

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Luis Henrique Miranda dos Santos

**APLICAÇÃO DE ACCELERÔMETROS DE 3 EIXOS PARA  
MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

Luis Henrique Miranda dos Santos

**APLICAÇÃO DE ACELERÔMETROS DE 3 EIXOS PARA  
MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,  
apresentado à disciplina TCC 2, do curso de  
Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica  
Federal do Paraná – UTFPR, como requisito  
parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedel  
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rogério Scalassara

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Cornélio Procópio  
Departamento Acadêmico de Elétrica  
Curso de Engenharia Elétrica**



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Luis Henrique Miranda dos Santos**

**Aplicação de acelerômetros de 3 eixos para monitoramento de máquinas elétricas**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:00hs do dia 17/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedtel - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Paulo Rogério Scalassara - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Francisco de Assis Scannavino Junior - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). María Eugenia Dajer - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por até aqui ter me ajudado com sua rica bondade e misericórdia, sua graças sempre permeou em minha vida, concedendo-me sabedoria, forças e por ter direcionado minha vida para até aqui conquistar mais uma vitória.

Agradeço ao professor Goedtel pela orientação de um trabalho desenvolvido em conjunto, pela preocupação e dedicação, para que o desenvolvimento deste trabalho fosse realizado.

Sou muito grato aos meus pais, meus irmãos, cunhadas, sobrinhos e avós que participaram de cada momento para que esta conquista fosse realizada, que me deram apoio em momento difíceis, que estiveram orando por minha vida e sempre me aconselhando no intuito de alcançar este objetivo, a eles dedico este trabalho e os dias que foram sacrificados em estar ausente em momentos especiais, para estudar, também não poderiam deixar de agradecer, a uma família que me “adotou” que me concederam morar e fazer parte da vida deles, aqui na cidade de Cornélio Procópio, meu carinho e admiração é muito grande, por meio dos bons momentos vivenciados ao lados dele, se tornaram parte da minha vida como uma segunda família, nunca esquecerei de tudo que fizeram por mim.

Agradeço a uma amiga, Mayara, que sempre esteve ao meu lado em momentos difíceis, sempre compartilhando suas experiências, e me ajudando sem medir esforços, ela se tornou mais que uma amiga, uma irmã.

Agradeço a Pró-reitora de Graduação e Educação Profissional (PROGRAD) pelo Programa de Bolsas de Fomento às Ações de Graduação que possibilitou a construção deste projeto.

“Foi o Senhor que fez isto, e é coisa maravilhosa aos nossos olhos. Salmos 118:23”

“E ainda que tivesse o dom de profecia, e conhecesse todos os mistérios e todo o conhecimento, e ainda que tivesse toda fé, de maneira tal que transportasse os montes, e não tivesse caridade, nada seria. 1 Coríntios 13:2”

## RESUMO

SANTOS, Luis Henrique M. **Aplicação De Acelerômetros De 3 Eixos para Monitoramento De Máquinas Elétricas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016. 52p.

Os motores de indução trifásicos (MIT) são amplamente utilizados nos setores industriais e as suas quebras provocam perdas em diversos fatores, como aumento de custo e perdas na produtividade. Para tal vem se desenvolvendo técnicas e sistemas a fim de prever as falhas incipientes, no propósito de evitar que tais fatores ocorram e que falhas alcancem um grau, a ponto de levar a máquina a uma possível quebra, este trabalho tem o propósito de desenvolver um sistema de monitoramento de falhas por vibrações de motores de indução trifásicas (MIT), aplicando-se o acelerômetro tri-direcional, a fim de traduzir as vibrações e microprocessá-las enviadas a central (computador) via USB (*Universal System Bus*), que exibirá os espectros no domínio do tempo e decomposta no domínio da frequência no Matlab<sup>®</sup>, para detectar falhas e realizar análise de vibrações. Neste trabalho foi desenvolvida uma placa de aquisição de dados e aplicado em motor de 1cv, sendo simulado em três situações em que o rolamento sofre degradação no propósito de serem analisadas.

**Palavras-chave:** Motores de indução trifásico; Acelerômetro; Sistema de monitoramento de Vibrações.

## ABSTRACT

SANTOS, Luis Henrique M. **Accelerometer 3 Axis Application for Electrical Equipment Monitoring**. Course Completion Assignment - Electrical Engineering. UTFP (Technological federal University of Paraná. Cornélio Procópio, 2016. 52p.

Three-phase induction engine (MIT) are widely used in industrial sectors and their breaks cause losses on several factors, such as increased costs, losses in productivity. To this has been developing techniques and systems to predict incipient failures, in order to prevent such factors from occurring and that failure to reach a degree as to bring the machine to a possible break, this work aims to develop a fault monitoring system by vibrations of three-phase induction motor (MIT) applying the accelerometer tri-directional in order to translate the vibrations and microprocessa it to sent the control panel (PC) via a USB (Universal system Bus) the spectra shows the time domain and the frequency domain decomposed in in Matlab<sup>®</sup>, to detect faults and perform vibration analysis. At this final paper was developed a data system acquisition, applied on engine of 1cv, being tested in three situation where bearing suffer degradation on purpose to make analyses

**Keywords:** Induction Engine, Acelerometer, Vibration Monitoring System.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCIPAIS PARTES DE UM MIT COM ROTOR BOBINADO.....	17
FIGURA 2 – PRINCIPAIS PARTES DE UM MIT COM ROTOR GAIOLA DE ESQUILO.....	18
FIGURA 3 – DIAGRAMA DE FALHAS ELÉTRICAS E MECÂNICAS NO MIT.....	19
FIGURA 4 – VISTA EM CORTE DE UM ROLAMENTO.....	21
FIGURA 5 – EIXO REFERENTE AS MEDIÇÕES DA SENSIBILIDADE DE ACELERAÇÃO.....	24
FIGURA 6 – EIXO X, Y e Z.....	24
FIGURA 7 – FUNÇÃO SENOIDAL NO TEMPO.....	25
FIGURA 8 – VISTA SUPERIOR DO ACELERÔMETRO ADXL.....	26
FIGURA 9 – DIAGRAMA ESTRUTURAL DO ACELEROMETRO ADXL345.....	26
FIGURA 10 – POSIÇÕES DO ACELERÔMETRO NO MOTOR.....	27
FIGURA 11 – DIAGRAMA DAS PORTAS DO PIC18F4550.....	29
FIGURA 12 – CONECTOR E PLUGUE DO TIPO “A”.....	30
FIGURA 13 – CONECTOR E PLUGUE DO TIPO “B”.....	31
FIGURA 14 – DIAGRAMA PARTICIONADO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	34
FIGURA 15 – FOTOS DA BASE DO ENCAPSULAMENTO.....	35
FIGURA 16 – FOTO O INVÓLUCRO DA BASE DO ENCAPSULAMENTO.....	36
FIGURA 17 – PLACA EM VISTA 3D.....	36
FIGURA 18 – FOTO DA PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	37
FIGURA 19 – DIAGRAMA DO MODO SPI 4 FIOS.....	38
FIGURA 20 – MAPA DE DO MODO SPI 4 FIOS.....	38
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DE PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR.....	40
FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DE PROGRAMAÇÃO NO MATLAB®.....	41
FIGURA 23 – SISTEMA DE VIBRAÇÃO ACOPLADO AO MIT.....	42
FIGURA 24 – POSICIONAMENTO DO ACELERÔMETRO AO MIT.....	43
FIGURA 25 – ESQUEMÁTICO DAS DIREÇÕES DE CADA EIXO DO ACELERÔMETRO.....	43
FIGURA 26 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO X.....	44
FIGURA 27 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Y.....	44
FIGURA 28 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Z.....	45
FIGURA 29 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO X.....	45
FIGURA 30 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Y.....	46
FIGURA 31 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Z.....	46



FIGURA 29 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO X.....	47
FIGURA 30 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Y.....	47
FIGURA 31 – GRÁFICO FFT DO SINAL NO EIXO Z.....	48

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_V$	Frequência de vibração
$f_r(\text{Hz})$	Frequência de rotação
$f_s(\text{Hz})$	Frequência de escorregamento
$w(\text{rad/s})$	Frequência de linha
$n$	Qualquer número inteiro
$R_s$	Número de ranhuras do rotor
$s$	Escorregamento,
$p$	Número de pólos
$k_l$	Igual a zero ou infinito
$k_c$	Ordem da excentricidade (valor zero para excentricidade estática, e Valor inteiro excentricidade dinâmica)
$F_o$	Falha na pista externa
$F_i$	Falha na pista interna
$F_b$	Falha na esfera
$F_c$	Falha na gaiola
$N$	Número de esferas
$f_r$	Frequência de rotação
$D_b$	Diâmetro da esfera
$D_c$	Diâmetro da pista
$\beta$	Ângulo de contato
$g$	Aceleração gravitacional
$x(t)$	Deslocamento
$x'$	Velocidade
$x''$	Aceleração
$A$	Amplitude
$w$	Frequência angular
$T$	Período da função
$\phi$	Ângulo de fase
$S(f)$	Transformada de Fourier
$P(n)$	Transformada inversa de Fourier
$f_1$	Frequência de amostragem

## LISTA DE SIGLAS

MIT	Motor de Indução Trifásico
PIC	<i>Programmable Interface Controller</i>
MEM	<i>Micro-Electromechanical System</i>
PROM	<i>Programmable Read Only Memory</i>
ULA	<i>Unidade de Lógica e Aritimética</i>
CPU	<i>Central Processor Unit</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
LED	<i>Light Emitting Dildo</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Communication</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
SDI	<i>Data Input</i>
SDO	<i>Data Output</i>
SLCK	<i>Serial Clock</i>
MBS	<i>Most significant bit</i>
LBS	<i>Least significant bit</i>
USB	<i>Universal system bus</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
CDC	<i>Communication Device Class</i>
PC	<i>Personal Computer</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 OBJETIVOS.....	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos .....	14
1.4 MÉTODO DE PESQUISA.....	15
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>16</b>
2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS MITs.....	16
2.1.1 Tipos de falhas no MIT. ....	18
2.1.2 Falhas no estator .....	19
2.1.3 Falhas no rotor.....	20
2.1.4 Falhas nos rolamentos .....	20
2.2 ACELERÔMETRO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.....	22
2.2.1 Acelerômetro tipo MEMs .....	23
2.2.1.1 Disposições do acelerômetro no motor.....	25
2.2.2 Comunicação pelo protocolo SPI.....	26
2.3 CARACTERÍSTICAS DO MICROCONTROLADOR .....	26
2.3.1 Comunicação USB .....	27
2.4 REPRESENTAÇÃO DA VIBRAÇÃO .....	28
2.4.1 Teorema de Nyquist .....	28
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
3.1 CONSTRUÇÃO .....	30
3.1.1 Características do Acelerômetro ADXL345 .....	30
3.1.2 Encapsulamento do Acelerômetro.....	31
3.1.3 Placa de aquisição.....	32
3.1.4 PIC18F4550 .....	33
3.1.5 Parâmetros de programação .....	35
3.1.6 Protocolo de comunicação CDC.....	36
3.1.7 Programação do PIC18F4550 .....	37
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>40</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>49</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 ASPECTOS GERAIS

