo desalinhamento são transmitidas ao rotor e mancais sob a forma de pré-carga. Os principais problemas sob o aspecto de pré-carga em máquinas rotativas são: desalinhamento angular, paralelo ou ambos; acoplamento

defeituoso; desalinhamento entre mancais ou engrenagens, entre outros.

**Tabela 2: Tabelas de Diagnóstico – Desalinhamento. Fonte: Autor. Baseado em WHITE, 2008.**

Fonte de vibração	Frequência de Excitação	Plano de Ação	Amplitude	Características do Espectro
Angular	1X, 2X	Axial	Estável	Faixa estreita
Paralelo	1X, 2X	Radial	Estável	Faixa estreita
Combinado	1X, 2X	Radial e Axial	Estável	Faixa estreita
Mancais	2X	Radial, Axial e Tangencial	Alta, Estável	Faixa estreita
Impelidor	2X, aumento de harmônicos na ordem igual ao número de pás	Radial	Estável	Faixa estreita
Engrenagem	Forte na ordem do “gear mesh”	Radial, Axial e Tangencial	Estável	Geralmente, faixas laterais (1X) perto da ordem de “gear mesh”

- *Instabilidade*: são aquelas que pertencem ao grupo das vibrações subsíncronas, onde as frequências estão abaixo da rotação das máquinas, e caracterizam-se pela incapacidade dos mancais manterem o rotor numa posição estável. Os principais casos são: *Oil Whirl*, *Oil whip* e instabilidade derivada da selagem, onde a *Oil Whirl* é a instabilidade subsíncrona de filtro de óleo e a *Oil whip* é a instabilidade com ressonância (BLOCH, 2014).

**Tabela 3: Tabelas de Diagnóstico – Instabilidade nos Mancais. Fonte: Autor. Baseado em WHITE, 2008.**

Fonte de vibração	Frequência de Excitação	Plano de Ação	Amplitude	Características do Espectro
Oil Whirl	0,38X até 0,48X	Radial	Estável	Altos picos
Oil Whip	0.38X até 0.48X	Radial	-	Altos picos
Limpeza Excessiva do mancal	Harmônicos na ordem 1X	Radial	-	Salto na série harmônica de ordem 1X
Mancais Frouxos	0,5X, 1X	Radial	-	Harmônicos de ordem 0,5X

- *Componentes frouxos*: São aquelas vibrações causadas por folga existente entre os componentes. Suas causas mais recorrentes são: folga entre a caixa dos mancais e a carcaça da máquina.

**Tabela 4: Tabelas de Diagnóstico – Componentes Frouxos. Fonte: Autor. Baseado em WHITE, 2008.**

Fonte de vibração	Frequência de Excitação	Plano de Ação	Amplitude	Características do Espectro
Nos Jazentes	1X Harmônicos	Tangencial	Estável	Faixa estreita
Nos Mancais	1X Harmônicos	Radial	Estável	Faixa estreita
Intenso nos Mancais	0,5X Harmônicos	Radial	Estável	-

- *Engrenagens*: causados pela necessária interação entre os eixos que compõe a própria engrenagem. Suas principais dificuldades estão associadas à excentricidade das Engrenagens, a operação com baixa carga e aos defeitos de fabricação ou fadiga dos dentes.



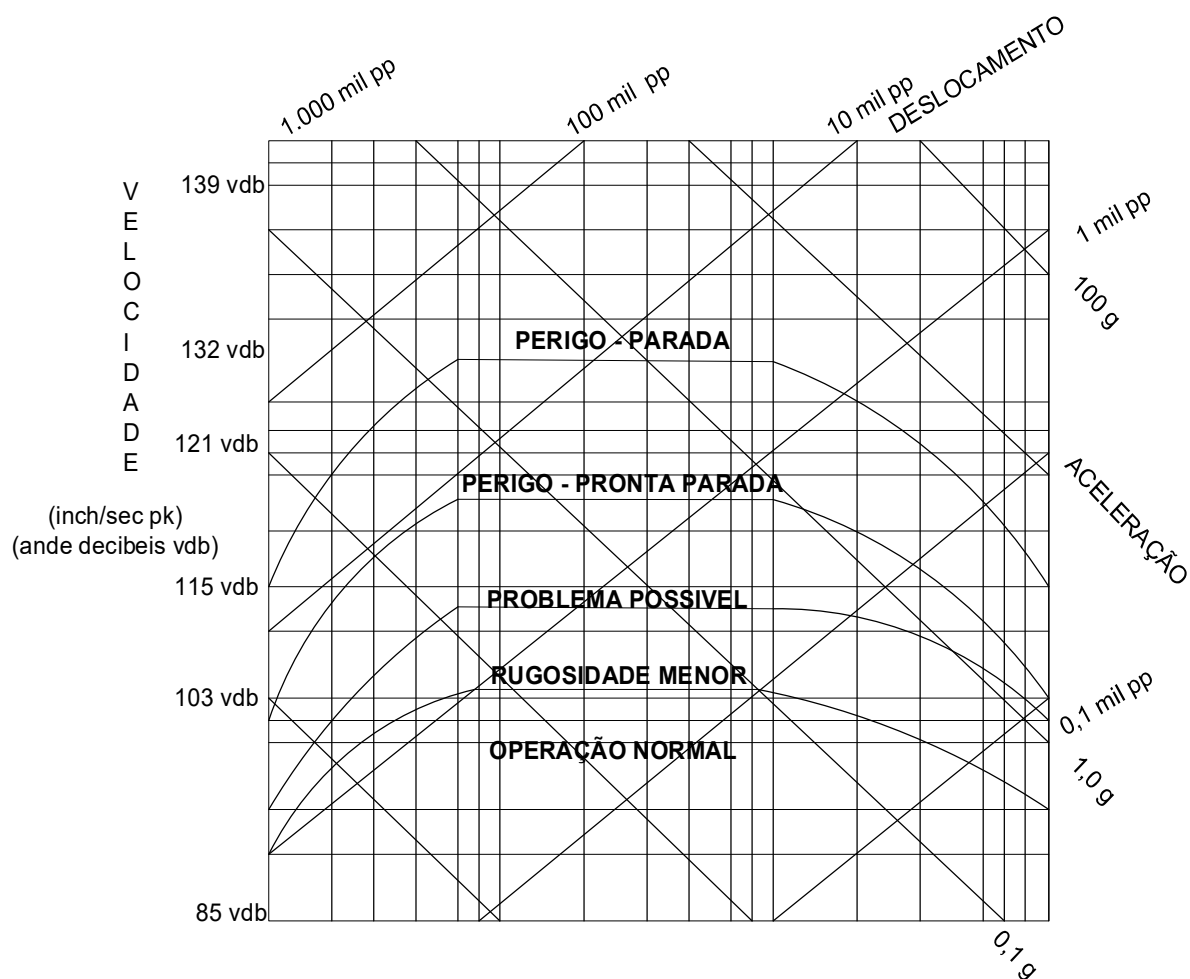
**Tabela 5: Tabelas de Diagnóstico – Problemas em Engrenagens. Fonte: Autor. Baseado em WHITE, 2008.**

Fonte de vibração	Frequência de Excitação	Plano de Ação	Amplitude	Características do Espectro
Contato de dentes Impróprio	X (nº do contato de dentes)	Radial e Axial	Estável e às vezes intermitente	Faixa estreita
Excentricidade	1X, Malhas de Dentes	Radial	-	Faixa estreita
Desalinhamento	2X, Malha de Dentes	Axial	Estável	Faixa estreita
Baixa carga	1X mais a frequência da Malha de Dentes	Radial ou Axial	Estável	Faixa estreita

### 3.1.3.3 Limite de amplitude de aceleração

Para cada nível de severidade de vibração de equipamentos existe um valor de amplitude de vibração. Esses valores estão representados na figura 3 e 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.

Figura 3: Níveis de referência para avaliar severidade de vibração.



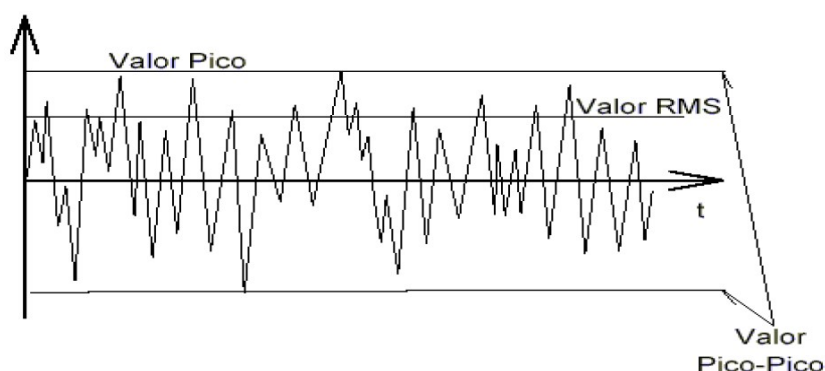
### 3.2 Conceito de vibração

Vibração é o movimento de oscilação de um corpo em torno de um ponto de referência. O número de vezes de movimento completo (ciclos) obtidos durante o período de 1 (um) segundo é chamado de frequência, que possui como unidade "hertz" (Hz). Através da análise de frequência é possível descobrir as vibrações indesejadas.

De acordo com a análise de vibrações, podemos classificá-las em vibração aleatória (aquela que não é possível prever no movimento vibratório), vibração transiente (movimento vibratório que muda de caráter, geralmente em partidas e paradas), e finalmente a vibração periódica (registra os ciclos do movimento vibratório da máquina).

Ainda sobre vibração, é relevante destacar suas grandezas físicas: amplitude, frequência e fase. Para quantificar a amplitude, podemos usar diversas medidas, tais como: pico, pico-a-pico e *root mean square* (RMS), também chamado de valor eficaz, mostrados na figura 4. O valor eficaz é uma medida estatística da magnitude de uma variável, que pode ser calculado por uma função da raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores, mostrada na equação 1.

Figura 4 - Quantificações da amplitude. Fonte: NETO, 2012.



Equação 1: Cálculo do *root mean square*(RMS).

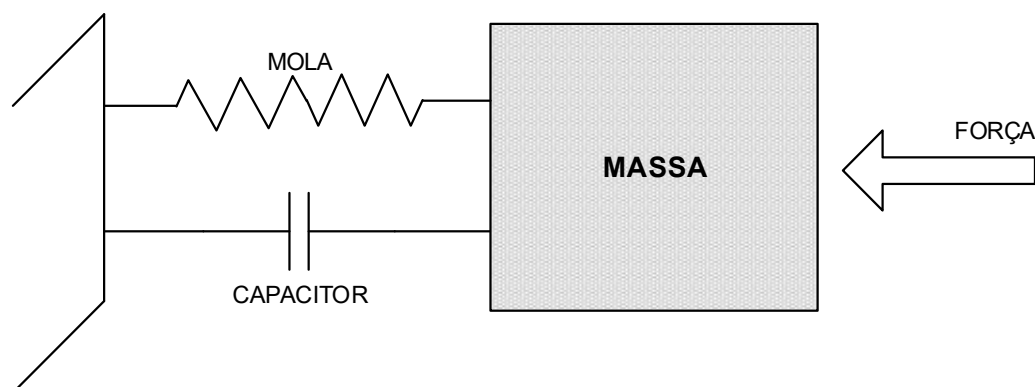
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{N}}$$

### 3.3 Acelerômetros

Os acelerômetros são sensores ou transdutores que medem acelerações. A aceleração é a taxa de variação da velocidade, ou seja, o quão rapidamente a velocidade de um corpo varia. No Sistema Internacional de Unidades (SI), sua grandeza é dada por metro por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ).

Basicamente, o acelerômetro pode ser visto como um sistema massa-mola, que se encontra no interior de um sensor, como mostra a figura 5. Sempre que este acelera, a inércia faz com que a massa resista. A força exercida pela massa é equilibrada pela mola, e, como o deslocamento da mola é proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa.

**Figura 5: Sistema massa-mola.**



Em um acelerômetro, a aceleração é geralmente medida em um ponto ao longo de um eixo sensível do acelerômetro, e pode ser obtida em uma, duas ou três direções, utilizando acelerômetros uni, bi ou triaxiais, respectivamente. A magnitude da aceleração aplicada é obtida através de instrumentos de medição ou de circuitos elétricos. O acelerômetro pode ser utilizado para medir não só acelerações dinâmicas, como também acelerações estáticas, como por exemplo: inclinação, vibração e gravidade.

Atualmente, existem vários tipos de acelerômetros. Cada um possui características únicas, vantagens e desvantagens. Os acelerômetros mecânicos mais comuns são os capacitivos, os piezelétricos e os piezoresistivos. Nos acelerômetros eletromecânicos, os dispositivos que mais se destacam são os acelerômetros que utilizam a tecnologia MEMS.

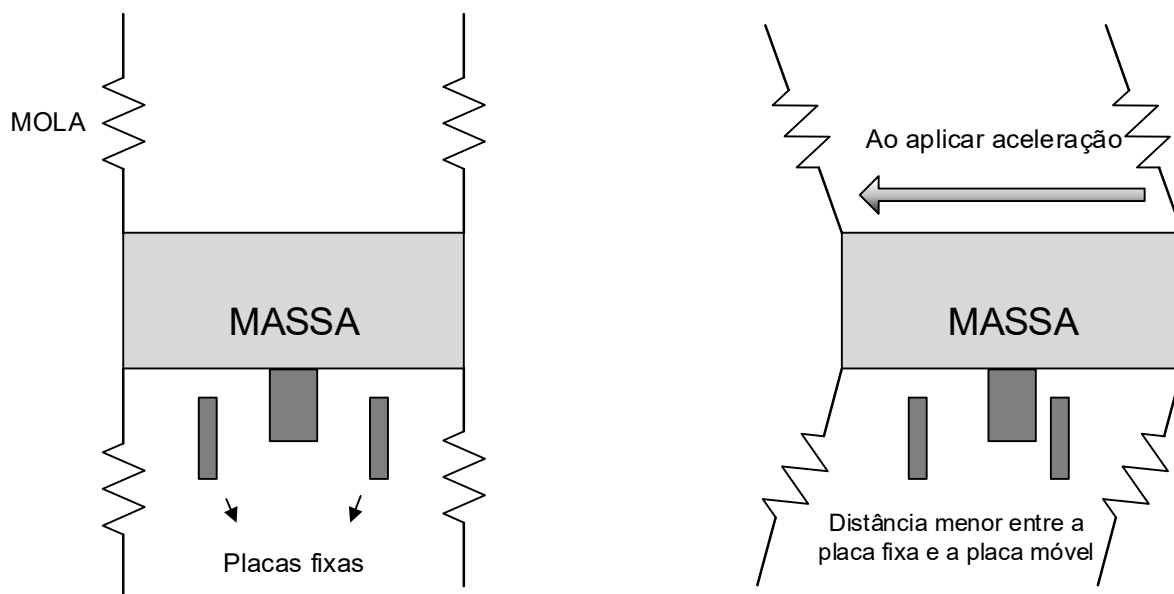
### 3.3.1 Tipos de acelerômetros

a) *Acelerômetros capacitivos*: Capacitores são componentes elétricos que armazenam carga. São constituídos por duas placas paralelas. A capacitância é dada por  $C = \epsilon \cdot A/d$ , onde  $\epsilon$  é uma constante que depende do material entre as placas,  $A$  é a área das placas e  $d$  a distância entre as placas. Os acelerômetros capacitivos possuem uma das placas do capacitor na massa (móvel) e a outra placa na estrutura de suporte (fixa).