Na área industrial, as máquinas elétricas são utilizadas em muitos setores, por isso têm vasta aplicação. Segundo Brito (2007, p. 8) com o decorrer do tempo e do uso elas podem apresentar diversos tipos de falhas, que, se não forem detectadas e ajustadas, levam a máquina a sofrer desgastes ocasionando uma possível quebra. Assim, vem se pesquisando processos de análise e detecção antecipada de falhas a fim de diminuir o período de máquinas inativas com o intuito de conter os prejuízos e os gastos excessivos (BELLINI et al, 2008, p. 4109). Vale lembrar aqui, que a detecção de falhas e a manutenção são extremamente importantes, já que na maioria das vezes é compensa mais financeiramente reparar o defeito de um motor do que comprar outro novo (a menos, é evidente, que o motor esteja em situação crítica, a ponto de comprometer o sistema) (CAMPBELL, 1997, p. 45).

A manutenção preditiva é um método muito usado e que está se expandindo cada vez mais na área de desenvolvimento de novas técnicas no propósito de monitorar equipamentos. Muitas dessas técnicas ainda com preços altos no mercado vêm trazendo consideráveis resultados financeiros às indústrias. As mesmas predizem o momento em que a máquina necessita de alguma manutenção ou troca de peças antes de atingir a quebra ou mesmo o fim da vida deste equipamento (XENOS, 2005, p. 31).

São variadas as técnicas de manutenção preditiva em uma máquina elétrica, dentre as quais se destacam: análise de vibração, análise de óleo, fluxo magnético e corrente elétrica. Em muitas empresas a manutenção é conduzida retirando a máquina do trabalho, a fim de reparar as falhas ocorridas, ocasionando custos de mão de obra, e de máquina inativa se elevam devido a esse tempo de inatividade. (LAMIM FILHO, 2007, p. 20).

A fim de minimizar as perdas físicas do motor e custos adicionais, vem-se desenvolvendo sistemas para detectar possíveis falhas, com o intuito de providenciar as devidas manutenções e, assim, evitar futuras paradas no sistema de produção (SUETAKE, 2012, p. 30). Para isso, é essencial que haja um monitoramento constante e indicadores que possam informar o surgimento da falha.

As falhas podem ser detectadas por meio de ruídos, vibrações ou alteração do estado de operação (LAMIM FILHO, 2007, p. 22).

A análise de vibração é uma das mais antigas técnicas utilizadas para monitoramento de máquinas, já que por meio dela é possível obter resultados concisos para verificação de diversos tipos de problemas mecânicos e elétricos em motores (TSYPKIN, 2011, p. 1-2). Essas falhas assumem um comportamento médio de níveis de ocorrência, dados em porcentagem, divididas em: rolamentos 69%, enrolamento do estator 21%, barra do rotor 7% e eixo 3%. Tais parâmetros foram confirmados por diversos fabricantes (BONNETT, AUSTIN, YUNG, 2007, p. 31).

Há dois métodos que se devem levar em consideração ao diagnosticar as máquinas elétricas: i) diagnóstico por condição de vibração e ii) diagnóstico por análise de dados.

No primeiro, normalmente são classificadas pelas normas ou critérios específicos, contendo as tarefas de detecção de falhas, no intuito de medir parâmetros que excedem uma taxa normal de operação; e no segundo, pelos diagnósticos de falhas que estão ligados ao monitoramento e mudanças de condições, que verificam o que ocasionou a falha, o nível de seriedade da mesma e ainda quais ações devem ser tomadas (TSYPKIN, 2011, p. 1).

Por análise de dados: podem ser examinados por coleta de dados mecânicos e eletromagnéticos da máquina (TSYPKIN, 2011, p 2).

Em virtude das falhas em motores elétricos e a análise por vibração, será discutido, nos tópicos posteriores, como serão detectadas essas falhas.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os motores elétricos têm papel fundamental na indústria, pois sua função é converter energia elétrica em energia mecânica motriz, sendo utilizado, portanto, em diversos setores (GOEDTEL, 2007, p. 36). Se as ações preditivas forem aplicadas nestes motores corretamente podem trazer benefícios significativos ao setor produtivo.

Em virtude dos métodos de análises de vibrações terem alto custo econômico em sua aplicação, há uma grande procura por métodos de baixo custo para os estudos do mesmo. Portanto, é necessário o desenvolvimento de uma tecnologia capaz de suprir, com uma boa funcionalidade, as medições de vibrações.

Neste caso o acelerômetro possui menor preço, baixo consumo de energia, sensibilidade, sinais condicionados e tamanhos reduzidos como algumas de suas vantagens (RAJ, NATARAJAN, GIRIKUMAR, 2011, p. 6).

O acelerômetro tem como propósito obter dados de vibrações de motores, lendo os valores de deslocamento nas direções dos eixos x, y, z no intuito de informar e ao mesmo tempo coletar essas informações através de uma placa de aquisição de dados que serão processados e transmitidos ao computador de forma simultânea, e, por fim, os dados serão tratados e analisados.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho analisar os sinais de vibrações causados por falhas ocorridas em motores elétricos, com o propósito de detectar e analisar as falhas através das formas espectrais utilizando o acelerômetro.

Com isso será necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados por um microprocessador, a fim de coletar informações geradas pelas vibrações do motor, que serão lidas por um acelerômetro acoplado ao motor, transformando os dados analógicos em uma escrita digital. Ao ser transmitido para o *software* que irá tratar estes dados, o mesmo será responsável por gerar a análise espectral, e assim, pelo Matlab<sup>®</sup>, analisar as falhas ocorridas no motor em questão.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma placa de aquisição de dados para obtenção de leitura por meio do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), e transmitir estes dados para central via USB (*Universal system bus*) pela classe de comunicação CDC (*Communication Device Class*).
- Estudar as possíveis falhas existentes em motores de indução trifásicos;
- Programar o microcontrolador para obtenção, tratamento e transmissão de dados de forma a adquirir a máxima otimização possível;
- Prototipar a placa de aquisição de dados;

- Programação no Matlab<sup>®</sup> para tratamento de dados em sua forma espectral;
- Acoplar o sistema ao motor com falhas já conhecidas no intuito de analisá-las.

#### 1.4 MÉTODO DE PESQUISA

Neste tópico será abordado o método de pesquisa que se discutirá no decorrer deste trabalho, que teve por finalidade projetar um sistema de sensoriamento de sinais de vibrações, por meio de um acelerômetro tri-direcional, modelo ADXL345, microprocessado através de uma placa de aquisição de dados e transmitidos ao computador.

Posteriormente, este sistema eletrônico de aquisição de dados será simulado por meio de um *software* a fim de parametrizar e verificar a sua funcionalidade realizando testes e medições. Tem-se como finalidade a placa de um circuito, de modo que venha atender os objetivos. Leva-se em consideração que os critérios a serem verificados nesta simulação, e a emulação de dados de um acelerômetro, por meio de dados simples, e a transmissão desses dados para o computador.

Após a conclusão da simulação, passa-se para a fase da prototipação do circuito, execução dos testes no mesmo, aplicando-se ao motor elétrico. E por fim serão realizadas as análises dos dados obtidos neste sistema.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os motores elétricos tem uma ampla aplicação em diversos setores industriais, sendo este um elemento de grande importância na área de produção, estando em contínuo aperfeiçoamento, no cumprimento das diversas necessidades impostas ao mesmo, tais aperfeiçoamentos, estão ligados à eficiência energética, correto dimensionamento, métodos de preciso controle, manutenção preditiva, identificação de falhas e qualidade de energia elétrica (SUATEKE, 2012, p. 29).

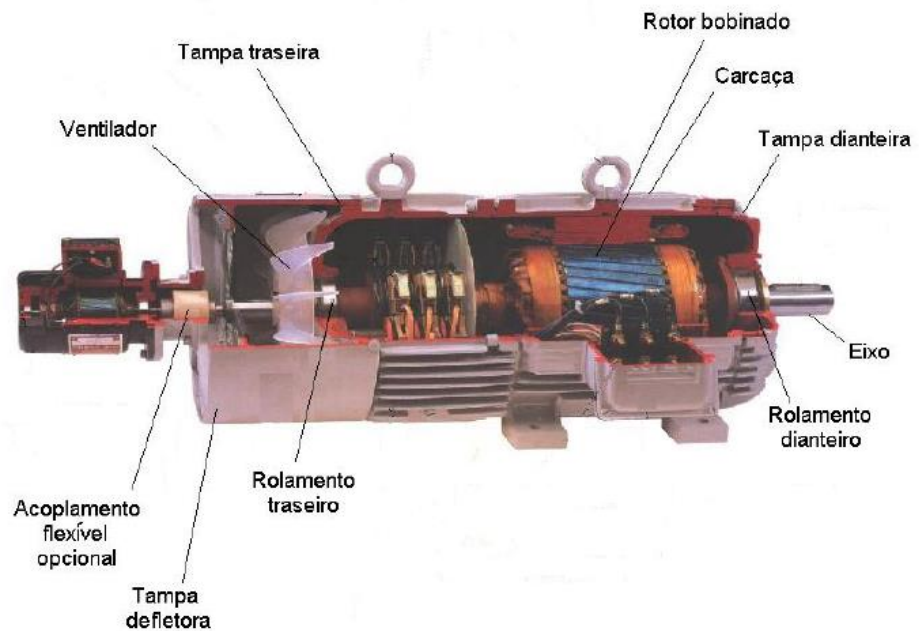
Como os motores estão expostos a diversos fatores que podem levá-los ao desgaste em seu trabalho contínuo, ou por defeitos de fabricação, tais fatores podem levar o motor a gerar falhas incipientes no interior ou no exterior do mesmo. Quando tais falhas são previamente detectadas, por meio de diagnóstico, pode-se garantir seu bom funcionamento, manutenção planejada, diminuição de custos adicionais e a operação com alta confiabilidade (VITOR et al, 2014, p. 1-2).