Uma aceleração da massa provoca variações na distância  $d$  (distância entre placa fixa e placa móvel) do capacitor (figura 6), a qual é inversamente proporcional

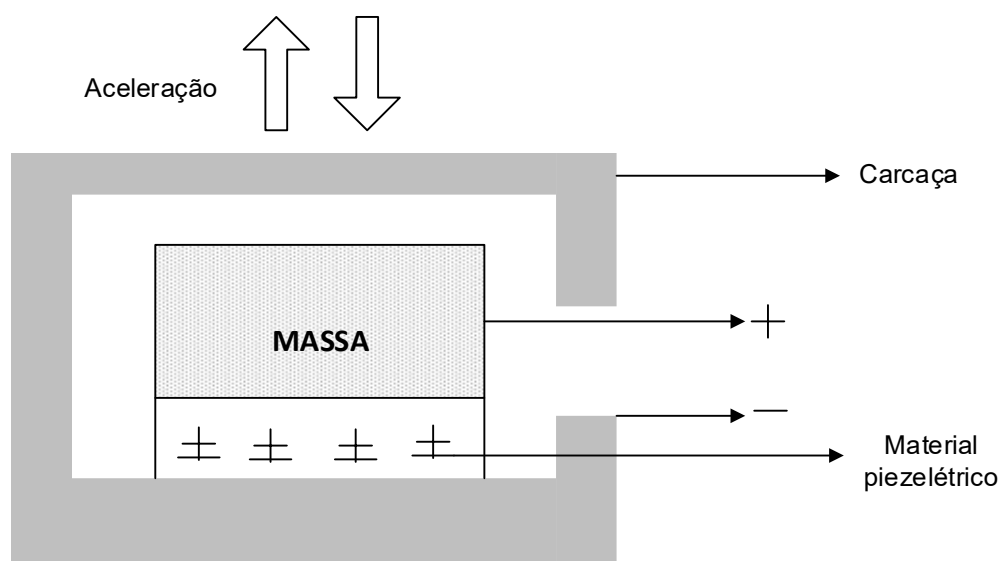
à capacitância do circuito. Como resposta à aceleração, a capacitância varia, o que faz variar o sinal da saída do circuito.

**Figura 6: Esquema de um acelerômetro capacitivo.**



*b) Acelerômetros Piezelétricos e Piezoresistivos:* Os materiais piezelétricos são cristais sintéticos ou naturais que produzem um campo elétrico quando são comprimidos ou flexionados. Nos acelerômetros piezelétricos, a massa é unida a um cristal piezelétrico. Quando a massa sofre uma vibração, o cristal piezelétrico fica submetido a forças de tração e compressão, gerando uma tensão proporcional à aceleração, como mostra a figura 7. Nos acelerômetros piezoresistivos, utiliza-se um componente piezoresistivo em substituição ao cristal piezelétrico, que, quando a massa é submetida à uma força, faz a sua resistência variar.

Figura 7: Esquema de um acelerômetro Piezelétrico.



c) *Acelerômetros MEMS*: A tecnologia *Micro-electro-mechanical Systems*, MEMS, consiste em pequenos dispositivos mecânicos e componentes de máquinas integrados que variam em tamanho, desde poucos microns até algumas centenas de microns. Geralmente transferem sinais de um domínio físico para outro, como mecânico para elétrico (O'NEAL, 1999).

Para a produção destas micromáquinas utiliza-se o Silício, material que em sua forma de cristal simples praticamente não apresenta nenhuma dissipação de energia e baixa histerese quando flexionado. Também é um material altamente adequado a movimentos repetitivos, sofrendo pouca fadiga e suportando bilhões de ciclos sem quebrar (ANALOG DEVICES, 2007).

Podem-se fabricar micromáquinas por processos de subtração de material, em que substâncias químicas reagem com seus substratos para dar a forma esperada, ou por adição, que consiste em adicionar camadas com diferentes combinações de matérias.

Os acelerômetros MEMS são produzidos há mais de 15 anos pela empresa Analog Devices. Inicialmente, eram utilizados para produção de *airbags* pela indústria automotiva, o que os tornaram menores, mais baratos e eficientes, assim o seu uso não ficou restrito à produção de *airbags* apenas. Existem acelerômetros MEMS para diversas aplicações, entre elas destacam-se as seguintes:

- Medição inercial de velocidade e posição, como exemplo o GPS;
- Medição de vibração e choque, que é o exemplo de *airbags*;

- Medição da gravidade para determinação de orientação, usado principalmente para orientação de robôs.

O acelerômetro do tipo MEMS tem seu funcionamento baseado em um sistema massa-mola e obedece a Lei de Hooke (equação 2) - onde a força associada a uma mola ideal é igual a constante de elasticidade vezes o deslocamento da massa - juntamente com a Segunda Lei de Newton (equação 3), que descreve que a força é igual a massa vezes a aceleração.

**Equação 2: Lei de Hooke**

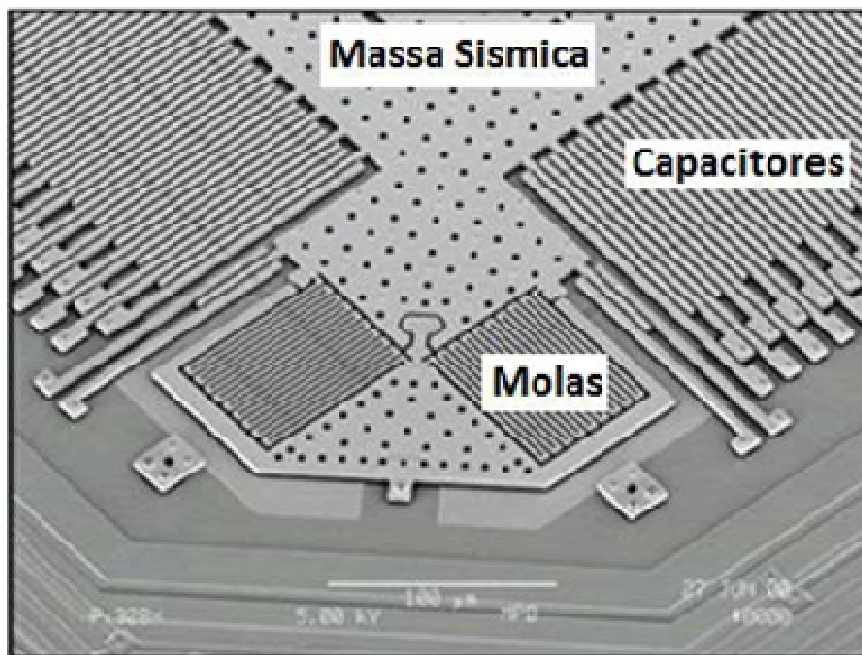
$$F = k \Delta l$$

**Equação 3: Segunda Lei de Newton**

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

No sistema massa-mola encontram-se a constante da elasticidade da mola “ $k$ ” e a massa “ $m$ ” do corpo. A frequência de ressonância do corpo é proporcional a constante da mola, e o acelerômetro deve operar em uma frequência abaixo da frequência de ressonância. Portanto, deve-se manter a constante de mola em níveis altos para manter maior resistência no sistema, e utilizar molas duplas, mostradas na figura 8, para diminuir a interferência da aceleração de um eixo em outro. Essa configuração de molas foi testada em mais de 250 G por mais de  $7 \times 10^{10}$  ciclos de repetição sem apresentar qualquer falha (ANALOG DEVICES, 2007).

Figura 8: Imagem microscópica do acelerômetro MEMS. Fonte: adaptado de Soboyejo Research Group, 2014.





## 4 DESENVOLVIMENTO PRÁTICO

Neste capítulo são descritas as considerações para o desenvolvimento do dispositivo, as características de hardware e *firmware*, suas principais funcionalidades e as características técnicas dos componentes que serão utilizados para a construção do protótipo, como por exemplo, o regulador de tensão, o acelerômetro MEMS e o microcontrolador de 8 bits.

### 4.1 Descrição geral

Para o desenvolvimento geral do equipamento, alguns aspectos foram considerados, entre eles:

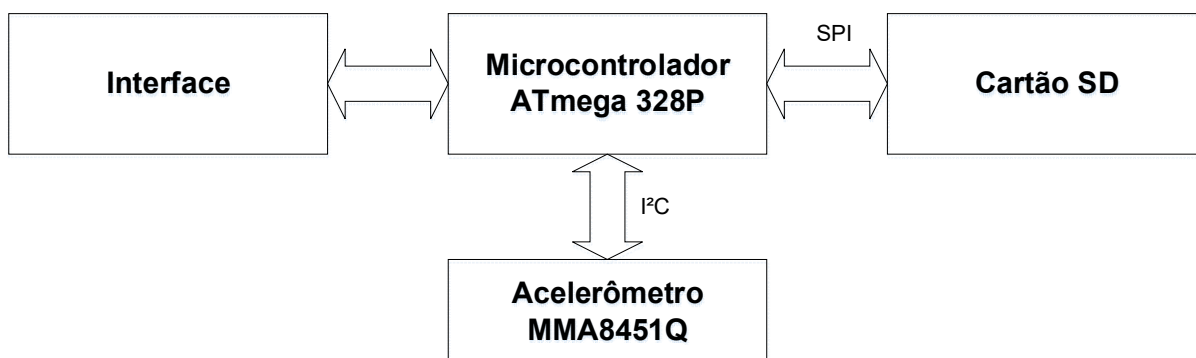
- Instalação e aquisição de dados de forma simples, sem necessidade de outros equipamentos;
- Alta resolução dos dados registrados;
- Possibilidade de operar com bateria (3 V) ou com fonte (12 V);
- Interface simples para obter dados;
- Registrar dados em um formato que possibilite a análise em qualquer computador;
- Baixo custo.

A visão geral do protótipo, como mostra a figura 9, apresenta o Acelerômetro MMA8451Q como responsável pela transdução dos dados de vibração. O microcontrolador ATmega 328P tem como principais funções ler os dados coletados pelo acelerômetro e armazená-los no cartão SD.

Os dados do acelerômetro são acessados pelo microcontrolador utilizando o protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C. Após a leitura, os dados são organizados pelo microcontrolador e realizam-se os cálculos necessários. Com os dados já trabalhados, o microcontrolador organiza estes em um vetor e, através do barramento SPI, registra os dados no cartão SD.

A Interface caracteriza-se por um botão - do tipo "push-button", que inicia e interrompe a coleta e registro de dados - e um LED, que indica o estado vigente do protótipo ou se ocorreu alguma falha durante algum processo.

Figura 9: Visão geral do protótipo.



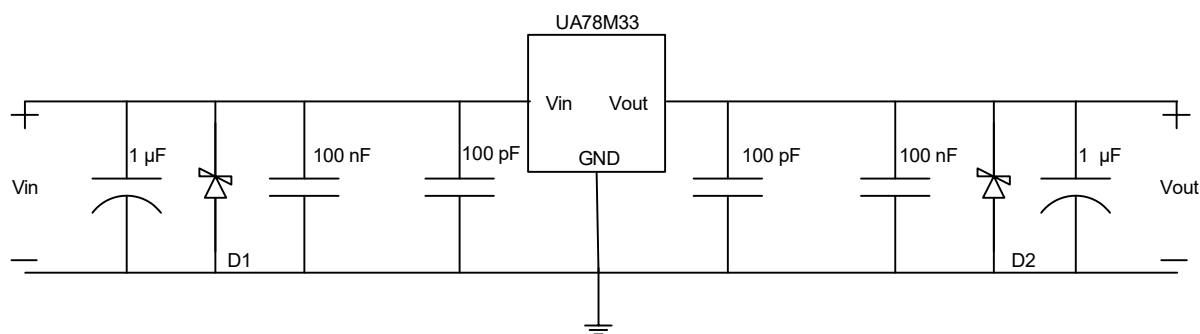
## 4.2 Circuito de alimentação

Os acelerômetros MEMS são fabricados com circuitos integrados de condicionamento de sinal, sejam estes analógicos ou digitais, e requerem uma tensão de alimentação (medida em Volts, V) para o seu funcionamento. De acordo com o manual de utilização do acelerômetro MMA8451Q, a tensão de alimentação do componente deve ser entre 1,95 e 3,6 V (FREESCALE, 2015).

Para facilitar a utilização do protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C, o microcontrolador deve estar operando no mesmo nível de tensão do acelerômetro. De acordo com as especificações (ATMEL, 2014) do microcontrolador ATmega328P, a tensão de alimentação deve ser um valor entre 1,8 e 5,5 V.

Considerando estas informações, o nível de tensão de operação do circuito do protótipo é definido pela faixa de valores de 2,7 - 3,6 V. Para garantir o nível de tensão adequado do circuito, o protótipo utiliza o Regulador de Tensão UA78M33, que mantém a tensão de saída ( $V_{out}$ ) no valor de 3,3 V, fixo. O regulador permite valores de tensão de entrada ( $V_{in}$ ) que variem entre 5,3 e 25 V e fornece uma corrente de saída de até 500 mA (TEXAS INSTRUMENTS, 2015). A visão geral do circuito pode ser observada pela figura 10:

**Figura 10. Circuito de alimentação**



Os capacitores cerâmicos (de 100 pF e 100 nF) e os capacitores eletrolíticos (de 1 µF) são utilizados na entrada e na saída do regulador de tensão para evitar oscilações e ruídos no nível de tensão adequado do circuito. Também são utilizados dois diodos do tipo Zener, o D1 - de 25 V, que serve como proteção para a entrada do regulador - e o D2 - de 3,6 V, que protege os demais componentes do circuito -.

Além do circuito regulador de tensão, o *data logger* também permite que a alimentação do circuito seja feita utilizando uma bateria do modelo CR2032, de 3 V.

A opção de utilizar a bateria facilita o uso do protótipo em determinadas aplicações, porém, a baixa capacidade de baterias desse tipo não permite a utilização do protótipo por longos períodos.

### 4.3 Microcontrolador – ATmega328P

Um microcontrolador é um circuito integrado capaz de executar as funções específicas, programadas e gravadas na sua memória. Basicamente, o microcontrolador é um computador simplificado em um único circuito integrado, que controla processos lógicos previamente definidos pelo programa em sua memória, como, por exemplo, o acionamento de LEDs, relés, sensores e displays LCDs.

Devido ao tamanho, consumo de energia e custo reduzidos, são amplamente utilizados em automação e controle de produtos e periféricos como, por exemplo, sistemas de injeção eletrônica em automóveis, controles remotos, fechaduras eletrônicas, alarmes, brinquedos e controle de máquinas pequenas.

Os microcontroladores possuem internamente uma ULA (Unidade Lógica e Aritmética), mas se diferenciam dos microprocessadores de uso geral, pois integram elementos adicionais em sua estrutura interna, como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados, memória somente de leitura para armazenamento

de programas, EEPROM para armazenamento permanente de dados, portas de entrada e saída de dados e dispositivos periféricos como conversores analógico/digitais.

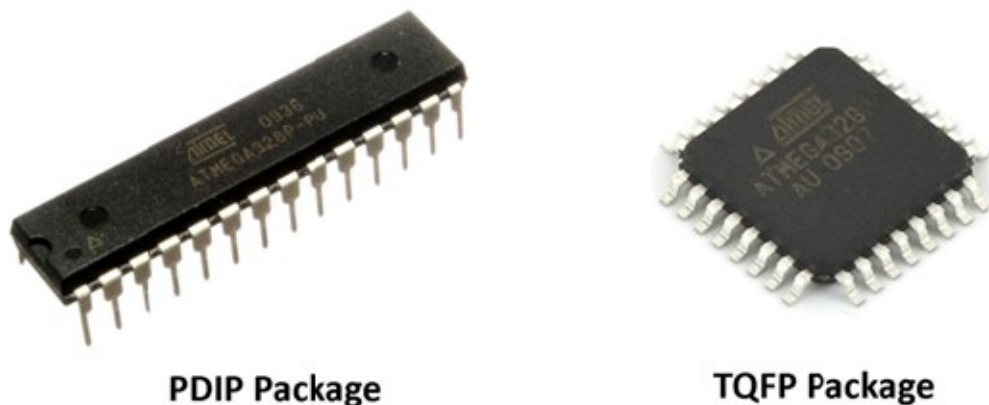
O microcontrolador utilizado para o desenvolvimento deste projeto é o AVR ATmega328P. Os chips da família AVR são desenvolvidos pela empresa Atmel, que oferecem facilidade de uso, baixo custo e baixo consumo de energia. Possuem memória flash, EEPROM e SRAM integradas em um único chip e interfaces que podem ser utilizadas para conectar ou comunicar com outros dispositivos. São otimizados para códigos de programação em C e Assembly, sendo que as instruções de programas são armazenadas em memórias flash não voláteis.