### 2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS MITs

O princípio dos motores elétricos é transformar energia elétrica em energia mecânica motriz e estes podem trabalhar no sentido contrário se estiverem funcionando como geradores, transformando assim energia mecânica motriz em energia elétrica (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006, p. 295). A utilização de motores elétricos e geradores se estendem a diversas aplicações, bem como: bombas, centrais de ar condicionado, britadores, talhas, compressores, bobinadeiras, moinhos, trefiladeiras, centrífugas, prensas, elevadores entre outras aplicações (WEG, 2013, p. 21).

Os MITs são usados em larga escala no setor industrial, pois são resistentes e tolerantes a falhas, além de possuir preço baixo, facilidade de controle e confiabilidade. (RAJ, NATARAJAN, GIRIKUMAR, 2011, p. 2). Os MITs são divididos em duas categorias: o motor com rotor bobinado e o motor com rotor de gaiola de esquilo. A diferença entre os motores são as configurações dos rotores. O motor com rotor bobinado possui um rotor que é equivalente ao estator com enrolamentos polifásicos com igual quantidade de pólos. Porém este tipo de motor de rotor bobinado é raro, e sua utilidade, restritas (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006 p. 296).

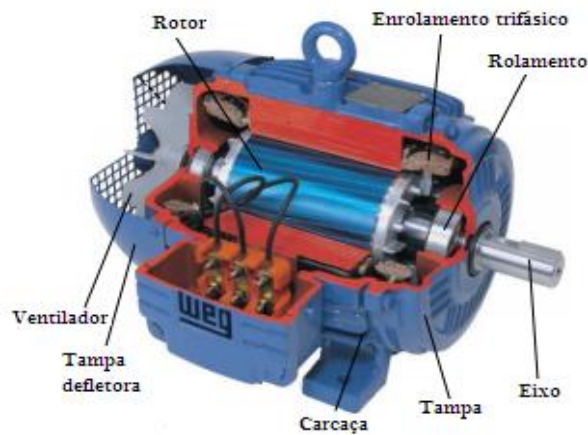
Na Figura 1, observa-se uma ilustração em corte das partes de um MIT com rotor bobinado.



**Figura 1: Principais partes de um MIT com rotor bobinado**  
Fonte: Adaptado de LAMIM FILHO (2005, p. 15)

Já o motor com rotor de gaiola de esquilo é conhecido por sua robustez de construção. A estrutura do seu enrolamento é constituída de barras condutoras inseridas no rotor com suas extremidades curto circuitadas por anéis condutores (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006, p 296).

Na Figura 2, é ilustrado em corte as partes de um MIT com rotor gaiola de esquilo.

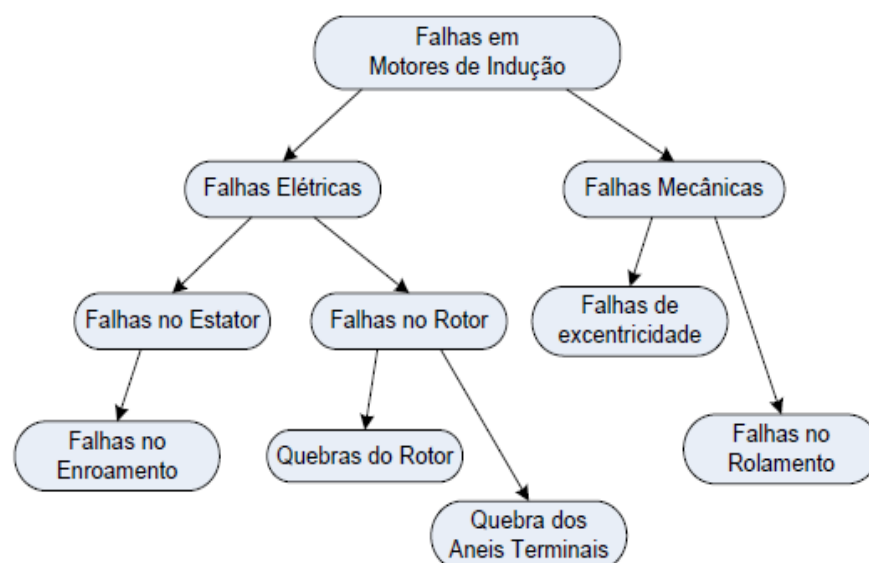


**Figura 2: Principais partes de um MIT com rotor gaiola de esquilo**  
 Fonte: Adaptado de WEG (2005, p. D-9)

### 2.1.1 Tipos de falhas no MIT.

Como visto no tópico anterior, os MITs apresentam uma construção robusta. Eles são condicionados a uma diversidade de situações naturais que, com o decorrer do tempo, leva o motor a se degradar, dando início a possíveis falhas, que, se não forem detectadas e tratadas, tais falhas podem prejudicar o desempenho do motor e também levar o mesmo a uma possível quebra (BRITO, 2002, p. 1).

As falhas no MIT podem ser classificadas em duas categorias: falhas eletromagnéticas e falhas mecânicas. Na Figura 3, pode-se observar as divisões e os locais das falhas nas subdivisões, indicando o que ocorreu por meio delas (CHIA-CHOU YEH et al., 2008, p. 1).



**Figura 3: Diagrama de falhas elétricas e mecânicas no MIT**  
 Fonte: Adaptado de (CHIA-CHOU YEH et al., 2008, p. 1)

O campo magnético rotativo faz com que o conjunto elétrico seja simétrico. Portanto seja qual for a falha, elas modificam as características simétrica da máquina de indução (BELLINI et al, 2008, p. 3). Estas falhas apresentam indicações que devem ser levadas em consideração. Uma dessas indicações que será analisada nesta proposta é a vibração. As falhas elétricas são detectadas por forças magnéticas desequilibradas, tais forças atuam no rotor e no estator (BRITO, 2007, p. 5).

Já nas falhas mecânicas, as vibrações são originadas por desequilíbrio do rotor, a curva de eixo e alinhamento, diferenças nas operações de rolamento, assim como na condição de junção, correias, polias e outras partes do sistema mecânico de rotação (TSYPKIN, 2011, p. 1-2).

### 2.1.2 Falhas no estator

Concernente às falhas no estator, conforme Brito (2002, p. 13) pode-se classificá-las referente a frequências de vibração ( $F_V$ ) de cada uma delas. Logo, tais falhas podem estar relacionadas com a excentricidade estática: pode estar ligado ao alinhamento podendo estar com deficiência, mancal deteriorado ou também aquecimento localizado no estator que pode levar a um aumento da vibração, como descrito na equação (1).

$$F_V = 2xf_s \quad (1)$$

Onde a frequência de linha é dada da seguinte forma na equação (2)

$$wx[(n R_s)(1 - s)/(p \pm k_l)] \quad (2)$$

Sendo que,  $f_s(Hz)$  é a frequência de escorregamento,  $w(rad/s)$  é a frequência de linha,  $n$  é qualquer número inteiro,  $R_s$  número de ranhuras do rotor,  $s$  é o escorregamento,  $p$  número de pólos,  $k_e$  é a ordem da excentricidade (porem para excentricidade estática vista no tópico de falhas que no estator é zero, valor inteiro para excentricidade dinâmica), e  $k_l$  é igual a zero ou infinito (BRITO, 2002). Há uma exceção de grupos de falhas, nas quais não é possível identifica-las aplicando somente a análise de vibração, como: Folgas no ferro do estator, referente

a folgas no entreferro, impedância desbalanceada das fases e curto-circuito no ferro ou bobinas do estator (BRITO, 2002, p. 13-17).

### 2.1.3 Falhas no rotor

As falhas no rotor podem ser de diversas naturezas, conforme Brito (2002, p. 13), excentricidade dinâmica: causado por aquecimentos no rotor, encurvamento provocando erros de rotação; barras quebradas ou trincadas do rotor; curto-circuito no ferro do rotor, juntas dos anéis das extremidades deficientes.

As correspondentes equações de frequência de vibrações ( $F_V$ ) em questão são:

$$F_V = 1xf_r \text{ ou } \pm 2xf_s \quad (3)$$

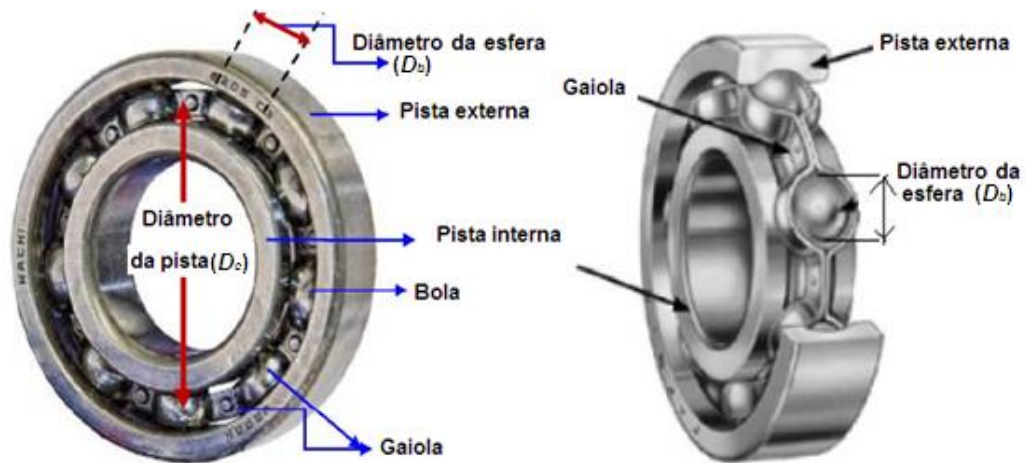
Onde a frequência de linha é calculada conforme (4)

$$wx[(nRs \pm kc)(1 - s)/p] \pm k_l \quad (4)$$

Sendo que nesta equação,  $k_c$  é a ordem da excentricidade (porem para excentricidade estática vista no tópico de falhas que no estator é zero, valor inteiro para excentricidade dinâmica) e  $f_r(\text{Hz})$  é a frequência de rotação do rotor (BRITO, 2002, p. 13).

### 2.1.4 Falhas nos rolamentos

As falhas no rolamento são caracterizadas como falhas mecânicas de acordo como visto Figura 3. Na Figura 4a e 4b observa-se a ilustração de um rolamento. Na primeira vista geometricamente e na segunda em corte e com as devidas indicações nas partes que compõe este componente, sendo que BD é o diâmetro da esfera e PD é o diâmetro da pista.



a) Partes de um rolamento

b) Partes do rolamento em vista em corte

**Figura 4: Vista em corte de um rolamento**

Fonte: Adaptado de (MARUTHI; HEGDE, 2014, p. 2).