O ATmega328P foi selecionado para este projeto em razão das suas seguintes características:

- Memória flash para programação de 32 kB;
- Memória EEPROM de 1 kB;
- Memória SRAM de 2 kB;
- Compatível com Programação ISP;
- 8 Canais de ADC (Conversor Analógico/Digital);
- Interface serial SPI;
- Compatível com protocolo I<sup>2</sup>C;
- Tensão de operação: 1,8-5,5 V.

Neste protótipo, pode-se destacar a principal característica do microcontrolador a sua memória SRAM de 2 kB, pois a biblioteca do *firmware* responsável pelas funções de armazenar os dados no cartão SD exige um valor de SRAM maior que 1 kB. A figura 11 apresenta os dois tipos de encapsulamentos do ATmega328 utilizados neste trabalho.

Figura 11: Tipos de encapsulamentos utilizados no desenvolvimento do protótipo.



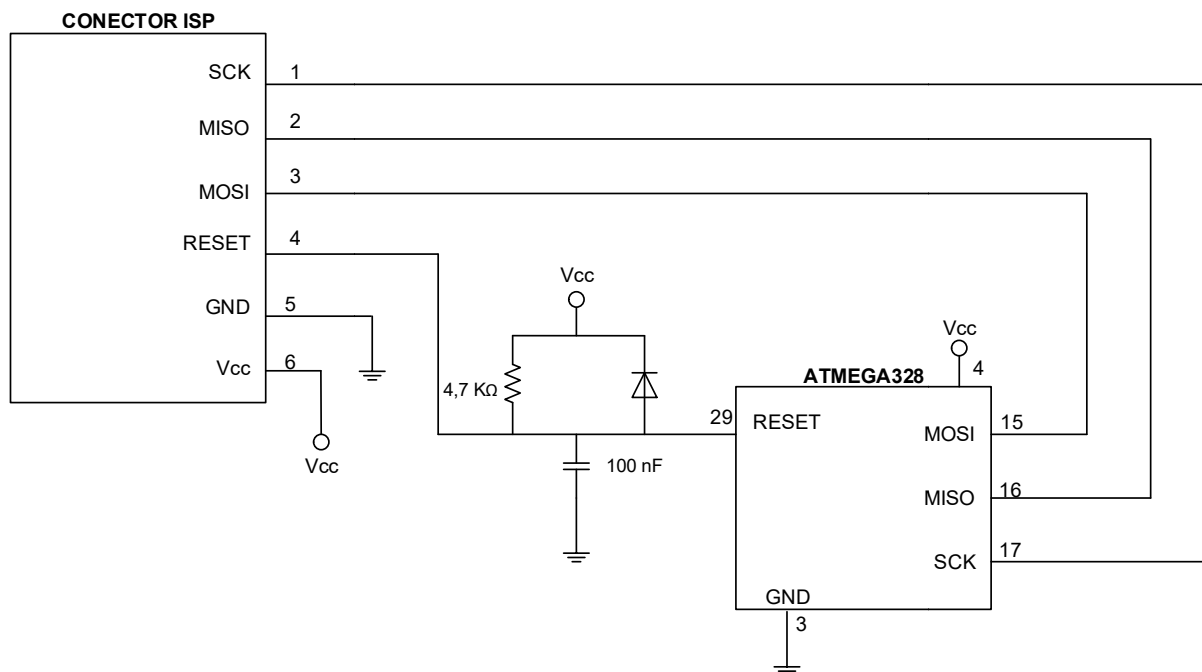
#### 4.3.1 Programação ISP

A sigla ISP significa "In-System Programming", ou seja, programação "no sistema". Refere-se à característica que alguns dispositivos lógicos programáveis, como microcontroladores, possam ser programados enquanto estão instalados em um sistema completo, ao contrário de programar o chip e depois colocá-lo no sistema. Essa característica é bastante útil, pois permite atualizar o programa de um microcontrolador que já esteja soldado em uma placa de desenvolvimento ou aplicação.

A programação via ISP pode ser realizada através de canais seriais do microcontrolador de duas formas: Via Rx e Tx da interface serial RS232 ou via Interface SPI (Serial Peripheral Interface), que será o método utilizado neste projeto.

A figura 12 mostra as conexões necessárias para utilizar a programação ISP via Interface SPI:

**Figura 12: Circuito de programação.**



A ferramenta utilizada para programar o microcontrolador é o Programador AVRISP mkII (figura 13), que conecta-se ao PC através de USB e utiliza o software AVR Studio para programar o microcontrolador. Entre outras vantagens, pode-se citar que o AVRISP mkII possui compatibilidade com praticamente todos os chips da família AVR e é alimentado pela conexão USB, não necessitando de nenhuma alimentação externa.

**Figura 13: Programador AVRISP mkII.**



#### 4.4 Acelerômetro – MMA8451Q

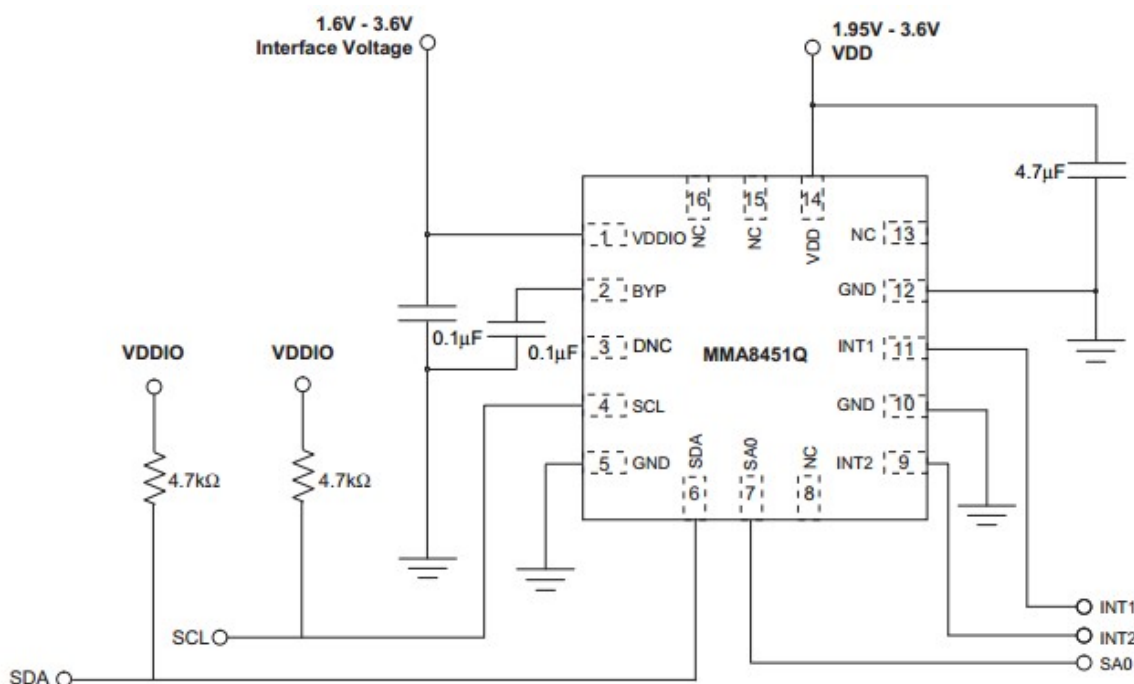
O acelerômetro é um transdutor que obtém dados de vibração, convertendo-os em dados digitais. Pode-se dizer que o acelerômetro é o componente mais importante do protótipo, pois é o responsável pela coleta dos dados de vibração.

O MMA8451Q é um acelerômetro digital do tipo MEMS, desenvolvido pela empresa Freescale. Este componente foi selecionado para o desenvolvimento deste projeto, pois possui as seguintes características:

- Baixo consumo: < 1 mA;
- Triaxial, detecta acelerações nos três eixos (X, Y e Z);
- Dados com 14 bits de resolução;
- Taxa de dados de 1,56 a 800 Hz;
- Tensão de alimentação: 1,95 a 3,6 V;
- Compatível com protocolo I<sup>2</sup>C;
- Escala de medição selecionável  $\pm 2G/\pm 4G/\pm 8G$ .

Para o presente protótipo, pode-se considerar como características mais importantes a resolução de 14 bits, pois permite uma precisão maior na leitura dos dados e também a escala de medição selecionável, que permite medições de picos de até  $\pm 8G$ , se necessário. A figura 14 mostra o circuito de conexão do acelerômetro, recomendado pelo manual de utilização do componente:

Figura 14: Circuito do Acelerômetro MMA8451Q. Fonte: FREESCALE, 2015.

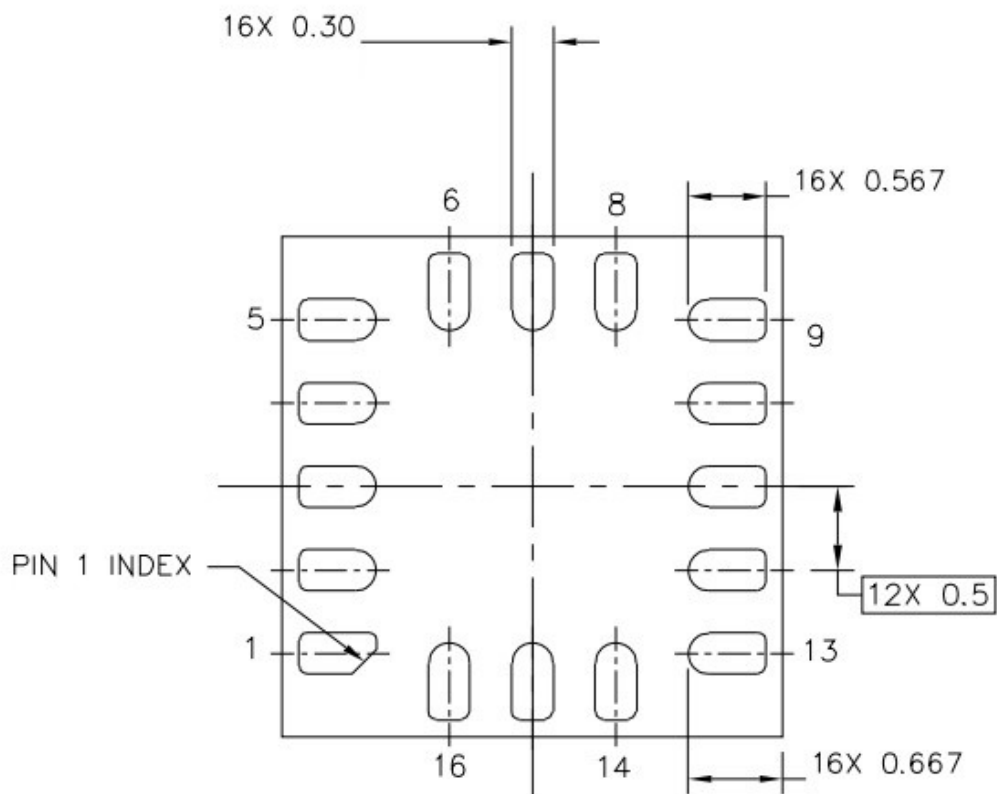


Uma dificuldade encontrada ao utilizar o acelerômetro MMA8451Q foi soldar o componente na placa de circuito impresso, pois é disponibilizado apenas com o encapsulamento *Quad Flat No leads* (QFN), com medidas de 3 x 3 x 1 mm e 16 pinos. Os terminais do encapsulamento QFN ficam na parte inferior do componente, conforme mostra a figura 15, o que dificulta o trabalho de soldar o componente na placa, pois para o desenvolvimento do protótipo foi utilizado apenas um ferro de solda para a montagem.

Devido ao seu tamanho reduzido, normalmente são utilizadas máquinas específicas para soldar esse tipo de componente que posicionam e fixam o componente no lugar adequado. A utilização de máquinas específicas para soldar o componente evita que o mesmo fique inclinado na placa devido ao excesso de estanho, assim minimizando possíveis erros na medição.



Figura 15: Encapsulamento QFN-16. Fonte: FREESCALE, 2015.

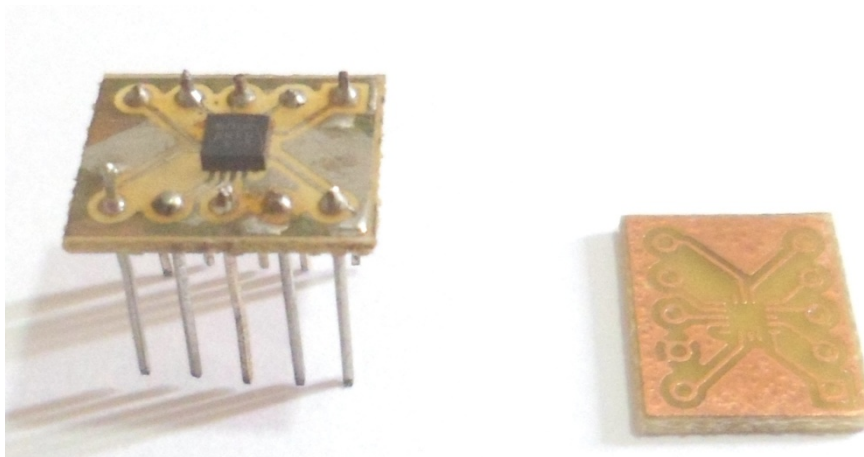


A figura 16 apresenta o acelerômetro utilizado, comparando seu tamanho à uma moeda de 1 real, e a figura 17 mostra a PCI desenvolvida exclusivamente para os testes utilizando a *proto-board*.

Figura 16: Acelerômetro comparado a uma moeda.



Figura 17: PCI desenvolvida para adaptar o acelerômetro à *protoboard*.

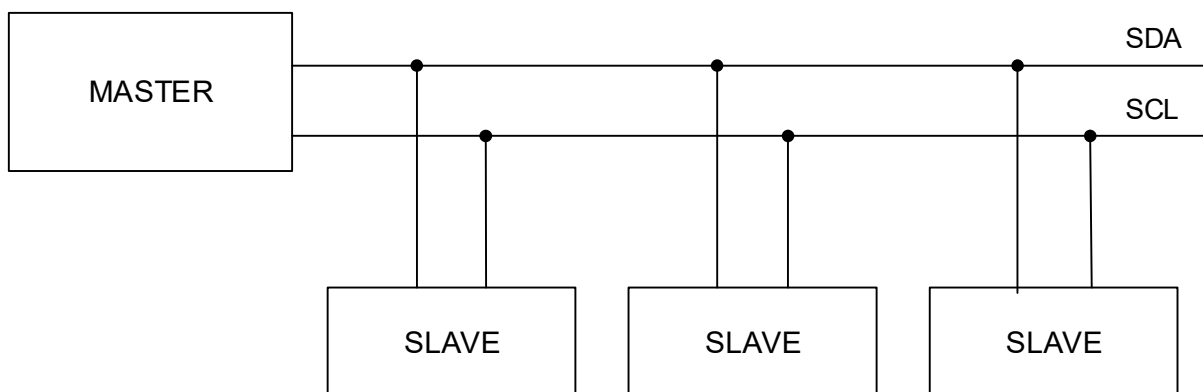


#### 4.4.1 Protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C

O I<sup>2</sup>C (Inter-Integrated Circuit) é um protocolo de comunicação desenvolvido pela Philips que é usado para conectar periféricos de baixa velocidade a uma placa mãe ou a um sistema embarcado. O nome significa “Circuito Inter-integrado” e pronuncia-se “I ao quadrado C” ou “I dois C”.

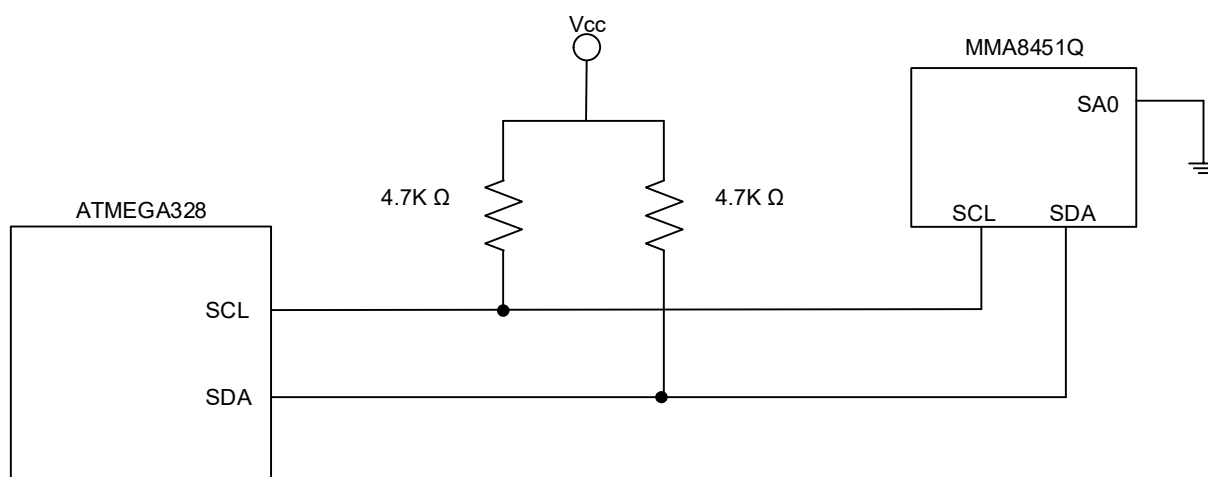
O protocolo I<sup>2</sup>C tem dois tipos de dispositivos: Master e Slave. Onde o Master, é a unidade de controle responsável por coordenar todos os periféricos, chamados de Slaves. O I<sup>2</sup>C utiliza apenas duas linhas para comunicação, conforme mostra a figura 18: uma com o *signal de clock* - SCL (Serial Clock), que é controlado pelo master; e outro de dados - SDA (Serial Data), bidirecional.

Figura 18: Linhas de comunicação I<sup>2</sup>C.



No presente projeto, o protocolo de comunicação I<sup>2</sup>C é utilizado na comunicação entre o Microcontrolador ATmega328 e o Acelerômetro MMA8451Q. A figura 19 mostra o esquemático do circuito de comunicação, os resistores de *pull-up* foram adicionados às linhas SDA e SCL de acordo com os valores recomendados nas especificações do Acelerômetro MMA8451Q.

**Figura 19: Circuito do barramento I<sup>2</sup>C.**



#### 4.5 Armazenamento de dados

O cartão SD tem dimensões de 24 x 32 x 2,1 mm; a sigla SD significa *Secure Digital* por conter capacidade de criptografia e gestão de direitos autorais - é um cartão de design fino e compacto, de fácil manuseio, podendo ser usado pelos usuários em diferentes aparelhos (figura 20). Os dados podem ser regravados várias vezes e não necessitam de eletricidade para manterem-se armazenados. Além disso, os cartões SD possuem uma trava que impede alterações ou a própria exclusão acidental de informações.

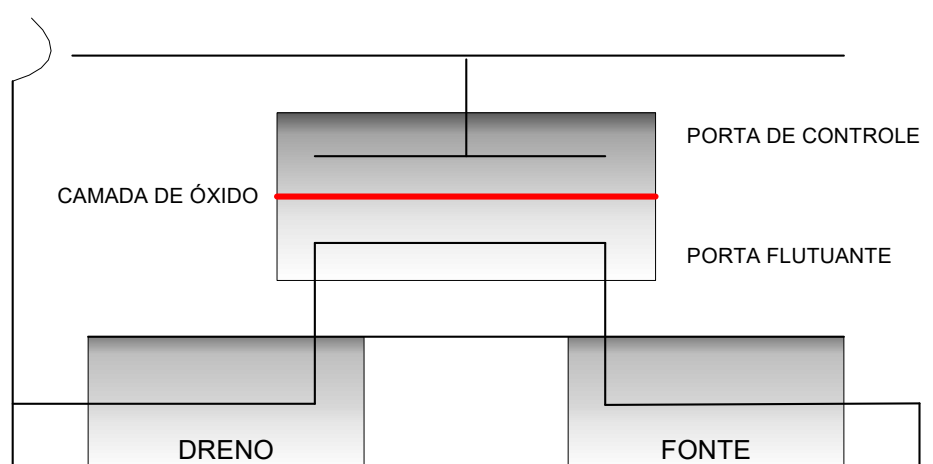
Figura 20: Cartão micro SD e adaptador utilizados no protótipo.



Esses cartões utilizam memória flash, gerando assim equipamentos mais resistentes a impactos, mais velozes na transferência de dados e com maior durabilidade.

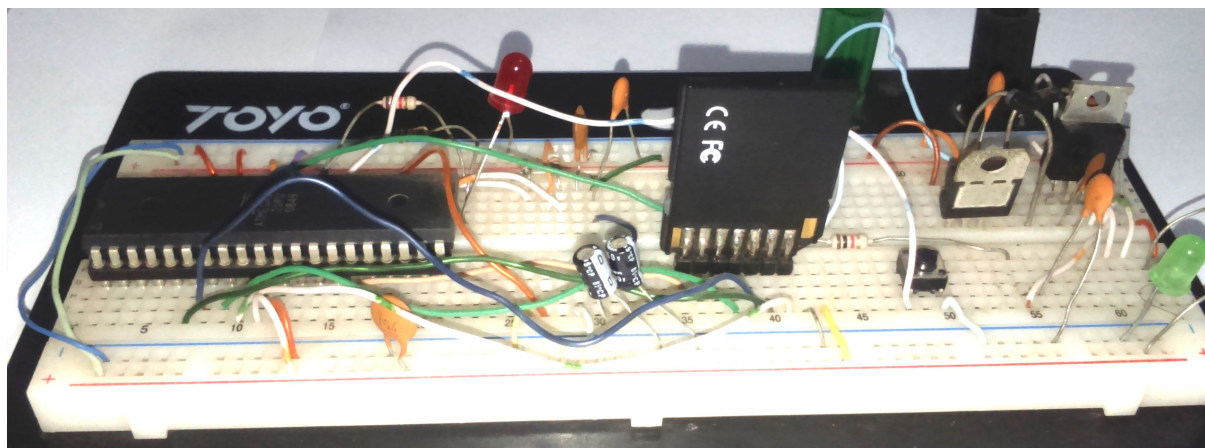
O sistema conta com dois transistores separados por uma fina camada de óxido de silício. Um dos lados funciona como uma porta de controle, ativando as células da memória e fazendo a leitura de dados. Já o outro é uma espécie de porta flutuante, armazenando as informações. A corrente elétrica passa de um lado para outro e uma tensão aplicada na porta de controle puxa os elétrons para a porta flutuante, como mostra a figura 21. Esse processo todo é bastante durável: estima-se que um dispositivo possa ser regravado pelo menos 100 mil vezes.

Figura 21: Esquema de memória Flash.



No protótipo os dados da vibração, coletados pelo acelerômetro, são armazenados no cartão SD. Os dados são enviados pelo microcontrolador para o cartão SD através do protocolo de comunicação SPI. Para utilizar o cartão SD na *protoboard*, modificou-se o adaptador do cartão, de maneira que este se conecte aos contatos, conforme mostra a figura 22.

**Figura 22: Cartão SD adaptado para a *protoboard*.**



Foram testados cinco cartões de diferentes capacidades: três cartões do tipo SD, sendo um de 512 Mb, um de 1 Gb e outro de 2 Gb; e dois cartões do tipo SDHC (Secure Digital High-Capacity), que são cartões do tipo SD com maior capacidade de armazenamento, um de 4 Gb e outro de 8 Gb.

O protótipo funcionou normalmente utilizando os cartões de 512 Mb, 1 Gb e 2 Gb. Porém, o protótipo apresentou incompatibilidade com cartões do tipo SDHC de 4 Gb e 8 Gb que, quando utilizados, este indicou erro na inicialização do cartão.

#### **4.5.1 Protocolo de comunicação SPI**

O *Serial Peripheral Interface* (SPI) foi desenvolvido originalmente pela Motorola, mas devido a simplicidade e popularidade do protocolo, muitos outros fabricantes adotaram o padrão ao longo dos anos. Atualmente, o protocolo SPI é encontrado em uma grande variedade de componentes usados em projetos de sistemas embarcados. O SPI é amplamente utilizado em microcontroladores para controlar seus dispositivos periféricos imediatos.

Assim como na comunicação I<sup>2</sup>C, os dispositivos são classificados em dois

tipos: o *Master*, responsável por iniciar a transferência e gerar *sinais de clock* e de controle, e *Slave*, que é o dispositivo controlado pelo *Master*.

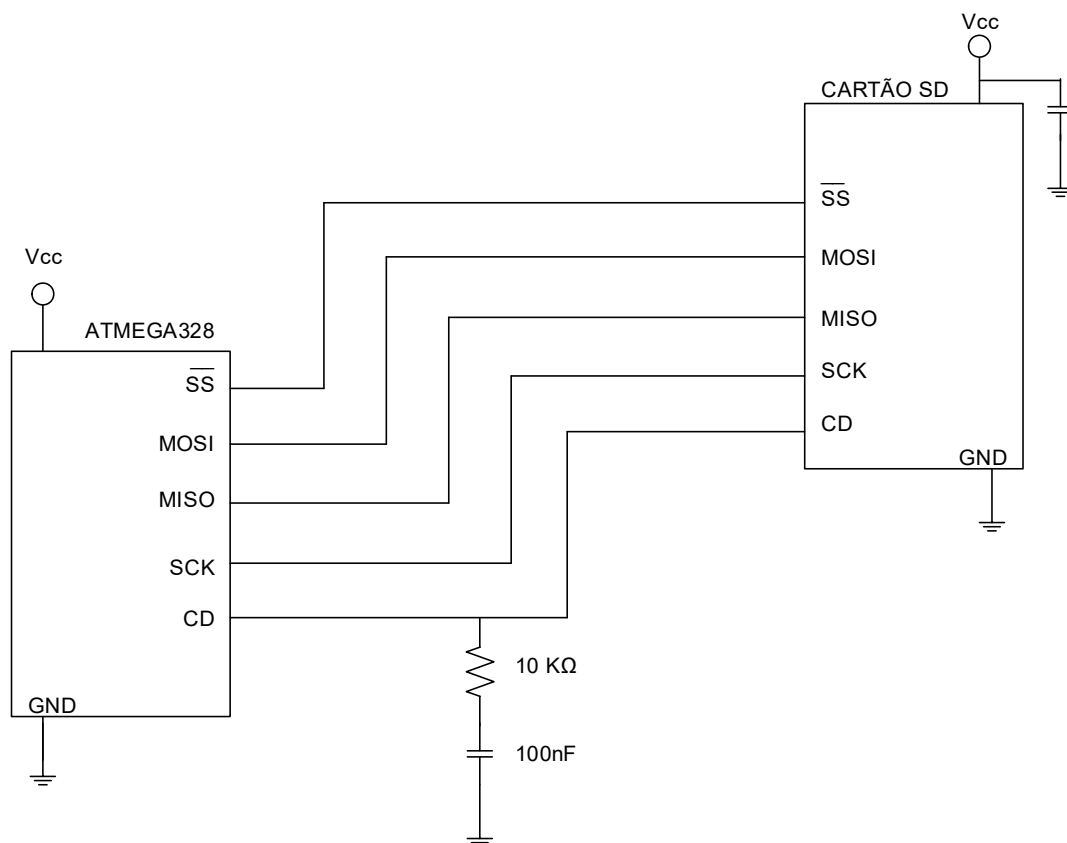
O barramento SPI consiste em três linhas de transmissão de informações de 8 bits:

- SCK (Serial Clock): *Sinal de clock*, gerado pelo *Master*, responsável por sincronizar a transferência de dados.
- MOSI (*Master Out Slave In*): transporta os dados do *Master* para *Slave*.
- MISO (*Master In Slave Out*): transporta os dados do *Slave* para *Master*.

O barramento SPI é do tipo *Full-duplex*, que é um modo de operação onde dados podem ser transmitidos e recebidos.

No presente projeto, o protocolo de comunicação SPI é utilizado na comunicação entre o Microcontrolador ATmega328 e o cartão de memória SD. A figura 23 abaixo mostra o esquemático do circuito de comunicação:

**Figura 23: Protocolo SPI.**



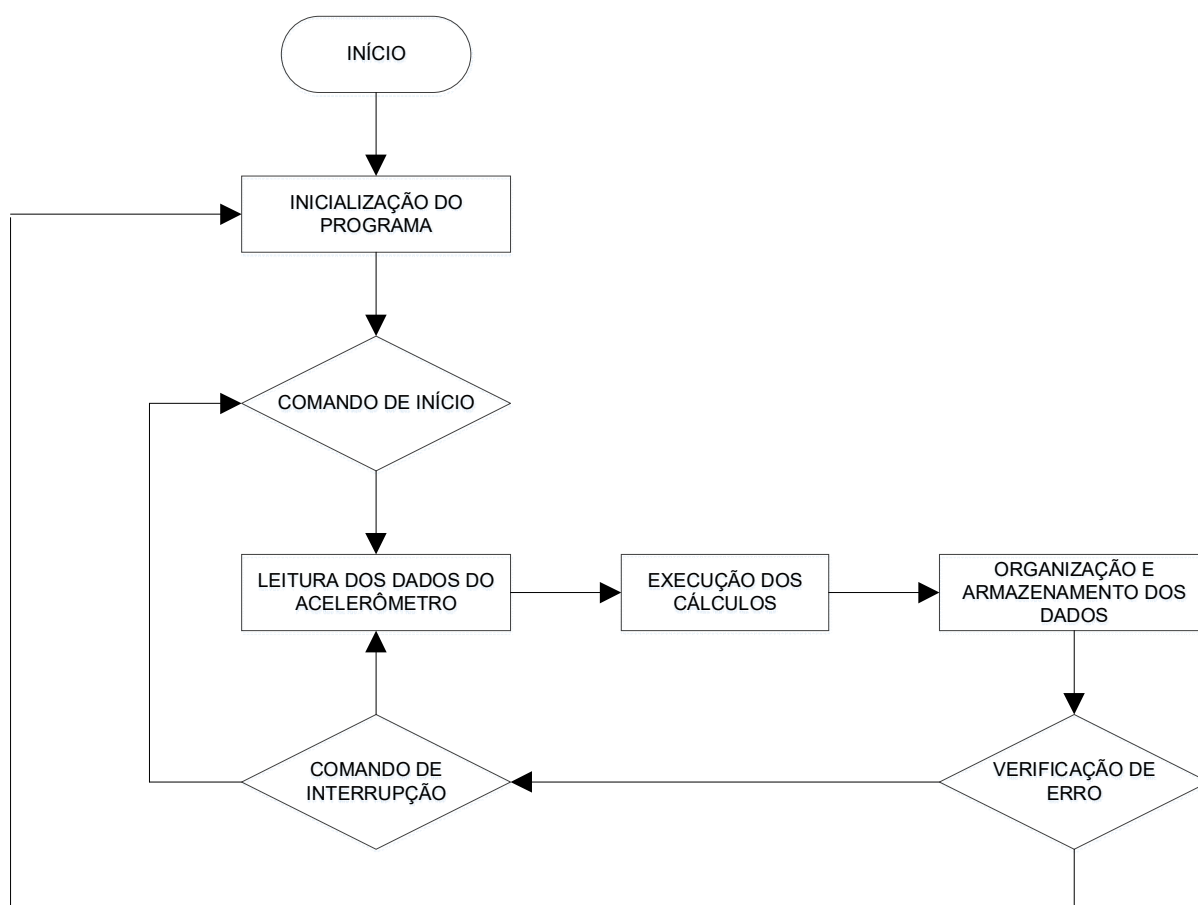
As linhas SCK, MOSI e MISO, são as linhas do barramento SPI, responsáveis pela comunicação. A conexão denominada CD é a *Card detect*, utilizada pelo microcontrolador para determinar se um cartão SD está inserido no soquete, quando o cartão SD é inserido, CD tem valor lógico 0 (zero). O resistor de 10 k $\Omega$  e o capacitor de 100 nF foram adicionados para evitar que o valor seja interpretado incorretamente pelo microcontrolador, devido a oscilações ou ruídos.

#### **4.6 Firmware**

O *firmware* é o conjunto de instruções que são programadas diretamente no hardware do dispositivo, no caso, do Microcontrolador ATmega328P. As instruções são armazenadas no circuito integrado utilizando a memória flash e a EEPROM.