Os defeitos nos rolamentos podem sofrer falhas incipientes em seu uso, provenientes de diversos fatores, como esforço mecânico, contato de água com a graxa, degradação por consequência da umidade, por lubrificação inadequada e instalação inapropriada (BRITO, 2002, p. 22). Tais fatores estão associados com defeitos na pista externa, pista interna, na esfera e na gaiola, sendo que cada uma dessas falhas estão vinculadas a sua respectiva equação de frequência de vibração, dadas a seguir (BELLINI, 2008, p. 4115):

Equação referente à falha na pista externa:

$$FO = (N/2) f_r [1 - Db \cos(\beta)/Dc] \quad (5)$$

Equação referente à falha na pista interna:

$$FI = (N/2) f_r [1 + Db \cos(\beta)/Dc] \quad (6)$$

Equação referente à falha na esfera:

$$FB = ((Dc f_r)/Db) f_r \{1 - [Db \cos(\beta)/Dc]^2\} \quad (7)$$

Equação referente à falha na gaiola:

$$Fc = (f_r/2) f_r [1 - Db \cos(\beta)/Dc] \quad (8)$$

Visto que  $N$  é o número de esferas,  $D_b$  é o diâmetro da esfera,  $D_c$  é o diâmetro da pista e  $\beta$  é o ângulo de contato da esfera com a pista e  $f_r$  é a frequência de rotação (BELLINI et al, 2008, p. 4116).

## 2.2 ACELERÔMETRO E SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS.

Este é um sensor que tem por finalidade medir grandezas como a aceleração, velocidade e deslocamento. Os acelerômetros têm ampla aplicação em várias áreas, utilizados principalmente em aparelhos de navegação inercial, em acionamento de *air bags* devido a colisão e em monitoramento de vibração (LIMA; BURGARDT; PONTES, 2013, p. 2).

A construção do acelerômetro se compara a um sistema massa mola, em que a massa está suspensa por uma mola num corpo estático. Ao sofrer uma variação de velocidade, cria-se uma força na massa que é compensada pela mola, causando assim, o deslocamento pela força da massa, sendo que o deslocamento é relativo à aceleração do corpo. A aceleração não é a única grandeza a ser medida neste sensor, pois ele pode ser usado para medições de inclinação, rotação, vibração e gravidade (acelerações estáticas) (FIGUEIREDO et al., 2007, p. 1).

Há diversos tipos de acelerômetros mecânicos, dentre os mais utilizados tem-se os capacitivos, piezoelétrico, piezo-resistivos, Estes, no entanto estão sendo substituídos por modelos como os MEMs (*Micro-Electromechanical System*), que são caracterizados como acelerômetro eletromecânico (FIGUEIREDO et al., 2007, p. 1-2).

- Acelerômetro Piezoelétrico: utiliza o efeito piezoelétrico com o uso do cristal. Neste caso quando aplicado uma aceleração ou uma vibração, surge uma força que comprime este material, que por sua vez gera um sinal elétrico proporcional à deformação. Este tipo de acelerômetro é utilizado em aplicações onde há uma alta frequência de vibração (NAGHSHINEH et al., 2009, p. 7).

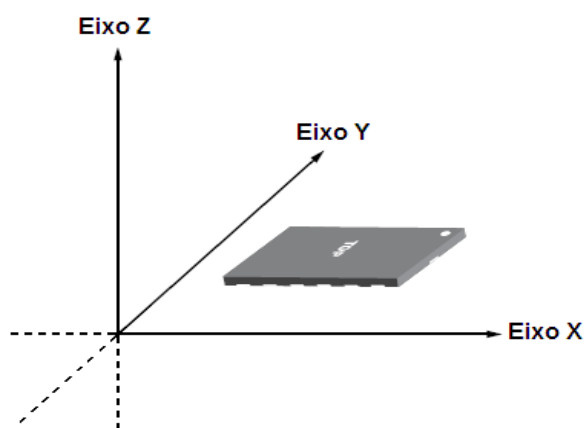
- Acelerômetro capacitivo: ao contrário do piezoelétrico usa-se o efeito capacitivo. Entretanto, ambos os conceitos de funcionamento, do capacitivo e do piezoelétrico são análogos. O sinal é medido de acordo com a variação do deslocamento da massa, entre os condensadores do capacitor e este pode ser

empregado como circuito integrado (NAGHSHINEH et al.,2009, p. 9-10); (LIMA; BURGARDT; PONTES, 2013).

- Acelerômetro resistivo: este acelerômetro utiliza-se piezoresistivo, que parte do seguinte princípio, a resistência do mesmo é variada de acordo com a força exercida na massa, detectada pela ponte de *Wheststone*, que o mesmo possui. (FIGUEIREDO et al., 2007, p. 1-2).

### 2.2.1 Acelerômetro tipo MEMs

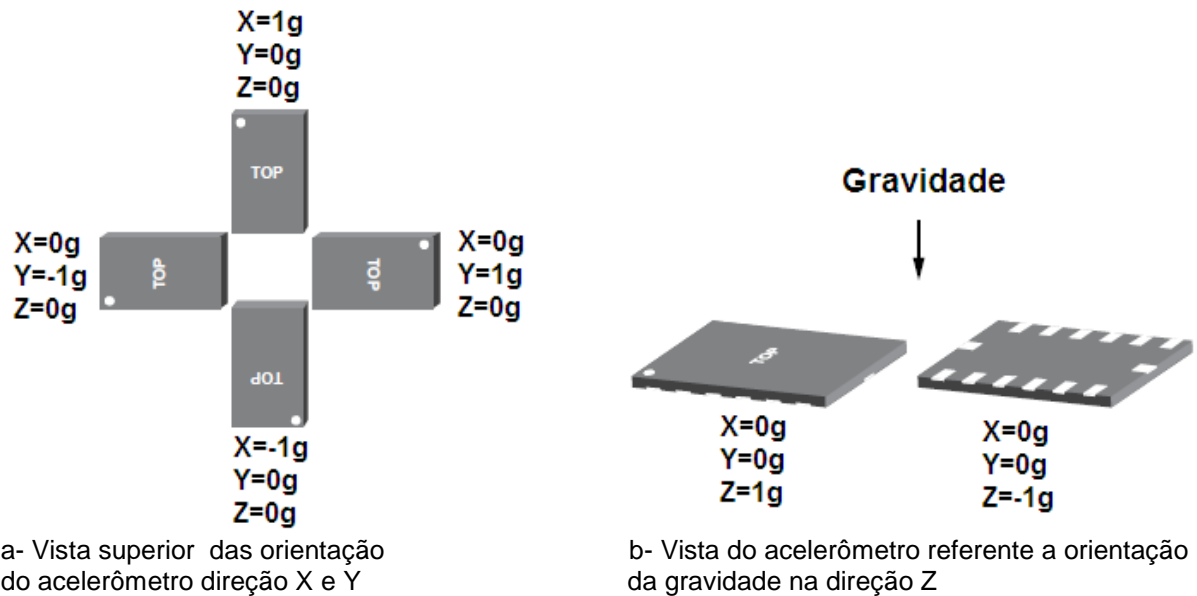
Esta subseção trata especificamente do acelerômetro tipo MEMs utilizado neste trabalho. Os acelerômetros tipo MEMS são construídos com componentes em escala micrométrica, com estruturas móveis feitas de silicone. Dentre as vantagens do sensor, estão a interação com circuitos integrados, baixo custo e alto desempenho (PATSKO, 2006, p. 1). Este sensor possibilita medir aceleração e vibração através da sensibilidade, que estão relacionadas ao deslocamento no eixo. O eixo de deslocamento no acelerômetro pode ser uniaxial (em X ou Z), biaxial (em XY ou XZ) ou triaxial (X, Y e Z). Este quesito depende do acelerômetro tipo MEMs adquirido e para qual finalidade será utilizado (FIGUEIREDO et al., 2007, p. 5); (PATSKO, 2006, p. 48). A Figura 5 ilustra as direções das medições de aceleração referente ao eixo.



**Figura 5: Eixo referente as medições da sensibilidade de aceleração**  
**Fonte: Adaptado de ANALOG DEVICES (2015, p. 35)**

Pode-se observar, um exemplo que mostra as direções de deslocamento na Figura 6a em  $\pm X$  e em  $\pm Y$ , e na e Figura 6b em  $\pm Z$ , do acelerômetro de acordo com o sinal de saída de cada eixo.

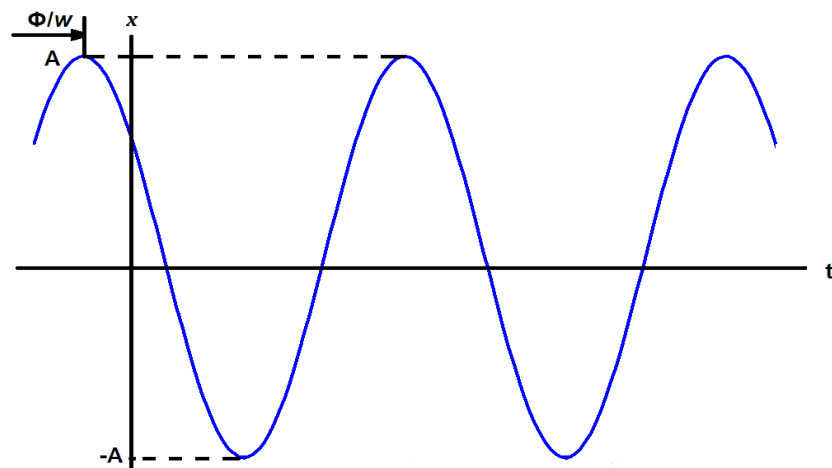




**Figura 6: Eixo X, Y e Z**

Fonte: adaptado de ANALOG DEVICES (2015, p. 35)

As equações de vibração tem relação com o deslocamento. A primeira derivada do deslocamento obtém a equação da velocidade e com a segunda derivada pode-se obter a equação da aceleração. A Figura 7, mostra a forma de onda de um movimento de harmônica simples e a seguir as respectivas equações (LIMA; BURGARDT; PONTES, 2013, p. 4-5).