O código do programa foi desenvolvido em linguagem de programação C. A linguagem C está entre as linguagens de programação mais populares, por ser simples, com diversas funções matemáticas e com um conjunto de bibliotecas padronizado. Seus pontos fortes são o acesso à memória de baixo nível e baixos requerimentos de hardware. (SCHILDT, HERBERT. 1997). A figura 24 apresenta o fluxograma simplificado do código do programa:

Figura 24: Fluxograma do código.



O código completo do programa é apresentado no Anexo I. As seguintes bibliotecas descritas abaixo são utilizadas pelo programa do data logger:

- `<mega328.h>`, inclui as configurações básicas do microcontrolador ATmega328P;
- `<ff.h>`, responsável por funções relacionadas ao cartão SD, como por exemplo:
  - `f_mount`: inicializa o cartão SD, quando o mesmo é inserido;
  - `f_open`: abre/cria arquivo para ser utilizado no cartão SD;
  - `f_write`: escreve dados no arquivo aberto anteriormente;
  - `f_close`: fecha arquivo aberto anteriormente.
- `<i2c.h>`, responsável por funções utilizadas na comunicação I<sup>2</sup>C, como por exemplo: `i2c_read` – utilizada para leitura dos dados



do acelerômetro - e *i2c\_write* – utilizada para configurar o acelerômetro;

- *<delay.h>*, utilizada para funções que causam atraso, ou espera, de tempo na execução do programa;
- *<string.h>*, utilizada para funções de manipulação de *strings*;
- *<stdio.h>*, responsável por funções de entrada e saída de dados (funções *printf* e *scanf*, por exemplo);
- *<stdlib.h>*, funções que convertem *strings* para números, gerenciamento de alocação dinâmica na memória, entre outras.

#### 4.6.1 Interface

A interface do protótipo consiste em um botão e um LED de indicação, conforme explicado anteriormente.

Quando o *data logger* é iniciado (energizado), o LED aciona-se. Quando o cartão SD é inserido, o LED desliga-se. Se o dispositivo não estiver pronto para registrar os dados, o LED permanecerá ligado ou, se alguma falha ocorrer, o LED começará a piscar. Para iniciar o registro de dados, a seguinte sequência de passos deve ser seguida:

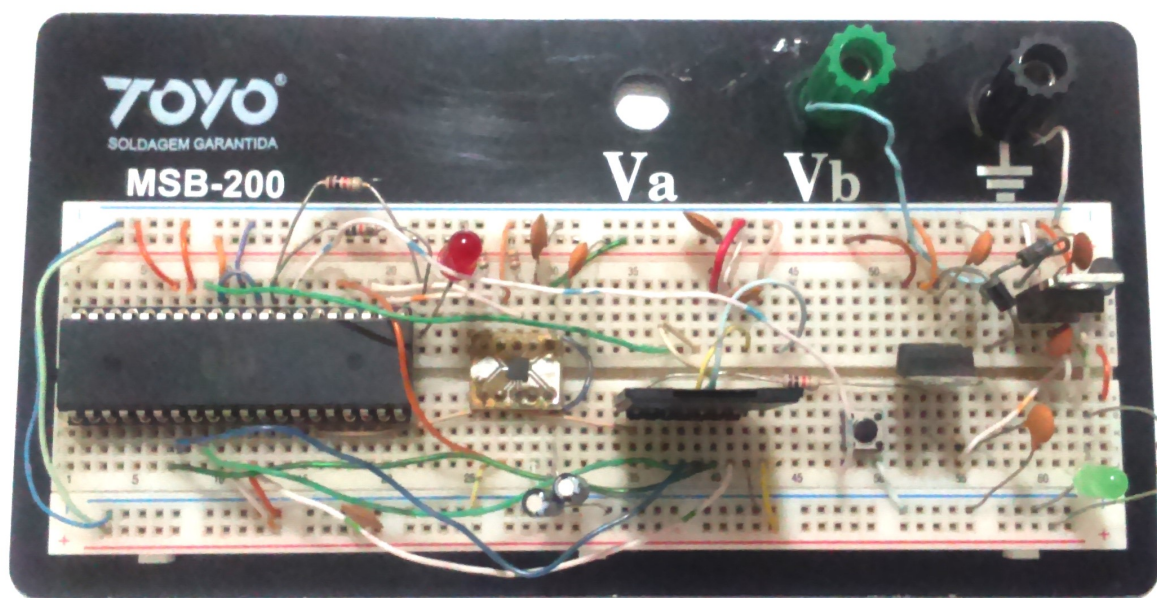
- 1) Inserir o cartão SD: o LED desliga-se, indicando que o dispositivo está pronto para registrar dados.
- 2) Pressionar o Botão: O LED piscará, indicando o início do registro de dados.
- 3) Duração do registro: Enquanto estiver registrando dados, o LED piscará intermitentemente.
- 4) Finalização do registro: Para finalizar o registro, o botão é pressionado novamente. O LED se desligará, indicando que o *data logger* foi desligado.
- 5) Após registrar os dados, o dispositivo fica pronto para iniciar um novo registro.

Cada vez que um novo registro for iniciado, um novo arquivo é criado no cartão SD, seguindo a seguinte ordem: de "dados0.csv" a "dados9.csv" e "dadosA.csv" a "dadosZ.csv". O dispositivo não sobrescreve os registros, se um arquivo com mesmo nome já existe no cartão SD o protótipo indica um erro através do LED.

#### 4.7 Montagem do Protótipo

Inicialmente o protótipo foi desenvolvido utilizando uma *protoboard*, como mostra a figura 25. Os componentes principais utilizados no projeto foram basicamente os mesmos, diferenciando-se apenas pelo encapsulamento. Para alguns componentes, algumas modificações foram necessárias: no cartão SD, um conector foi adaptado para encaixar na *protoboard*, e no acelerômetro, que não possui encapsulamento compatível com a *protoboard*. Uma PCI de dimensões reduzidas foi desenvolvida para a utilização deste componente no protótipo.

Figura 25: Protótipo na *protoboard*.



Após a validação e os testes básicos dos circuitos e componentes, inicia-se a etapa de confecção da placa de circuito impresso (PCI) do protótipo. A necessidade da confecção da PCI ocorre pela necessidade de facilitar o acesso aos pontos de medição devido ao tamanho reduzido.

A PCI do protótipo foi elaborada utilizando a ferramenta OrCAD, que é um conjunto de softwares destinados, principalmente, ao desenvolvimento de esquemáticos elétricos, simulação e projeto de placas de circuito impresso. Estão inclusos no OrCAD os softwares “OrCAD Capture” - que cria e edita esquemáticos, “OrCAD PSpice” (utilizado para simulação de circuitos) e “OrCAD PCB Designer”, utilizado para o projeto do *layout* de PCIs.

A placa de circuito impresso desenvolvida para este trabalho tem dimensões aproximadas de 50 x 50 mm e é de duas camadas (*Dual Layer*). As figuras 26 e 27 apresentam o *layout* das camadas superior e inferior da PCI do protótipo, respectivamente.

Figura 26: *Layout* da camada superior da PCI.

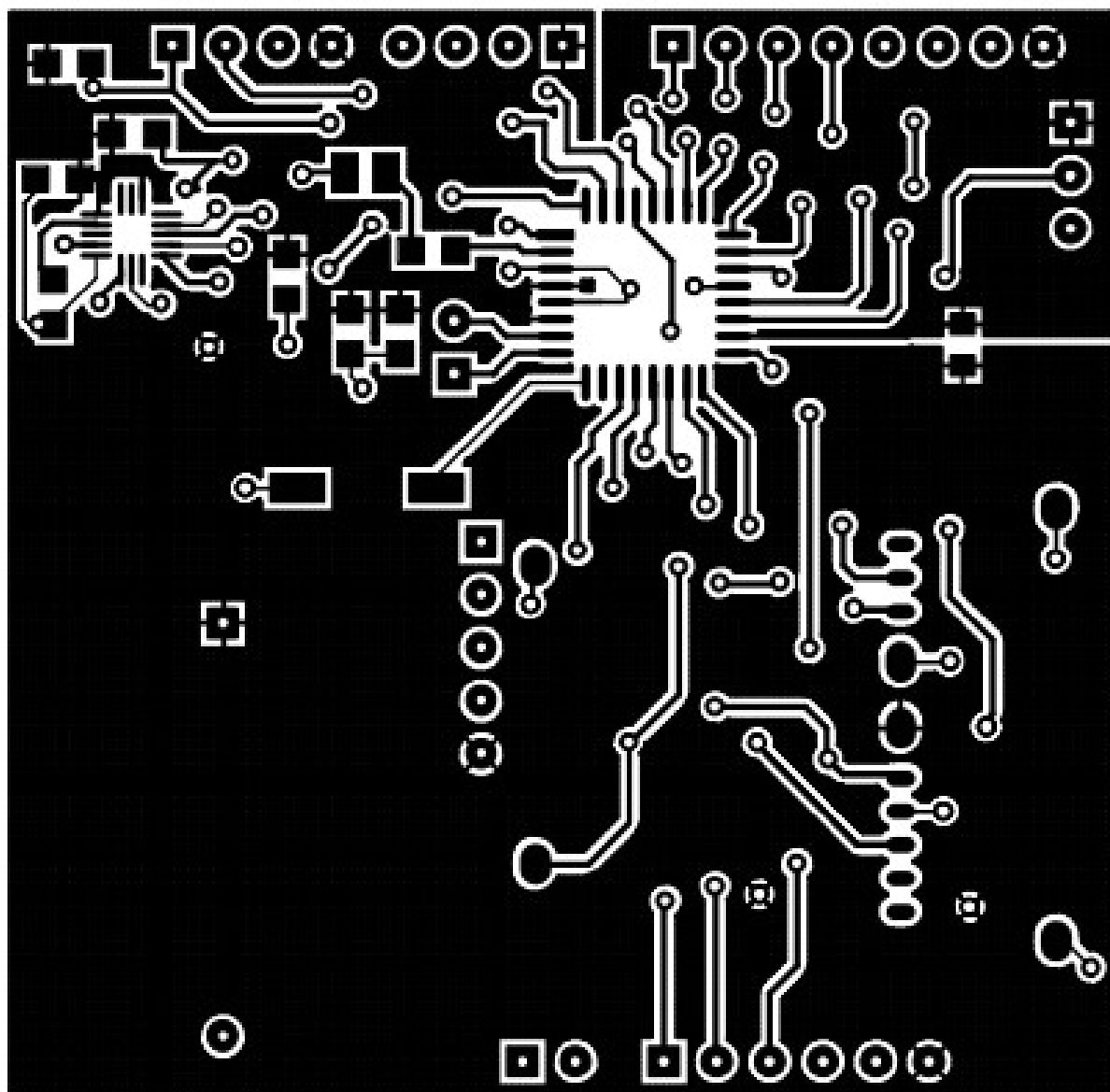
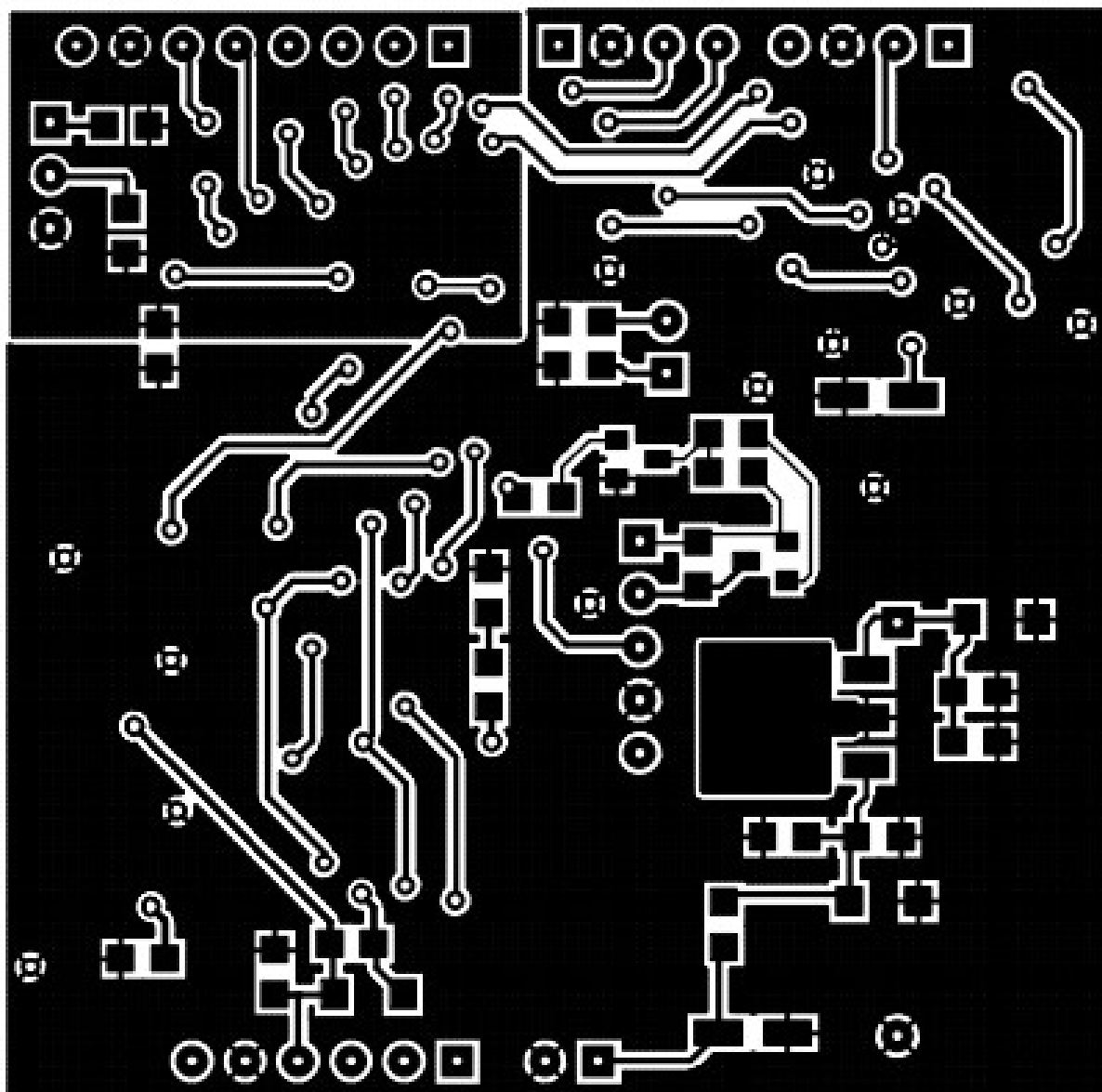
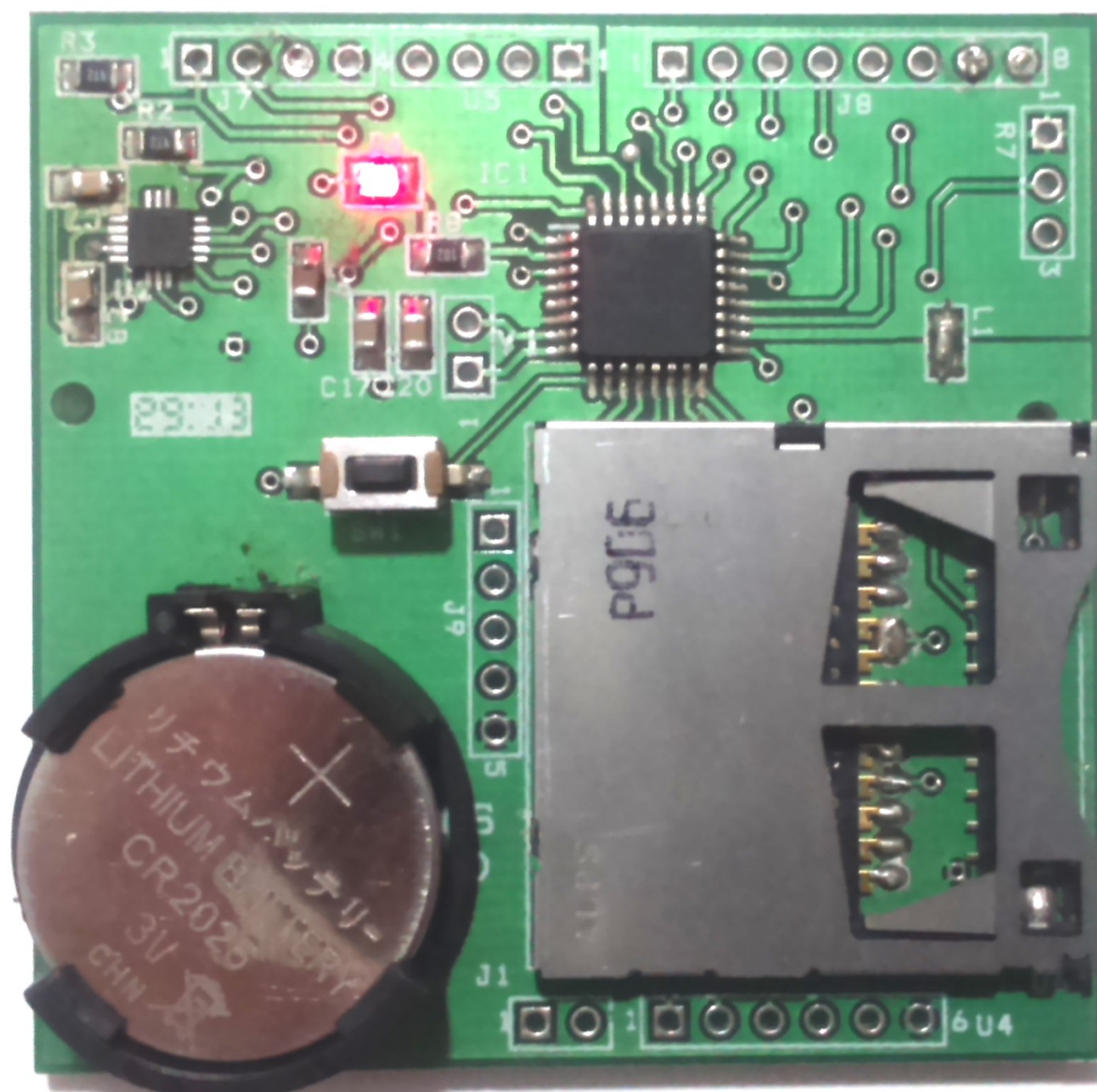


Figura 27: *Layout* da camada inferior da PCI.