**Figura 7: Função senoidal no tempo**

Fonte: Adaptado de Lima (BURGARDT; PONTES, 2013, p. 4)

Logo a relação das equações é definida como:

$$\text{Deslocamento: } x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \phi); \quad (9)$$

Velocidade:  $\frac{dy}{dx} = x' = -w.A.\text{sen}(wt);$  (10)

Aceleração:  $\frac{Dy}{dx} = x'' = w^2.A.\text{cos}(wt);$  (11)

Sendo que  $w = 2\pi f$ , e  $\phi = -\pi/2$ , cada uma das equações está vinculadas com a amplitude ( $A$ ), frequência ( $f$ ) ou frequência angular ( $w$ ), com o ângulo de fase ( $\phi$ ) e o período ( $t$ ).

### 2.2.1.1 Disposições do acelerômetro no motor

Segundo ADITEQ (2006, p. III.2-III.4) existem alguns critérios que devem ser levados em consideração para a disposição do acelerômetro ao motor. Na Figura 10 a seguir tem-se o exemplo:

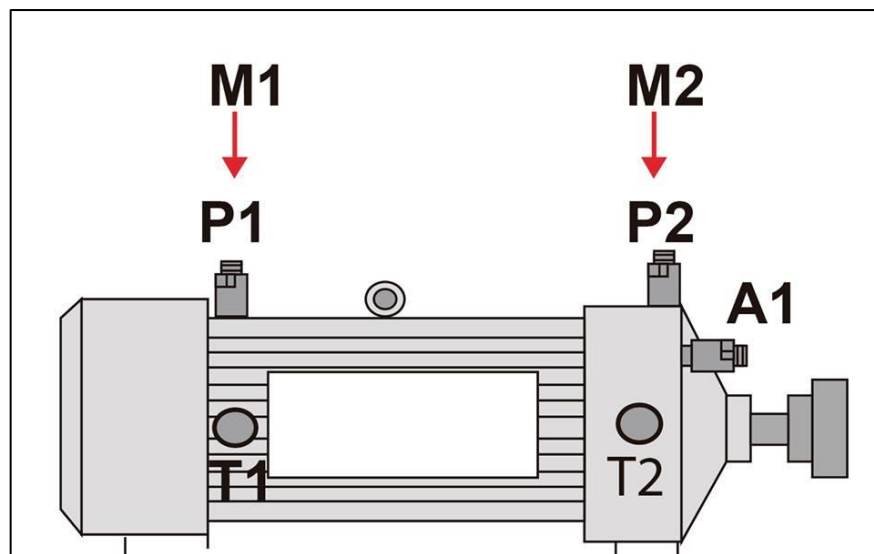


Figura 8: Posições do acelerômetro no motor  
Fonte: Autoria própria

Onde:

- P2- Medidas de vibração no mancal dianteiro, sentido vertical.
- P1- Medidas de vibração no mancal traseiro, sentido horizontal.
- 1- Medição de vibração no mancal traseiro, horizontalmente.
- 2- Medição de vibração no mancal traseiro, horizontalmente.
- 3- Medição de vibração no mancal, sentido axial.

A escolha destes pontos de medição refere-se aos pontos em que consiste maior rigidez, de preferência em partes maciças do motor, como por

exemplo a carcaça nos pontos mais próximos às extremidades. (ADITEQ, 2006, p. IV8).

### 2.2.2 Comunicação pelo protocolo SPI

O protocolo de comunicação SPI foi criado pela Motorola, este protocolo trabalha em comunicação síncrona com dispositivos conectados a um barramento que operam em modo Mestre ou Escravo. A velocidade máxima que pode-se alcançar com este protocolo é de 70MHz, porém com microcontrolador PIC18F4550 pode-se atingir uma velocidade de até 10MHz, este possui um barramento de quatro vias de comunicação: SCLK, SDA, SDO e CS. Este barramento pode ser compartilhado com mais de um dispositivo. Os dados que são transferido por meio deste barramento são frequentemente de 8 bits (PEREIRA, 2011, p. 308).

Visto que para este protocolo o CS é ligado no Vdd (tensão de 3 ou 5 volts), e o SDO conecta-se ao terra, o resistor de proteção está ligado ao Vdd pois mantém o SDA e SCL em nível lógico alto (PEREIRA, 2011, p. 309-310)

## 2.3 CARACTERÍSTICAS DO MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores são produzidos pela empresa *Microchip Technology inc.* Estes possuem um sistema que pode ser comparado a um dispositivo microprocessado, por exemplo: CPU (*Central Processor Unit*) que esta traduz as instruções de programa; uma memória PROM (*Programmable Read Only Memory*), programável e o usuário pode gravar as informações nesta memória; uma memória RAM (*Random Access Memory*) utilizada para memorizar as componentes utilizadas no programa; as linhas de I/O (*input/output*) que servem para controlar dispositivos ou receber sinais, os quais podem ser digitais ou analógicos, dependendo das portas disponibilizadas no microcontrolador. Estes por sua vez possuem diversos parâmetros auxiliares que podem ser utilizados, tais como gerados de *clock*, contador, *timers* entre outros (PEREIRA, 2010, p. 24).

Os microcontroladores possuem pinos de entrada/saída (I/O), memórias e uma ou mais Unidades de Lógica e Aritmética (ULA). Através de um programa interno pode-se controlar diversos dispositivos conectados a saída do mesmo microcontrolador. O que diferencia os vários microcontroladores existentes é a

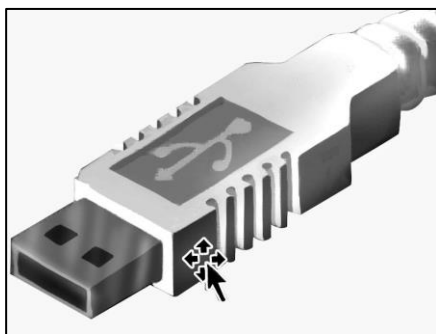
quantidade de memória interna, velocidade de processamento, quantidade de pinos de entrada/saída, periféricos e arquitetura (PEREIRA, 2010, p. 23-24).

### 2.3.1 Comunicação USB

Tradicionalmente comunicação de dados entre computador e outros sistemas utiliza métodos tais como comunicação serial RS232, paralela e de barramento universal USB. Baseado na porta serial RS232 a velocidade de transmissão é baixa referente ao tempo real. O sistema USB consiste em duas partes, no qual é tipicamente um computador conectado a outros sistemas. A comunicação USB não requer fonte de alimentação externa, as linhas de conexões para os pinos, são VCC, GND para o fornecimento de alimentação para o componente. E existem mais dois pinos que são D+ e D- utilizados para transmissão de dados. O cabo de conexão entre o computador e o hardware de aquisição de dados está limitado a no máximo 5 metros (ATMEL, 2009, p. 2)

Conector série “A”.

Plugue tipo A sempre são conectados ao sistema anfitrião, como por exemplo, computador.



a: Foto do plugue tipo “A”

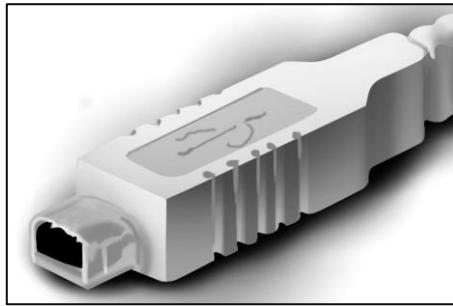


b: Receptáculo tipo “A”

**Figura 9: Conector e receptor tipo “A”**  
**Fonte: Autoria própria**

Conector série “B”.

Plugue tipo “B” sempre são conectados ao equipamento que transfere os dados, como o sistema de aquisição elaborado neste trabalho.



a: Foto do *plugue* tipo “B”

**Figura 10: Conector e receptor tipo “B”**

**Fonte: Autoria própria**



b: Receptáculo tipo “B”

## 2.4 REPRESENTAÇÃO DA VIBRAÇÃO

Existem duas formas de se exibir um movimento vibratório, são estas: domínio de tempo e o domínio de frequência.

O domínio de tempo mostra as ocorrências instantâneas do sinal, este pode apresentar particularidades que não são visíveis nos espectros de frequência. Sua principal aplicação é na identificação de eventos que ocorrem em um curto período de tempo tal como impactos, e também nem discriminar a taxa de repetições deste determinado evento.

E no domínio da frequência é mostrada a amplitude do sinal, que é decomposto em diversas componentes, que foram originadas e visto no sinal domínio do tempo, em função de suas respectivas frequências. Quando o sinal possui muitas componentes exige-se muito trabalho ou é inviável fazer uma análise crítica do mesmo. Por este motivo, a aplicação mostra o sinal em função da frequência, visto que este tipo de exibição é um dos métodos mais relevantes para monitoramento do estado das máquinas. É indispensável que os instrumentos que realizam manutenções preditivas, além do domínio do tempo, também devam exibir as vibrações no domínio da frequência para obter um melhor diagnóstico das tendências ou das falhas efetivas, que podem ocorrer nas máquinas elétricas (ADITEQ, 2006, p. 15-16).

### 2.4.1 Teorema de Nyquist

O teorema de Nyquist estabelece um parâmetro para a amostragem dos sinais, no que diz que os sinais amostrados através de um canal de largura B (taxa

de amostragem) tem que ser reconstruído pelo receptor com uma largura mínima de  $2B$ , esta frequência em questão é chamado de Frequência de Nyquist. Este processo pode ser chamado de amostragem de sinais, onde através de um sinal contínuo varia no tempo, podendo-se medir este sinal a cada período em que realiza uma nova amostragem. Este espaço entre uma amostra ou outra chama-se intervalo de amostragem, esta taxa para atender o critério de Nyquist tem que ser  $2B$  ou  $f_n/2$ , pois de acordo com o teorema este sinal será igual ao sinal original (OPPENHEIM, 1950, pag160).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho tem o intuito de acoplar o acelerômetro ADXL345 aos motores de indução trifásicos do laboratório, já com falhas conhecidas no rolemaneto, a fim de analisar as vibrações que tais defeitos geram nos motores. Logo, será necessário o desenvolvimento de uma placa com finalidade de aquisitar os dados do acelerômetro nas três direções (X, Y e Z), pelo protocolo SPI e transmitidos ao computador, a Figura 14 mostra o diagrama da estrutura desenvolvimento deste trabalho:

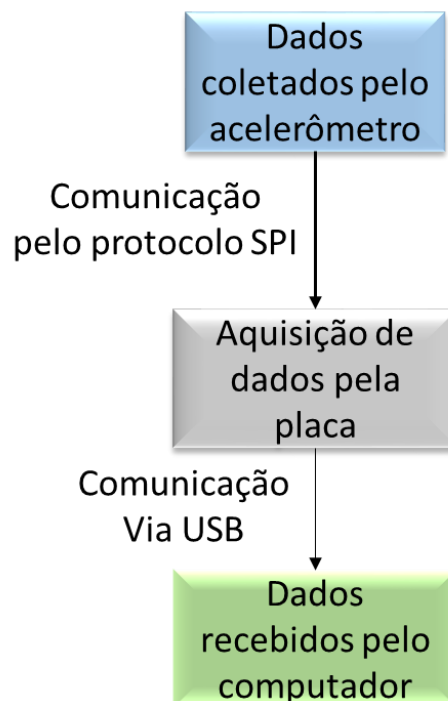


Figura 11: Diagrama particionado do sistema de aquisição de dados  
Fonte: Autoria própria

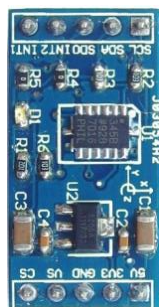
Este sistema tem por finalidade de adquirir os dados de sinais condicionados pelo sensor acelerômetro ADXL345, que traduz o deslocamento do sensor, referente aos eixos x, y e z. Conectado a placa de aquisição de dados mediante a um cabo flat de 1 m de distância, as vibrações causadas pelo motor ao serem processadas pelo microcontrolador envia, de tempos em tempos, pacotes de dados ao Matlab<sup>®</sup>, estes dados são salvos e logo após processados através do Matlab<sup>®</sup>, sendo estes analisados pela transformada de Fourier.

### 3.1 CONSTRUÇÃO

Será apresentado nesta seção o modo como foi construído este projeto, junto com a descrição de programação e os problemas encontrados neste projeto.

#### 3.1.1 Características do Acelerômetro ADXL345

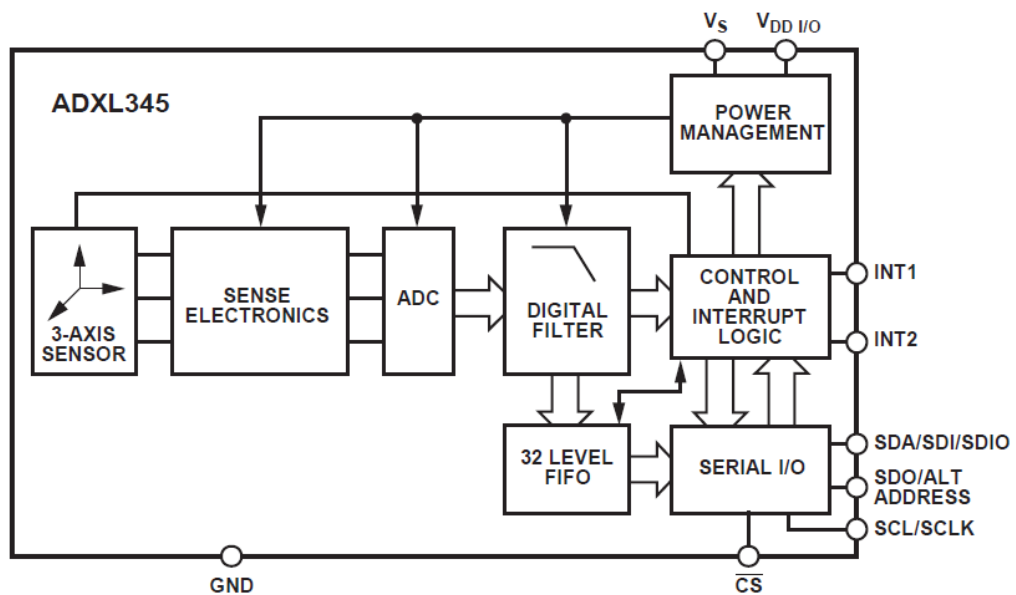
O acelerômetro modelo ADXL345 apresentado na Figura 8 é um sensor triaxial digital, com sensibilidade que pode ser variada nas medidas  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ , e  $\pm 16g$ , sendo que  $g=9,81m/s^2$ . O protocolo de comunicação que pode ser usado o I2C ou também o SPI de 3 ou 4 fios. Os dados de saída são de 16 *bits*, divididos em duas componentes, MSB e LBS (ANALOG DEVICES, 2015, p. 1-4). No dispositivo a tensão de alimentação pode ser de 3 ou 5 volts.



**Figura 12: Vista superior do acelerômetro ADXL345**  
**Fonte: Autoria própria**

Este sensor possui 3 eixos de dados, os sinais são digitais com 16 *bits*, divididos em 8 *bits* LBS e 8 bits MBS. Possui alta resolução de medição e sensibilidade de até 16g, configuração de transferência de dados via protocolo SPI

com 3 ou 4 fios ou protocolo I2C. Pode-se observar na figura abaixo as linhas de dados, com o sinal condicionado, que são estas SDO e SDI, entrada do sinal de *clock* pelo SCLK, interrupções INT1 e INT2 para auxiliar e assegurar que os dados sejam enviados nos instantes corretos, a aquisição de dados na borda de subida ou de descida, *chip select* CS, e o pinos de Vdd pode escolher entre a entrada de tensão de 5V ou de 3,8V, abaixo segue o esquema do acelerômetro (ANALOG DEVICES, 2015, p. 7).



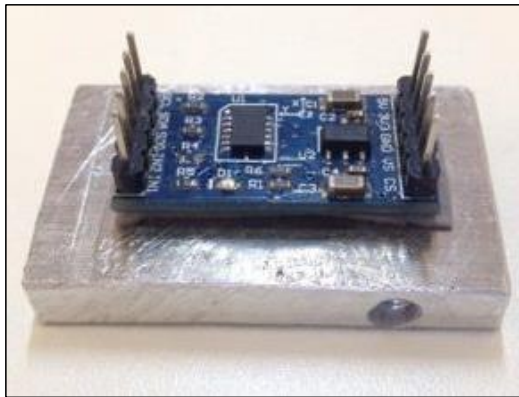
**Figura 13: Diagrama estrutural do acelerômetro ADXL345**  
**Fonte: ANALOG DEVICES (2015, p. 1)**

### 3.1.2 Encapsulamento do Acelerômetro

O encapsulamento foi construído com a finalidade de proteger o acelerômetro que possui duas partes de alumínio (a base e o invólucro de proteção) como podem ser vista nas figuras a seguir. Na base, foi acoplado um ímã de neodímio devido a sua característica física, por ter um nível elevado de imantação para ajustar bem o encapsulamento do acelerômetro ao motor no propósito de não deslizar ou desacoplar do com facilidade.

A base como mostra na Figura 12 foi projetada e construída com as seguintes dimensões  $4 \times 2,5 \times 0,65$ cm, com um rebaixo cilíndrico que na Figura 12b de diâmetro 2,1cm e altura de 0,63cm que está acoplado o ímã de neodímio.





a: Vista superior do acelerômetro acoplado



b: Vista inferior da base

**Figura 14: Fotos da base do encapsulamento**  
**Fonte: Autoria própria**

Na Figura 16, tem-se a foto do invólucro de proteção do acelerômetro, possui 4x2,5x2,5cm



**Figura 15: Invólucro da base do encapsulamento**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.3 Placa de aquisição

Esta placa teve como principal propósito a aquisição e o processamento dos dados, transmitindo-os à central de análise de dados, nesta placa existem pinos disposto de expansão, e pinos para gravação do PIC18f4550, bem como disponível o conector RS232 para transmissão de dados via porta serial, sendo que o *clock* externo de 4Mhz, necessita de fonte externa com alimentação de 5V. Sua construção foi realizada da forma como pode ser observado na figura abaixo:

A placa deste trabalho foi elaborada conforme a Figura 17, para que assim fosse prototipá-la.

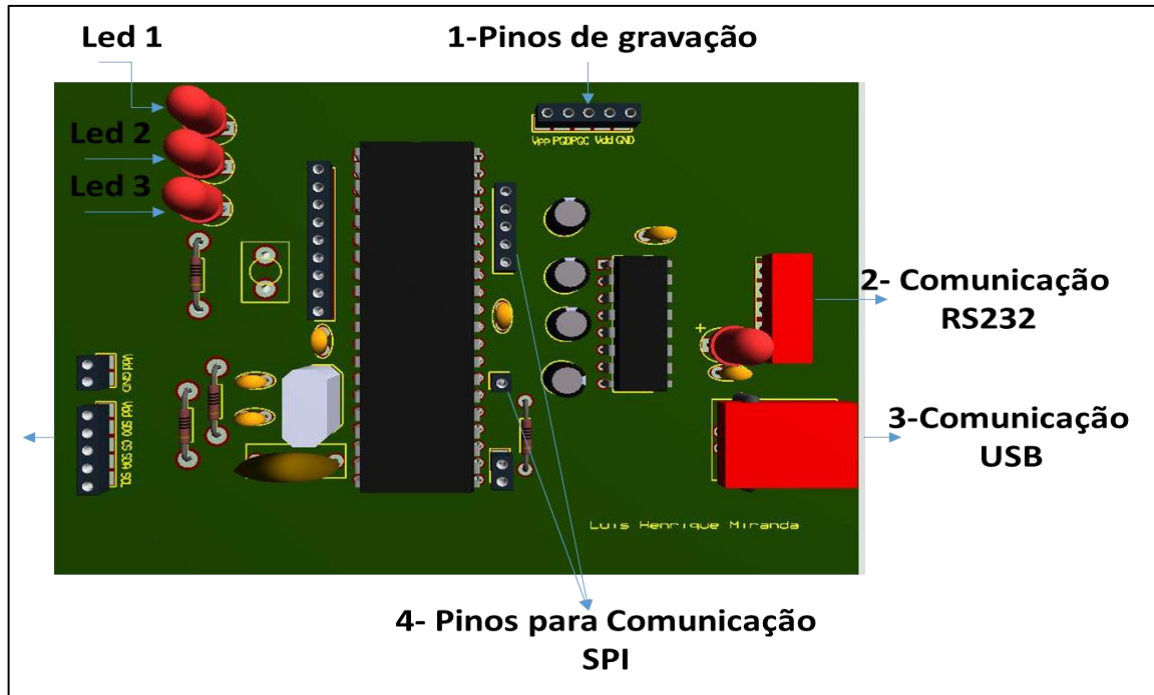


Figura 16: Placa em vista 3D  
Fonte: Autoria própria

- 1- A saídas/entradas para gravação do PIC, são PGD, PGC, VPP, VDD e GND;
- 2- A saídas TX e RX são utilizadas para comunicação RS232;
- 3- Os pinos D+ e D- são utilizados para comunicação via USB;
- 4- Os quatro pinos endereçados e dedicados para a intercomunicação entre o sensor e o microcontrolador com protocolo SPI são CK, SDI, SDO e o RB2 utilizado como CS;
- 5- Comunicação I2C estão conectados à porta RD0-SCL e RD1-SDA, SDO este é ligado ao GND e o CS ao VDD;
- 6- VDD e GND são pinos de alimentação de 5Volts.
- 7- O Led 1 é indica que a USB está em bom funcionamento: o Led 2 acenderá se houver perdas de dados pela USB; o Led 3 acenderá se houver problema com o programa.