Após o desenvolvimento da placa utilizando o software OrCAD, os *layouts* são enviados a uma empresa especializada em fabricação de PCIs, para a confecção das placas. A figura 28 mostra a PCI, já com os componentes soldados.

Figura 28: PCI do data logger.



#### 4.8 Estimativa de custo do Protótipo

Para estimar o custo geral do protótipo desenvolvido neste trabalho, somaram-se os custos por componente, adquiridos da empresa Mouser Components, juntamente com o custo da placa de circuito impresso, fabricada através da empresa Griffus (como mostra a tabela 6), chegando ao valor total de R\$ 87,32, levando em consideração a cotação do dólar a R\$ 3,688 no dia em que realizou-se esta estimativa (01/09/2015).

Observa-se que 30% do valor geral do protótipo são impostos de importação, assim, quando estes são desconsiderados, encontramos um valor total de R\$61,124.

Os valores de bateria, fonte de alimentação CC, cartão SD e montagem de protótipo não estão inclusos nesta estimativa.

**Tabela 06: Estimativa de custo do *data logger*.**

Componente	Quantidade	Preço unitário	Imposto de Importação	Valor Total
Capacitor Eletrolítico SMD 1 uF	2	US\$ 0,097	R\$ 0,715	R\$ 1,36
Capacitor Cerâmico 0805 100 pF	2	US\$ 0,016	R\$ 0,118	R\$ 0,22
Capacitor Cerâmico 0805 100 nF	10	US\$ 0,012	R\$ 0,443	R\$ 0,84
Capacitor Cerâmico 0805 4.7 uF	1	US\$ 0,040	R\$ 0,148	R\$ 0,28
Diodo Zener SMD 25 V	1	US\$ 0,029	R\$ 0,107	R\$ 0,20
Diodo Zener SMD 3,6 V	1	US\$ 0,029	R\$ 0,107	R\$ 0,20
Diodo SMD	1	US\$ 0,040	R\$ 0,148	R\$ 0,28
Led SMD (Vermelho)	1	US\$ 0,074	R\$ 0,273	R\$ 0,52
ATMega328P - TQFP32	1	US\$ 2,310	R\$ 8,519	R\$ 16,19
Varistor 0805 16 V	1	US\$ 0,268	R\$ 0,988	R\$ 1,88
Resistor 0805 4.7 kΩ	6	US\$ 0,016	R\$ 0,354	R\$ 0,67
Resistor 0805 270 kΩ	1	US\$ 0,023	R\$ 0,085	R\$ 0,16
Resistor 0805 10 kΩ	1	US\$ 0,020	R\$ 0,074	R\$ 0,14
<i>Push-button</i> SMD	1	US\$ 0,540	R\$ 1,992	R\$ 3,78
Regulador de Tensão UA78M33	1	US\$ 0,357	R\$ 1,317	R\$ 2,50
Acelerômetro MMA8451QT	1	US\$ 0,930	R\$ 3,430	R\$ 6,52
Suporte para Cartão SD	1	US\$ 1,850	R\$ 6,823	R\$ 12,96
Transistor SMD BC846	2	US\$ 0,067	R\$ 0,494	R\$ 0,94
Suporte para Bateria CR2032	1	US\$ 0,380	R\$ 1,401	R\$ 2,66
Placa de Circuito Impresso	1	R\$ 35,000	-	R\$ 35,00
			<b>Valor Total do Protótipo</b>	<b>R\$ 87,32</b>

Comparando o valor total do protótipo com outros equipamentos existentes no mercado, encontra-se uma diferença significativa de preço, como exemplo o Analisador de Vibração da empresa Lutron Electronic, modelo BVB-8207SD, avaliado em aproximadamente R\$ 9850,00. Esse equipamento possui características de quatro canais para registro de vibração, faixa de frequência de 10 Hz a 1 kHz, cálculo da velocidade, RMS, valor de pico, máximo e mínimo, e medição de deslocamento.

Também se comparou o *data logger* ao Medidor de Vibração da empresa Fluke, modelo 805. Este foi avaliado em aproximadamente R\$ 6990,00 e, entre suas características, possui um canal de vibração, frequência de 10 Hz à 1 kHz ou de 4 kHz à 20 kHz, cálculo da velocidade e do deslocamento e possui indicador de nível vibracional que permite um diagnóstico precoce de acordo com a máquina analisada.

Os valores destes equipamentos foram encontrados através de cotação de sites especializados neste tipo de equipamento.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a elaboração do *data logger*, foram realizados os experimentos para confirmar o seu funcionamento, entre eles os testes preliminares, teste em uma bomba d'água centrífuga de 1,5 CV e o cálculo do valor eficaz (RMS), os quais serão descritos no decorrer deste capítulo.

### 5.1 Testes preliminares

Os testes preliminares foram realizados com o objetivo de validar o funcionamento do protótipo. Primeiramente foi realizado um teste para verificar o funcionamento do protótipo quando apenas a aceleração da gravidade está agindo sobre o mesmo. Após, foi realizado um teste com o objetivo verificar o comportamento do *data logger* registrando o impacto de uma bola de tênis sobre uma superfície.

Os valores dos dados coletados pelo acelerômetro são armazenados em uma unidade que relaciona o valor obtido com o valor real da aceleração, de acordo com a escala selecionada,  $\pm 2G$ ,  $\pm 4G$  ou  $\pm 8G$  (FREESCALE, 2015). Os resultados dos testes estão apresentados em  $m/s^2$ , porém, para obter os valores em  $m/s^2$ , deve-se calcular o valor de acordo com a escala utilizada. Nos testes a seguir a escala utilizada foi de  $\pm 2G$ , então, através das especificações do acelerômetro, a relação de valores encontrada é de 4096 unidades para cada  $9,807 m/s^2$ .

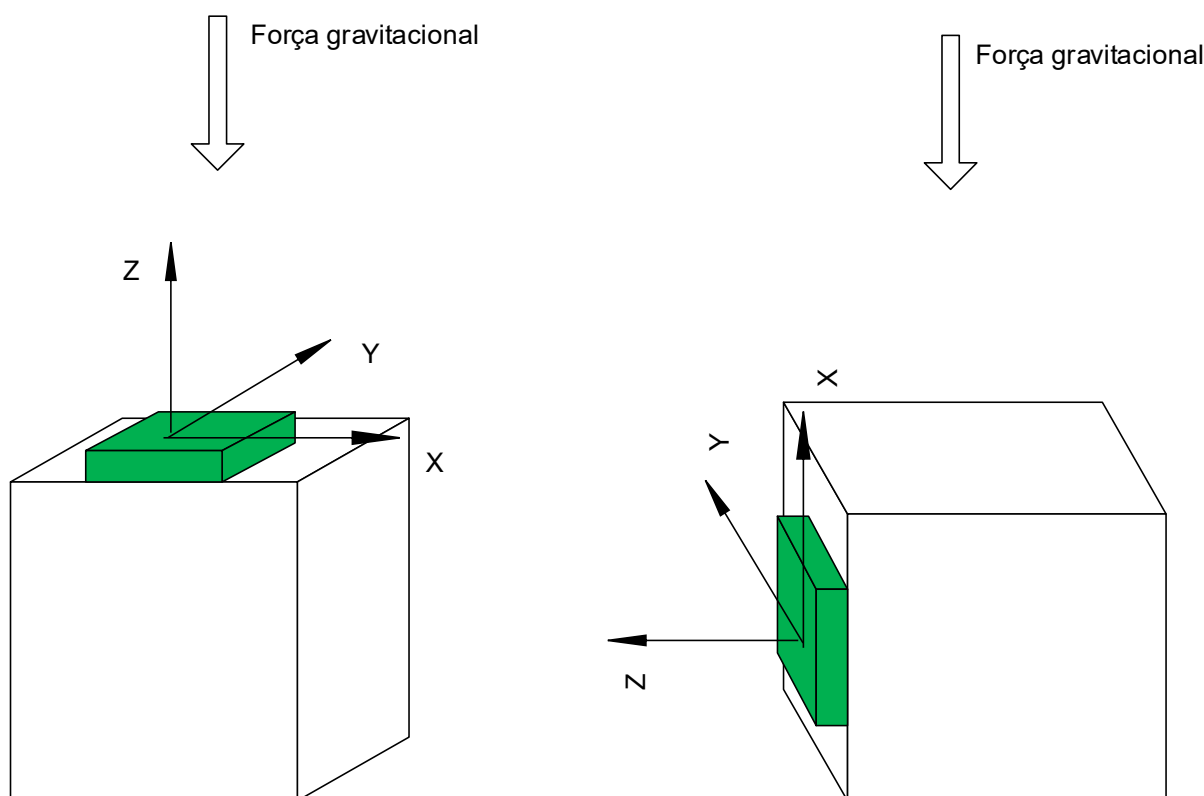
#### 5.1.1 Aceleração da Gravidade

Ao redor da Terra existe uma região conhecida como “campo gravitacional” que atrai todos os corpos para o centro da Terra. Essa atração acontece por meio da influência de uma força, a força gravitacional. A aceleração da gravidade na superfície da Terra é dada pela constante  $9,807 m/s^2$ , representada pela letra “G”.

Para realizar este teste, o *data logger* foi fixado em uma superfície plana, na parte superior de uma caixa, permanecendo em posição horizontal, após alguns segundos, a caixa foi inclinada em  $90^\circ$ , colocando o *data logger* em posição vertical, conforme mostra a figura 29.

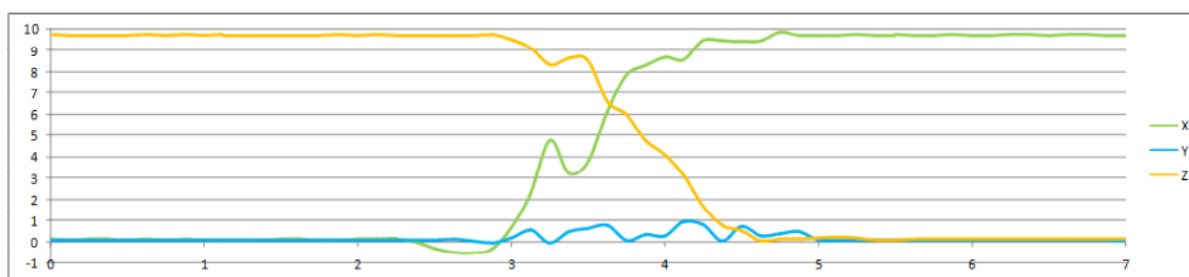


**Figura 29: Teste preliminar considerando aceleração da gravidade.**



Considerando somente a força da gravidade, pode-se observar que quando a superfície da caixa onde foi fixado o *data logger* está na posição horizontal, a aceleração gravidade aparece no eixo Z e, quando esta fica em posição vertical, a aceleração da gravidade aparece no eixo X. Por sua vez, o eixo Y permanece em zero. A Figura 30 apresenta o gráfico do teste. Observa-se que a força gravitacional encontra-se inicialmente no eixo Z e após a inclinação da caixa, no eixo X:

**Figura 30: Gráfico do teste preliminar considerando a aceleração da gravidade**



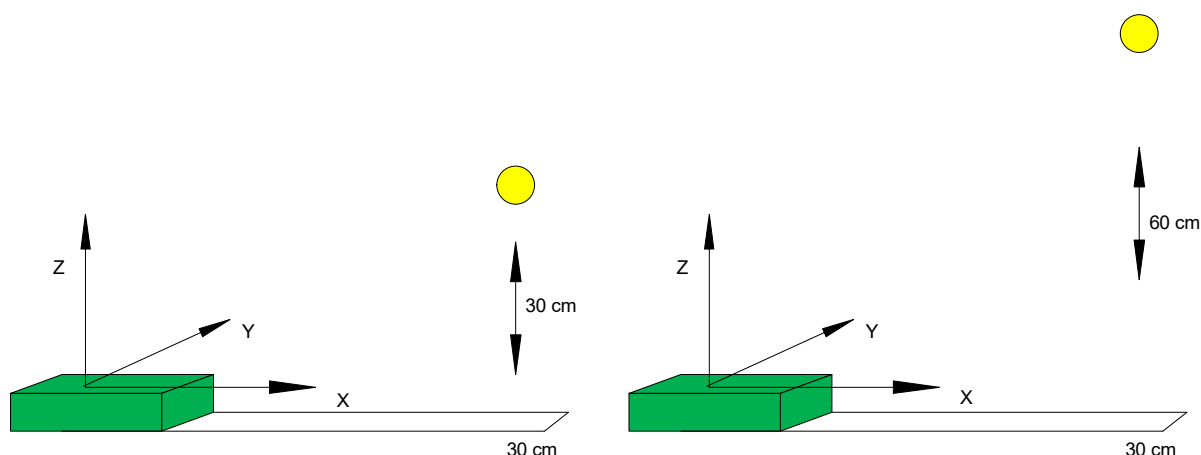
Concluiu-se através do teste de aceleração da gravidade que o acelerômetro é capaz de determinar sua inclinação. Para testes futuros, a força da aceleração da gravidade será desconsiderada matematicamente, dessa forma, quando nenhuma

outra força estiver agindo sobre o *data logger*, o valor registrado será 0 (zero), independente da sua posição.