#### 3.1.4 PIC18F4550

Para o projeto em questão, foi necessário recorrer a um microcontrolador que possuísse portas definidas, SDO (*Serial Output Data*), SDI (*Serial Input Data*), SCKL (*Serial Clock*), CS (*Chip Select*) para comunicação, pelo protocolo SPI para recebimentos de dados do acelerômetro, portas digitais, e envio de dados processados, para o computador pela porta USB 2.0.

O PIC18F4450 microcontrolador é um pequeno componente eletrônico, equipado com uma processador, para controle de processos lógicos em aplicações simples ou dedicadas, atuando em controles periféricos, tais como LEDs (*Light Emittin Diodo*), botões, displays de segmento, relés, sensores diversos entre outros (PEREIRA, 2010, p. 25).

O PIC 18F4550, estes microcontrolador ode ser visto na figura 11, possuem 40 pinos no total, sendo que 35 pinos digitais podem ser configuráveis como entrada ou saída, 12 analógicos configuráveis como canais de entradas, pinos de alimentação (VDD e Vss) e de entrada de oscilador externo (OSC), sua frequência de operação de até 48MHz memória programável de 100.000 palavras, memória de dados SRAM de 2048 bytes e EEPROM (*Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memor* de 256 bytes, inclusas as porta de comunicação serial e porta de comunicação USB 2.0 que possui baixa velocidade de 1,5MHz e velocidade total de 12MHz. Há portas dedicadas a comunicação SPI e I2C utilizando o modo mestre ou escravo (MICROCHIP,2006, p. 1-6).

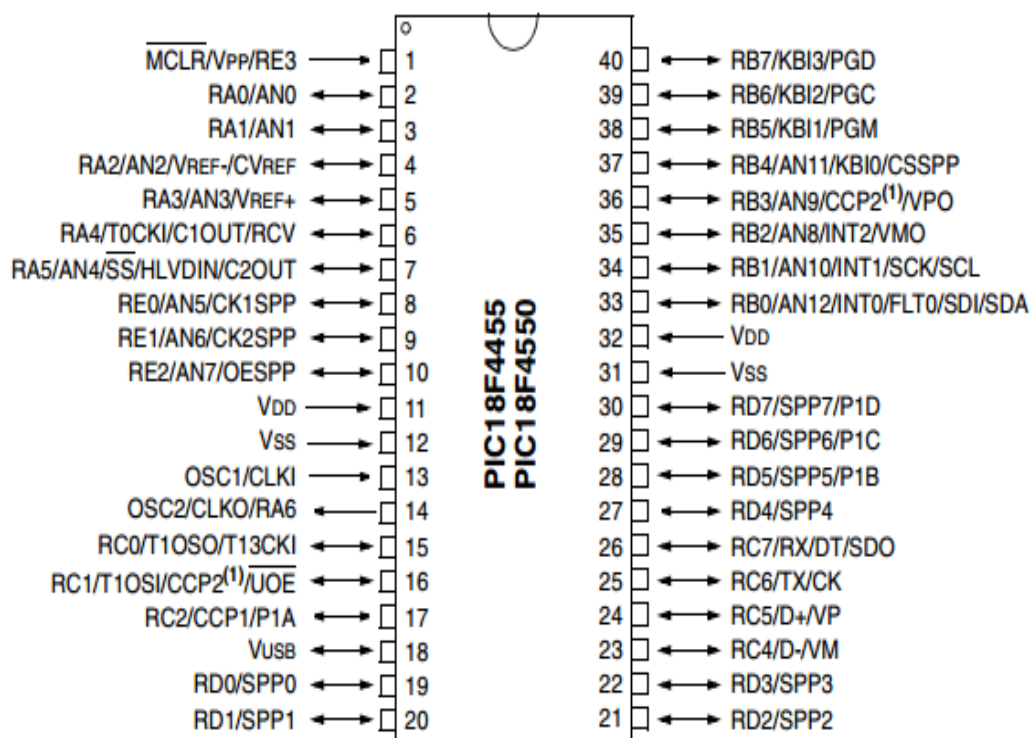


Figura 17: Diagrama de pinos PIC18F4550  
Fonte: Adaptado de Microchip (2006, p. 2)

### 3.1.5 Parâmetros de programação

O protocolo SPI foi configurado no registrador DATA\_FORMAT de endereço = 0x31, no Bit (D6) para trabalhar com 4 fios em modo SPI. A máxima velocidade que pode ser utilizada com este dispositivo por este protocolo é de 5MHz. Correlacionando a comunicação SPI e I2C, a vantagem de utilizar este protocolo é atingir uma taxa de amostragem de dados de até 3,2 KHz, atendendo ao critério de Nyquist, sendo que com I2C taxa de amostragem é limitada a até 800Hz. Nesta proposta o acelerômetro foi configurado para trabalhar no modo escravo e o microcontrolador em modo mestre como pode ser observado na Figura 19 a seguir:

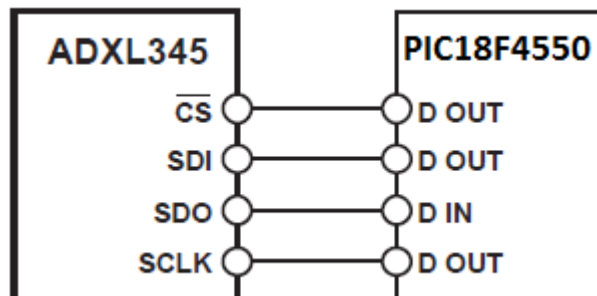


Figura 18: Diagrama do modo SPI 4 fios  
Fonte: Adaptado de ANALOG DEVICES (2015)

Com o auxílio do mapa de dados da Figura 20, o CS inicia em nível lógico alto. Após iniciar a transmissão, este nível lógico passa para o nível lógico baixo, e, ao terminar a transmissão, este nível volta para alto como seu estado inicial.

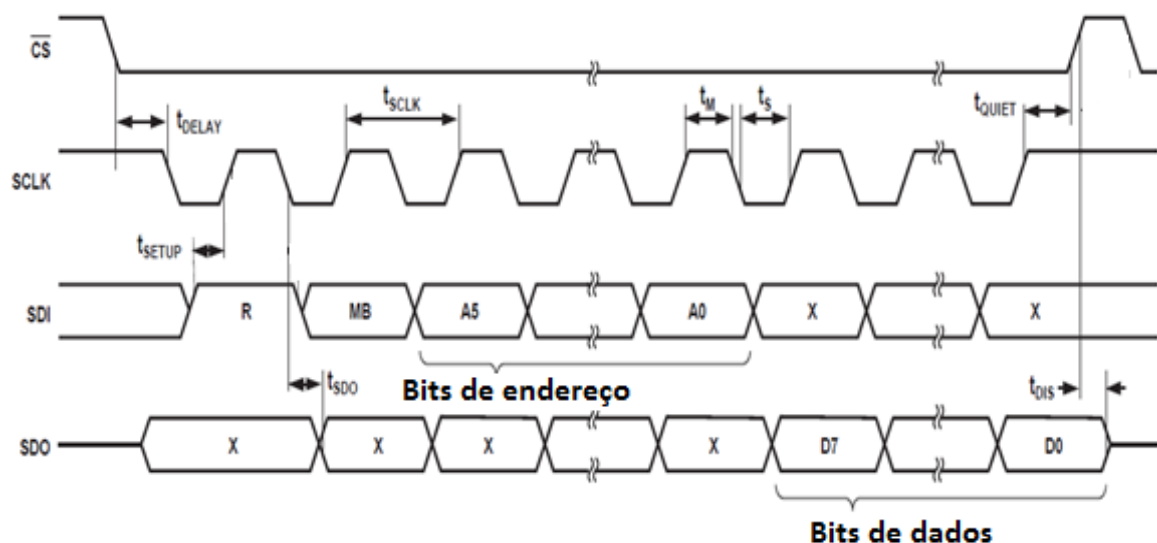


Figura 19: Mapa de do modo SPI 4 fios  
Fonte: Adaptado de ANALOG DEVICES (2015)

Ao passar o nível do CS para baixo, este habilita a inicialização da transmissão de dados, quando o *clock* estiver na transição na borda de subida, é inicializada a configuração dos registradores e logo após o envio dos dados pela SDO em sequência, conforme os bits da carta de tempos. O *clock* foi configurado para trabalhar com a frequência de 3Mhz, afim de atender os requisitos da taxa de amostragem de 3,2kHz.

O tempo de cada transição pode ser visto no quadro a seguir, conforme descreve a Analog Devices (2015).