### 5.1.2 Teste com bola de tênis

Para a realização deste teste utilizou-se uma superfície plana (mesa), onde o protótipo foi fixado horizontalmente, e uma bola de tênis - que foi lançada perpendicularmente a ela - atingindo a superfície. Foram realizados dois testes: o primeiro com a bola de tênis lançada de uma altura de 30 cm da superfície, e o outro com a bola lançada de uma altura de 60 cm da superfície, conforme mostra a figura 31:

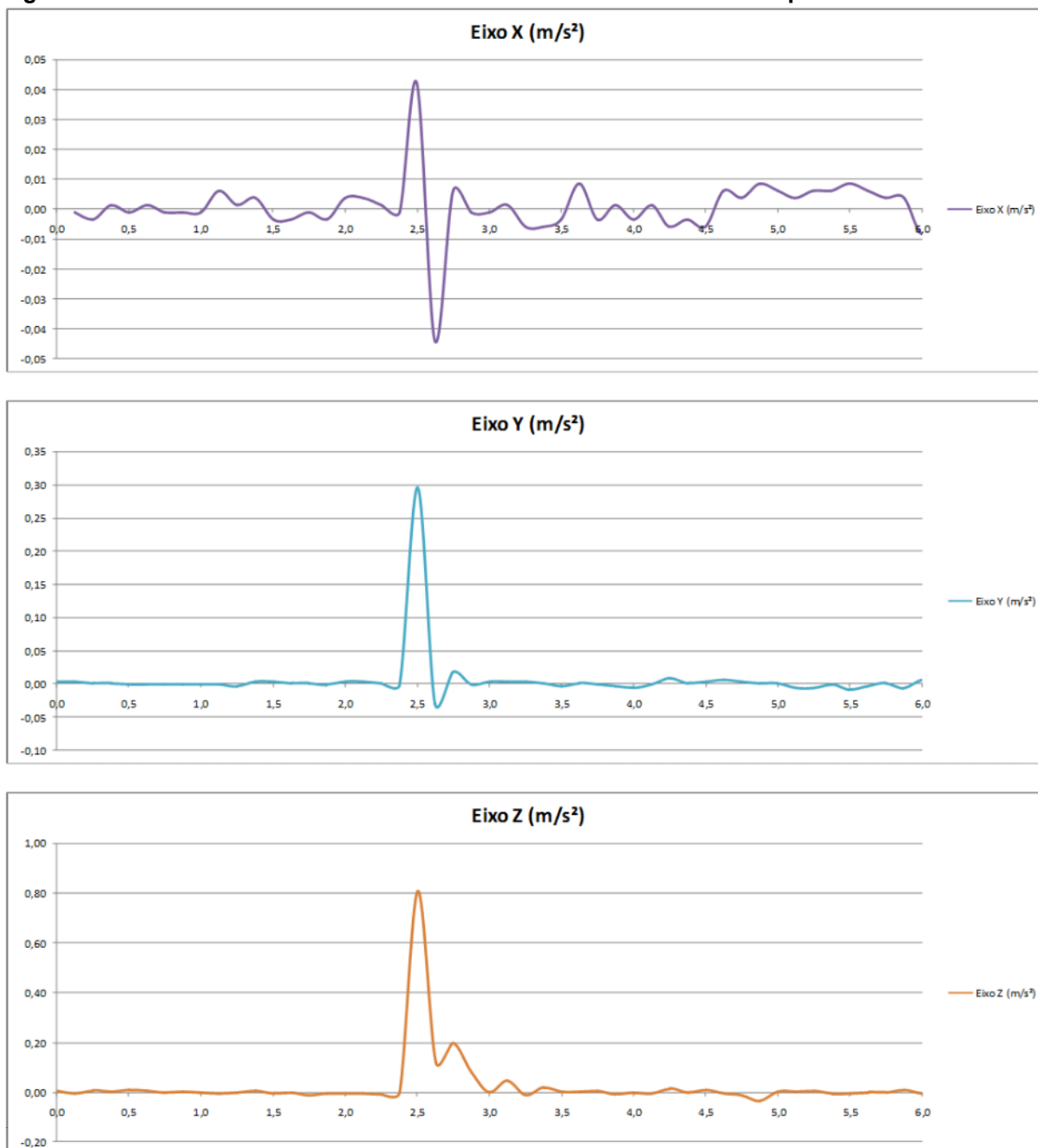
Figura 31: Teste preliminar com bola de tênis.



O acelerômetro foi configurado na escala de  $\pm 2G$  e com uma frequência de amostragem de 100 Hz. O protótipo foi programado para realizar uma média de 10 amostras, ou seja, é realizado um registro de cada eixo a cada 100 milissegundos. A aceleração da gravidade foi desconsiderada, através do *firmware*, dessa forma, quando nenhuma vibração é causada no protótipo os três eixos mostram um valor aproximado de 0 (zero).

O objetivo deste teste é comparar as intensidades de vibração nos três eixos. As figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, os dois testes realizados: 30 cm de altura e 60 cm de altura, num período de 6 s escolhidos aleatoriamente.

**Figura 32: Gráfico dos 3 eixos do teste com bola de tênis a 30 cm da superfície.**

**Figura 33: Gráfico dos 3 eixos do teste com bola de tênis a 60 cm da superfície.**

Através deste teste foi possível validar o comportamento e as configurações do data logger. Observou-se que, quando a bola é lançada de uma altura maior, o impacto na superfície registrado pelo protótipo é visivelmente maior. Os valores negativos que aparecem, em maior parte no eixo Z, no teste de 30 cm, são observados nos eixos X e Y no teste de 60 cm, essa diferença ocorre devido à deformação da superfície em que o protótipo está fixado. Outro ponto importante observado através do teste é que, como a aceleração da gravidade foi

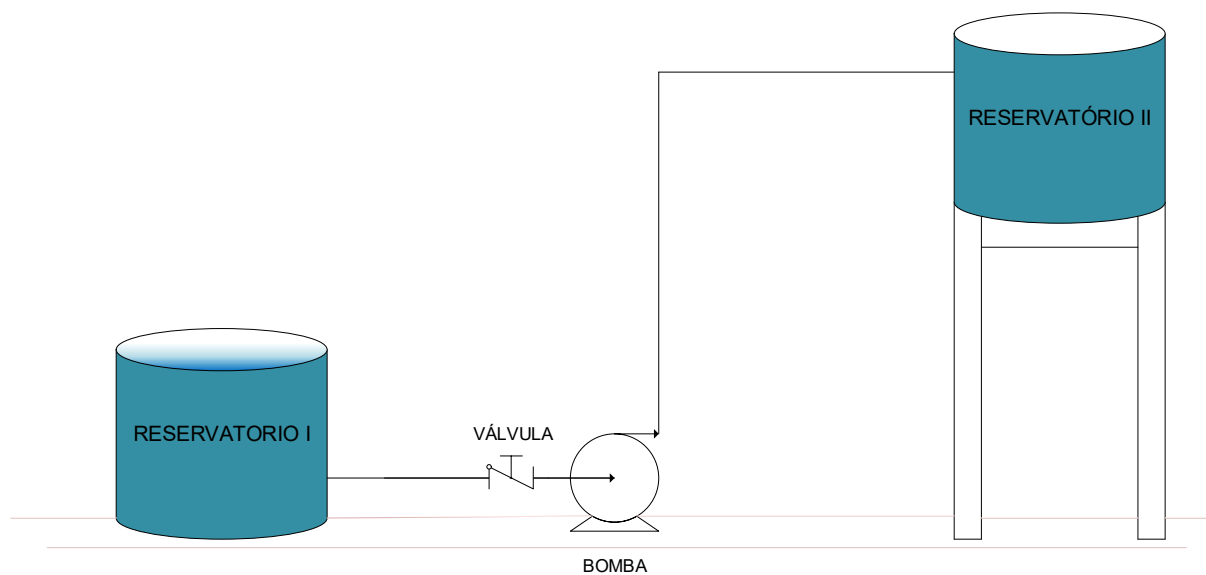
desconsiderada, o valor da aceleração registrado é 0 (zero) quando não há nenhum impacto sobre a superfície.

## 5.2 Teste em uma bomba d'água centrífuga de 1,5 CV

Uma bomba centrífuga é uma máquina utilizada para transferir líquidos de um local para outro, sua utilização é muito comum em sistemas de saneamento básico e na irrigação de lavouras. A bomba d'água utilizada no teste é do modelo BC-92S, da marca Schneider Motobombas, e utiliza um motor trifásico de 1,5 CV, 380 V, da marca WEG. O motor é acionado por um inversor CFW-11, da marca WEG, com rotação configurada em 3600 rpm.

A bomba d'água utilizada no teste encontra-se montada em um sistema de bombeamento que transporta água de um reservatório para outro. O sistema também possui uma válvula, do tipo esfera, que interrompe a sucção de água. A figura 34 mostra o esquemático do sistema de bombeamento:

**Figura 34:** Figura esquemática do sistema de bombeamento.



Para o teste com o *data logger*, este foi fixado diretamente ao motor elétrico, conforme mostra a figura 35. Foram realizados dois testes: um com a bomba em funcionamento normal e em condições adequadas e outro com a válvula de sucção fechada. Segundo o fabricante, a bomba não deve operar a vazio, ou seja, sem água, pois pode ocasionar problemas ao equipamento.

Após os dados coletados, utilizou-se o cálculo do valor eficaz (RMS) para realizar uma nova análise do comportamento da bomba nos dois casos descritos acima.

**Figura 35: Data logger fixado ao motor.**



Para os testes, o acelerômetro foi configurado, através do *firmware*, na escala  $\pm 2G$  e com taxa de amostragem de dados na frequência de 200 Hz, ou seja, uma amostra a cada 5 milissegundos.

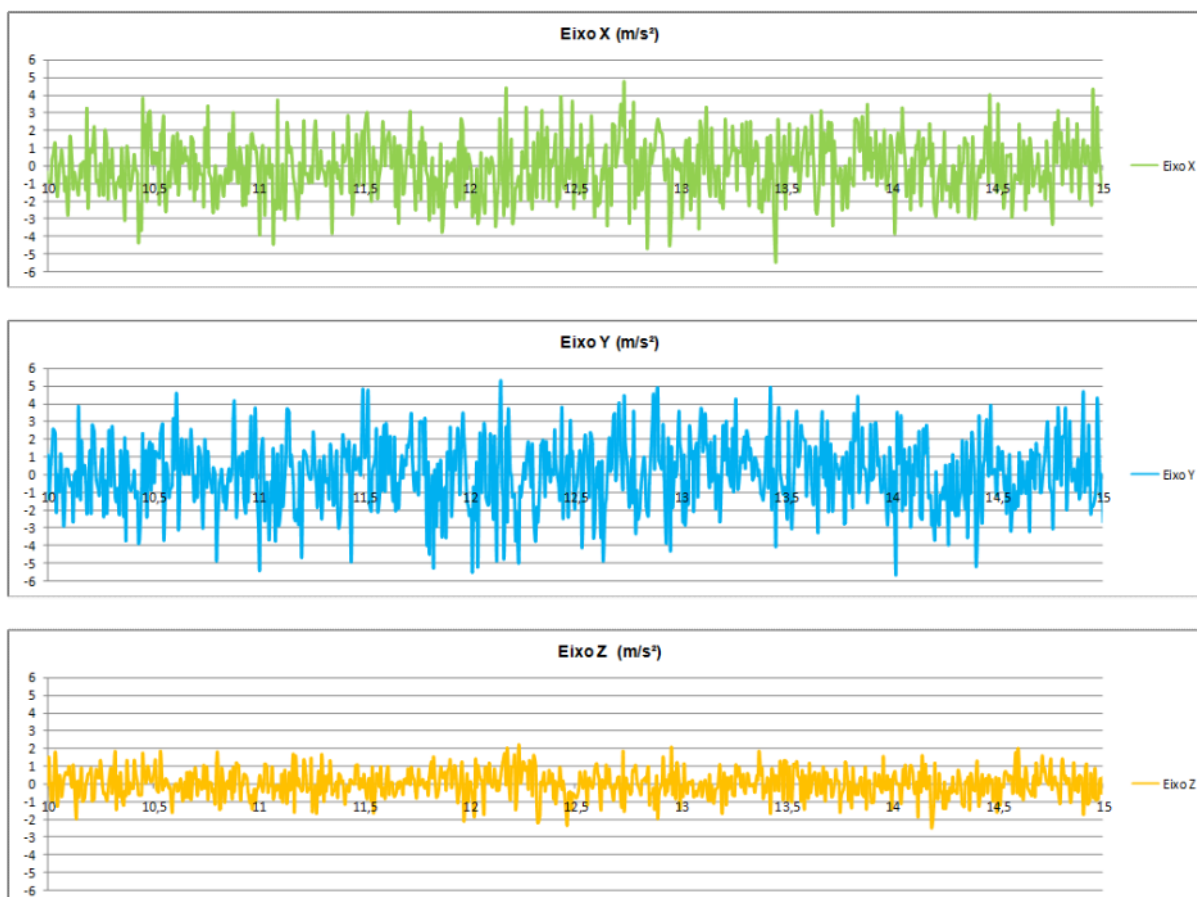
### 5.2.1 Funcionamento normal

Neste primeiro teste, a bomba foi colocada em pleno funcionamento no sistema de bombeamento, de maneira que os dados coletados neste momento sirvam como padrão de funcionamento normal do sistema.

Foram coletadas 2.620 amostras em aproximadamente 20 s de registro. A figura 36 apresenta os gráficos dos eixos X, Y e Z, em um período de tempo de 5 s

escolhidos aleatoriamente, dos dados registrados pelo protótipo.

**Figura 36: Dados coletados do funcionamento normal da bomba.**



Através dos registros do funcionamento normal da bomba, pode-se criar um modelo de comparação, para ser observado e comparado com futuras medições e análises.

### 5.2.2 Funcionamento com a válvula da sucção fechada

Neste segundo teste, a bomba foi colocada em funcionamento no sistema de bombeamento e com a válvula da sucção fechada. Com a bomba funcionando a vazio, o conjunto apresentou um ruído sonoro (“chiado”) elevado. Segundo o fabricante, o ruído é característico da bomba quando opera nestas condições e deve-se evitar esse tipo de operação por grandes períodos de tempo.

Foram coletadas 2.465 amostras em aproximadamente 20 s de registro. A figura 37 apresenta os gráficos dos eixos X, Y e Z, em um período de tempo de 5 s

escolhidos aleatoriamente, dos dados coletados pelo protótipo.

**Figura 37: Dados coletados do funcionamento com a válvula de sucção fechada.**



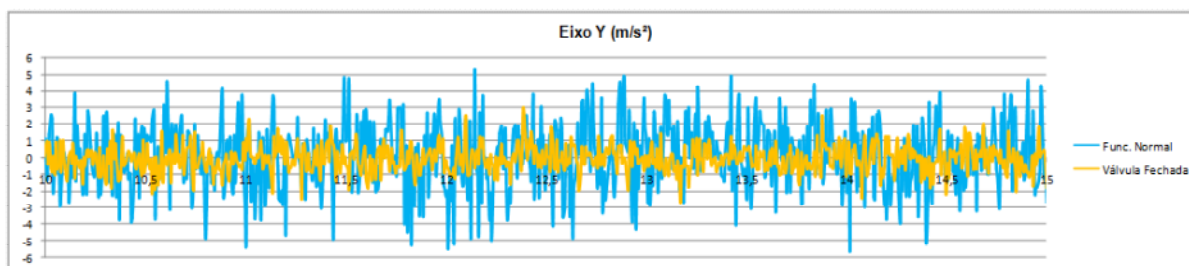
Analisando os gráficos da figura 37 e comparando com os gráficos dos dados coletados com a bomba em funcionamento normal (mostrados na figura 36) é possível afirmar que o nível e os valores de pico das vibrações registrados pelo *data logger* são visivelmente diferentes quando se comparam os dois casos analisados.

Quando os dois casos são comparados, é possível observar a diferença do comportamento em qualquer um dos três eixos, porém, considerando apenas a análise do eixo Y, observa-se que, durante o funcionamento normal, os picos de vibração registrados são de aproximadamente 5 m/s<sup>2</sup>, enquanto no funcionamento com a válvula de sucção fechada, os valores de pico são menores que 3 m/s<sup>2</sup>. A figura 38 mostra a comparação dos dois casos, analisando apenas o eixo Y:

**Figura 38: Comparação dos gráficos de funcionamento normal e com a válvula de sucção**



fechada do eixo Y.



### 5.2.3 Cálculo do Valor Eficaz (RMS)

O Valor Eficaz (RMS) é a medida estatística da magnitude de uma série de valores, calculado pela raiz quadrada da média aritmética dos quadrados dos valores, mostrada na equação 1. Através do cálculo do valor eficaz dos dados é possível analisar a intensidade dos valores registrados. A tabela 08 apresenta a comparação do valor RMS e da média dos dados registrados nos dois casos anteriores, considerando os três eixos:

**Tabela 07: Comparação entre o valor RMS do funcionamento normal e da válvula fechada em função dos três eixos.**

Direção	Funcionamento normal Valor RMS (m/s <sup>2</sup> )	Válvula fechada Valor RMS (m/s <sup>2</sup> )	Diferença dos valores	
Eixo X	1,6013	0,7039	0,8974	43,96%
Eixo Y	1,9645	0,8088	1,1557	41,17%
Eixo Z	0,7532	0,3880	0,3652	51,51%

Com o valor RMS de cada eixo, é possível observar uma diferença de mais de 40% entre o comportamento durante o funcionamento normal e o comportamento com a válvula de sucção fechada.

Conclui-se assim, que o cálculo do valor eficaz (RMS) dos dados é uma importante ferramenta, pois facilita a análise do comportamento do sistema e pode auxiliar na identificação de falhas na bomba.

Baseado nos testes e seus respectivos resultados pode-se afirmar que o *data logger* comportou-se de maneira eficaz, coletando e armazenando os dados de

maneira correta, alcançando assim os objetivos propostos no presente trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

Os acelerômetros são sensores ou transdutores que medem acelerações, podendo ser usados em diversas áreas distintas, desde a utilização em GPS à produção de *airbags*. Por possuir características como tamanho reduzido e extensa funcionalidade, este componente tem sido alvo de novas pesquisas e desenvolvimento de projetos, como o presente trabalho.

Todo equipamento rotativo gera vibração, que pode ser reconhecida e cujos dados podem ser coletados por meio de um acelerômetro MEMS. Quando há sinais que possam ser utilizados como conhecimento das características normais de funcionamento de um sistema, pode-se realizar uma análise por vibração, pois a partir do conhecimento das características normais do equipamento pode-se identificar as características anormais. Através de um acompanhamento diário dos níveis de vibração, podem-se identificar as condições da máquina.

A análise por vibração é uma importante ferramenta da manutenção preditiva, pois ela prevê a falha do equipamento, evitando despesas com outras manutenções, além de aumentar a disponibilidade de equipamentos, a eficiência das intervenções e a confiabilidade operacional. A elaboração do *data logger* baseou-se nestes critérios, além do desenvolvimento de um protótipo de tamanho reduzido, fácil de operar e com baixo custo de fabricação.

O *data logger* obteve resultados satisfatórios nos testes experimentais, onde este se comporta de maneira esperada, coletando e armazenando dados vibracionais que servirão para a análise de falhas do equipamento. O teste com bomba/motor elétrico foi o que apresentou grande relevância no presente estudo, pois o protótipo foi elaborado para este fim, já que este tipo de equipamento possui custo elevado com manutenções convencionais. Para o desenvolvimento deste teste, fixou-se o *data logger* na bomba, de maneira que este coletasse os dados em dois momentos: primeiramente com a bomba em funcionamento normal para obter os dados vibracionais do comportamento padrão e utilizá-los como modelo de comparação, e em um segundo momento com a válvula de sucção fechada, para obter os dados vibracionais de um comportamento anormal, simulando uma falha. Houve uma diferença significativa dos dados coletados nos diferentes momentos analisados, comprovando a eficácia do protótipo elaborado.

O *data logger* desenvolvido não foi comparado funcionalmente a outros equipamentos existentes no mercado devido à inviabilidade econômica, pois estes equipamentos possuem alto custo de aquisição, impossibilitando adquiri-los somente para este objetivo.

O *data logger* elaborado possui tamanho reduzido e simplicidade na operação, facilitando e possibilitando diversas aplicações. O *data logger* permite a atualização do *firmware* no sistema - podendo-se alterar configurações do acelerômetro como escala e frequência de amostragem e alterações no intervalo de tempo dos registros no cartão SD – com o protótipo montado. Para este trabalho usou-se um cartão de memória do tipo SD, pois este é facilmente encontrado no mercado e possui grande capacidade de armazenamento, além de possuir tamanho e custo reduzidos. Os dados são disponibilizados em formato “.txt” e “.csv”, podendo assim ser utilizados em diversos programas de análise de dados, como por exemplo Microsoft Office Excel e o OpenOffice Calc, facilitando assim sua análise. O custo para o desenvolvimento do protótipo foi de R\$ 87,32, sendo um custo satisfatório, ficando consideravelmente abaixo dos valores encontrados no mercado.

Portanto, o protótipo elaborado alcançou os objetivos propostos pelo trabalho, dando margem a novos estudos de aprimoramento, como a implementação do cálculo do valor eficaz RMS via *firmware*, bem como o cálculo de outras grandezas como velocidade e deslocamento. Outra análise futura a ser implementada é o cálculo para obter a resposta em frequência, utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Pode-se também aplicar este equipamento para sistemas de bombeamento de maior potência, ou em outras aplicações que necessitam de análise por vibração.

## REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES. **iMEMS Accelerometers**. Disponível em: <<http://www.analog.com>>. Acesso em agosto de 2015.

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.

ATMEL. **ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH**. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/36/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48p-365589.pdf>>. Acesso em setembro de 2015.

BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Análise e Solução de Falhas em Sistemas Mecânicos**. CAMPUS - GRUPO ELSEVIER, 2014.

FREESCALE. **MMA8451Q, 3-Axis, 14-bit/8-bit Digital Accelerometer**. Disponível em: <<http://www.mouser.com/ds/2/161/MMA8451Q-254407.pdf>>. Acesso em setembro de 2015.

GONZÁLEZ, Roberto Carlos Díaz. **Desenvolvimento de um protótipo analisador de vibração de baixo custo para uso em manutenção preditiva**. Florianópolis. 2014.

MOBIUS INSTITUTE, **iLearnVibration -Vibration Analyst Educational Software**, 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**.

LOBATO, José Eduardo. **O Homem é o Futuro**. *Revista Manutenção*, p.32.

novembro/dezembro. 2008.

MANUTENÇÃO INDUSTRIAL, **Manutenção Preditiva**. Disponível em: <[http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo\\_8.pdf](http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_8.pdf)>. Acesso em: 17 Jun. 2015.

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](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00576.pdf)>. Acesso em: 13 Jun. 2015.

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

NETO, Walter G.; et al. **Manutenção preditiva através de análises em equipamentos rotativos monitorado por sensores de vibração**. Laboratório de Instalações Elétricas, Depto. Engenharia de Controle e Automação, Instituto de Estudos Superiores da Amazônia. Belém. 2012.

SELLITTO, M. **Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos**. Revista Produção, v.15, n.1, p.44-59, 2005. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006\\_TR450305\\_6975.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR450305_6975.pdf)>. Acesso em: 17 Jun. 2015.

SCHILDT, HEBERT. **C Completo e Total**. Makron Books. 1997

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

WHITE, Glenn D - **Introduction to MACHINE VIBRATION** – DLI Engineering Corp Winslow, Agosto de 2008

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 Jun. 2015.

## ANEXO I

### Firmware do Data logger

```

/*
*****
*
*           Data Logger
*           (c) Copyright 2014, Uruguaiana, RS
*           All Rights Reserved
*           All rights reserved. Copyright protected by international copyright laws.
*           Design files are not public open-source unless explicitly presented or listed
*           as such.
*****
*/
#include <mega328.h>
#include <ff.h>
#include <delay.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>

/* DEFINIÇÃO DAS PORTAS */
#define LED PORTD.4
#define LED_CAIXA PORTD.7
#define ACELINT1 PIND.3
#define ACELINT2 PIND.2
#define BOTAO PIND.5
#define BOTAO_CAIXA PINC.3
#define CD PINB.1
#define PINO_C1 PINC.1
#define PINO_C0 PINC.0

/* ENDEREÇO DE LEITURA E ESCRITA DO ACEL */
#define ACEL_W 0x38 // WRITE
#define ACEL_R 0x39 // READ

/* ENDEREÇO DOS REGISTRADORES DO ACELERÔMETRO */
#define X_MSB 0x01
#define X_LSB 0x02
#define Y_MSB 0x03
#define Y_LSB 0x04
#define Z_MSB 0x05
#define Z_LSB 0x06
#define CTRL_REG1 0x2A
#define CTRL_REG2 0x2B
#define CTRL_REG3 0x2C
#define CTRL_REG4 0x2D
#define CTRL_REG5 0x2E
#define XYZ_DATA_CFG 0x0E
#define HP_FILTER 0x0F
#define ADC_VREF_TYPE 0x00 // ADC CONFIG

/* INICIALIZAÇÃO I2C*/
#asm
.equ __i2c_port=0x08 ;PORTC
.equ __sda_bit=4
.equ __scl_bit=5
#endasm
#include <i2c.h>

```



```

/*TIMER OVERFLOW + ADC*/
unsigned char to = 0;
unsigned int pulsos = 0, pulsos_caixa = 0;
// Timer 0 overflow interrupt service routine
interrupt [TIM0_OVF] void timer0_ovf_isr(void)
{
    if (to == 47)
    {
        disk_timerproc(); //executar a cada 10ms
        to = 0;
    }
    to++;
    pulsos++;
    pulsos_caixa++;
}

unsigned int read_adc(unsigned char adc_input)
{
    ADMUX=adc_input | (ADC_VREF_TYPE & 0xff);
    // Delay needed for the stabilization of the ADC input voltage
    delay_us(10);
    // Start the AD conversion
    ADCSRA|=0x40;
    // Wait for the AD conversion to complete
    while ((ADCSRA & 0x10)!=0);
    ADCSRA|=0x10;
    return ADCW;
}

/*VARIÁVEIS GLOBAIS*/
eeprom char nome = 47;
unsigned int amostras;
char evalor[7];
char status, i, flag_open;
FRESULT result;
unsigned int nbytes;
FATFS fat; //driver info
FIL file; //file info
char path[13] = {'0','.', '/', 'd','a','t','a',47, '.', 't','x','t'};
char
dados[36]={' ','x',' ',' ',' ',NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,',' ','y',' ',' ',' ',NULL,NULL,NULL,NULL,
NULL,
NULL,NULL,',' ','z',' ',' ',' ',NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,NULL,13,10};
unsigned char ACEL_ACK, vant, flag_pulse, flag, LPBF, BF, LP;
unsigned char APERTA_BOT, APERTA_BOT_CAIXA, MEDIA=10, DELAY_ODR=0;
int x=0, y=0, z=0, cont;
long int xmed, ymed, zmed;

/*FUNÇÕES*/
unsigned int read_adc(unsigned char adc_input);
unsigned char LER_ACEL(unsigned char endereco);
void ESCREVER_ACEL(unsigned char endereco, unsigned char valor);
void STANDBY_ACEL(void);
void ATIVO_ACEL(void);
void SENSIBILIDADE (void);
void FUNCAO_ALARME(void);
void LED_SENS(unsigned char pisca);
unsigned char DESLOCA_D(unsigned char byte, unsigned char n);

```

```

void PL_VERIF(void);
void PULSE_VERIF(void);
void MSGBF (unsigned char bafro);
void MSGLP (unsigned char lapo);
void TRANS_VERIF(void);
unsigned char BOTSMD(void);
unsigned char BOTCAIXA(void);
void erro(FRESULT result);
void FECHA_ARQUIVO(void);
void SDCARD_INIC(void);
void ABRE_ARQUIVO(void);
int CONVERTE_VALOR(int);
int LER_EIXO(unsigned char eixo);

void main(void)
/*CONFIGURAÇÕES DO MICROCONTROLADOR*/
#pragma optsize-
CLKPR=0x80;
CLKPR=0x00;
#ifdef _OPTIMIZE_SIZE_
#pragma optsize+
#endif

PORTB=0x02;
DDRB=0x01;
PORTC=0x0B;
DDRC=0x00;
PORTD=0x20;
DDRD=0x90;
TCCR0A=0x00;
TCCR0B=0x02;
TCNT0=0x00;
OCR0A=0x00;
OCR0B=0x00;
TIMSK0=0x01;
TIMSK1=0x00;
TIMSK2=0x00;
UCSR0A=0x00;
UCSR0B=0x18;
UCSR0C=0x06;
UBRR0H=0x00;
UBRR0L=0x3D;
ACSR=0x80;
ADCSRB=0x00;
DIDR1=0x00;
DIDR0=0x00;
ADMUX=ADC_VREF_TYPE & 0xff;
ADCSRA=0x84;

// I2C
i2c_init();

#asm("sei")

/*CONFIGURAÇÃO INICIAL DO ACEL*/
ESCREVER_ACEL(CTRL_REG1, 0x10); // ASLP = 50Hz; WAKE = 200Hz; Low noise =
Off;
ESCREVER_ACEL(CTRL_REG2, 0x02); // High Resolution mode on - Sleep mode off;
ESCREVER_ACEL(XYZ_DATA_CFG, 0x00); //2g, 4g ou 8g; HPF_OUT = 0; - modificar ESCALA se
HPF_OUT = 1;

```

```

ESCREVER_ACEL(HP_FILTER, 0x00);           //Frequencia de corte = 16 Hz;

/*SELEÇÃO DE ESCALA*/
if (PINO_C1 == 0)
    {
        ESCREVER_ACEL(XYZ_DATA_CFG, 0x01); // 2g, [4g] ou 8g
    }
else if (PINO_C0 == 0)
    {
        ESCREVER_ACEL(XYZ_DATA_CFG, 0x00); // [2g], 4g ou 8g
    }

ATIVO_ACEL();// ACELERÔMETRO ATIVO

LED = 0;// LED INICIA DESLIGADO
LED_CAIXA = 0;
delay_ms(200); // Tempo para o programa iniciar

SDCARD_INIC(); //funcao que inicializa o cartão sd

while(1)
{
    if (CD != 0)// Quando cartão não estiver conectado, volta pra função de inicialização do cartão
    {
        SDCARD_INIC(); //fica preso nessa função até cartão ser inicializado
        corretamente
    }

    LED = 0;
    LED_CAIXA = 0;

    ABRE_ARQUIVO(); //funcao que abre arquivo com nome de "data[variavel].txt"

    APERTA_BOT = BOTSMD();
    APERTA_BOT_CAIXA = BOTCAIXA();

    if ((APERTA_BOT == 1) || (APERTA_BOT_CAIXA == 1))// inicia quando um dos botões é
    pressionado
    {
        APERTA_BOT = 0;
        APERTA_BOT_CAIXA = 0;
        amostras = 0;

        for(i=0; i<5; i++)//pisca para indicar o inicio do registro de amostras
        {
            LED = ~LED;
            LED_CAIXA = ~LED_CAIXA;
            delay_ms(200);
        }

        delay_ms(400);
    }

    while (1) // Loop até botão ou 60 mil
    {
        LED = ~LED;
        xmed = 0;
        ymed = 0;
        zmed = 0;
        cont = 0;
    }
}

```

```

while(cont < MEDIA) // while para fazer média de amostras
{
    x = LER_EIXO(x);

    y = LER_EIXO(y); //leitura dos eixos do acelerometro

    z = LER_EIXO(z);

    xmed = xmed + x;
    ymed = ymed + y;
    zmed = zmed + z;

    cont++;

    delay_ms(DELAY_ODR); //delay, utilizado de acordo com a frequencia de amostras
}

xmed = xmed/MEDIA;
ymed = ymed/MEDIA;
zmed = zmed/MEDIA;

xmed = CONVERTE_VALOR(xmed);
ymed = CONVERTE_VALOR(ymed);
zmed = CONVERTE_VALOR(zmed);

/* escreve x no vetor de dados*/
for(i=0; i<7; i++)
{
    evalor[i]=NULL;
}
itoa(xmed, evalor);

for(i=0; i<7; i++)
{
    dados[i+4] = evalor[i];
}

/* escreve y no vetor de dados*/
for(i=0; i<7; i++)
{
    evalor[i]=NULL;
}
itoa(ymed, evalor);

for(i=0; i<7; i++)
{
    dados[i+15] = evalor[i];
}

/* escreve z no vetor de dados*/
for(i=0; i<7; i++)
{
    evalor[i]=NULL;
}
itoa(zmed, evalor);

for(i=0; i<7; i++)
{
    dados[i+26] = evalor[i];
}

```