Parâmetros	Limites		unit	Descrição
	Mínimo	Máximo		
$f_{SCLK}$		5	MHz	Frequência de <i>clock</i> pelo protocolo SPI
$t_{SCLK}$	200ns		Ns	Se dar por $1/(SPI \text{ frequência de } clock)$ .
$t_{DELAY}$	5		Ns	Atraso entre a borda de descida do CS e a borda de descida do <i>clock</i>
$t_{QUIET}$	5		Ns	tempo da leitura do ultimo bit para a borda de subida do CS.
$t_{DIS}$		10	Ns	tempo que desabilitar a leitura do SDO entre o início da borda de subida do CS e o fim o último bit de leitura.
$t_S$	$0.3t_{SCLK}$		Ns	Tempo do pulso de <i>clock</i> no estado de baixo
$t_M$	$0.3t_{SCLK}$		Ns	Tempo do pulso de <i>clock</i> no estado de alto
$t_{SETUP}$	5		Ns	Tempo para as configurações iniciais
$t_{SDO}$		40	Ns	Tempo de transição de estado do SDO/SDI no borda de descida do <i>clock</i>
$t_R^4$		20	Ns	Tempo de transição de alto para baixo referente a borda do SDO/SDI
$t_F^4$		20	Ns	Tempo de transição de baixo para alto referente a borda do SDO/SDI

Quadro 1: Descrição do mapa de tempo  
Fonte: adaptado de ANALOG DEVICES (2015)

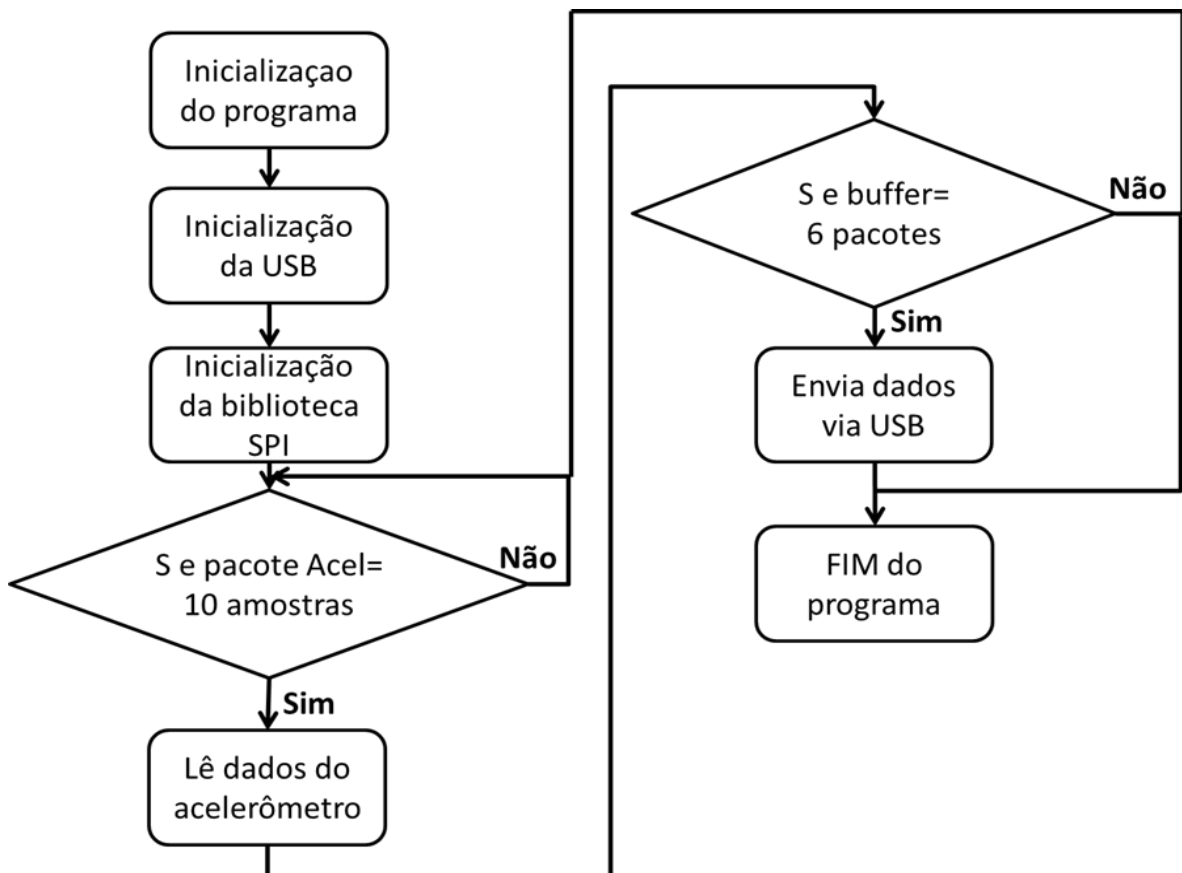
### 3.1.6 Protocolo de comunicação CDC

Este é um tipo de comunicação escolhido para transferência de dados deste projeto, pois abrange uma gama de sistema de comunicação que podem são conectados através deste protocolo, como por exemplo dispositivos de telefonia

conectados via USB, modems ADSL, adaptadores USB para Ethernet, entre outros. Esta facilita a comunicação entre aparelhos complexos em se comunicarem com um método simples pela USB. Esta emula uma porta COM virtual, o que simplifica a programação da interface de comunicação no PC, que possui as seguintes características, máxima velocidade de 80Kb/s, driver suporta o Windows 64bits, trabalha na versão USB 2.0. A aplicação deste protocolo forma uma ligação entre a USART e a USB, isto é, os dados são lidos de um dispositivo e enviado a outro (ATMEL, 2009, p. 3).

### 3.1.7 Programação do PIC18F4550

O fluxograma a seguir mostra em uma forma generalizada como os dados estão sendo processados pelo PIC18F4550.



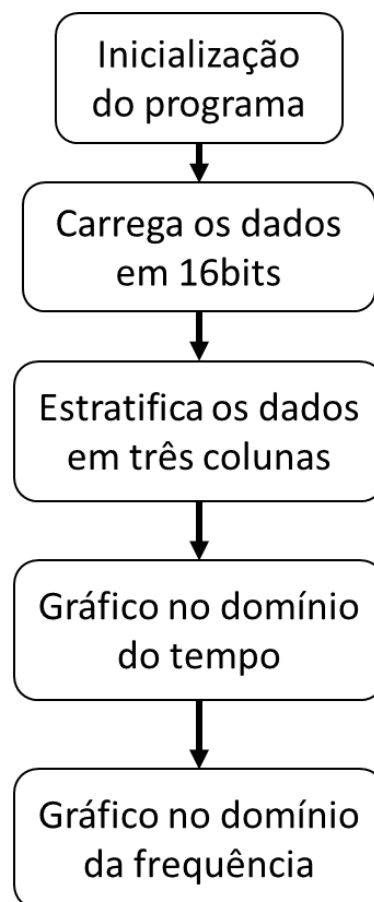
**Figura 20: Fluxograma de programação do microcontrolador**  
**Fonte: Autoria própria**

Na inicialização do programa e da USB, estão declarado as variáveis, registradores, e parâmetros de configuração do PIC18F4550, este microcontrolador

foi programado para trabalhar com cristal de 4Mhz, gerando um *clock* de 3Mhz para SCKL, esta USB foi programada para trabalhar em *Full-Speed* estimado em 12Mbps,

Logo após de inicializar a biblioteca SPI e habilitar seus registradores para comunicação entre o microcontrolador e o acelerômetro, este microprocessador é programado para recepção de dados, a velocidade de comunicação é programada para 3Mhz, no objetivo de atingir uma taxa de amostragem de dados a 3,2kHz, segundo definido no *datasheet* do acelerômetro ADXL 345 da Analog Devices (2015). Os dados do acelerômetro, estes foram parametrizados para serem enviados em pacotes 10 (dez) amostra de dados por transmissão, sendo que cada amostra contém os bits mais significativos e os bits menos significativos.

O microcontrolador recebe estes dados e guarda no *buffer*, se o este *buffer* possuir 6 pacotes de amostragem, que é igual a 6x10 amostragem totalizando 60 amostras guardadas pelo microcontrolador, este envia ao computador que trata pelo Matlab<sup>®</sup> onde é descrito na próxima etapa



**Figura 21: Fluxograma de programação no Matlab<sup>®</sup>**  
Fonte: Autoria própria

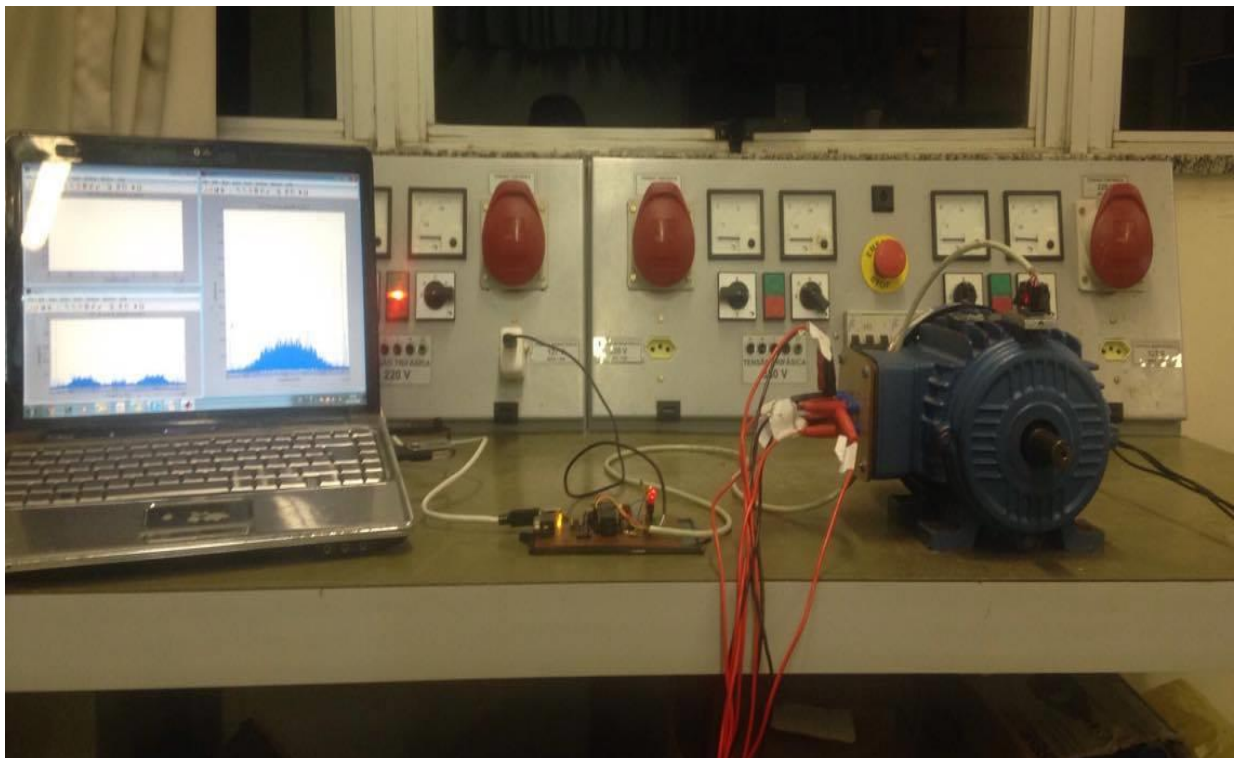
A segunda etapa deste programa é para análise, por meio dos gráficos plotados, o programa feito no Matlab<sup>®</sup> possui os seguintes passos descritos no fluxograma na Figura 22, inicializa o programa com as declarações de variáveis, carrega o arquivo em binário, somados cada eixo que contém os 8 bits menos significativos e os 8 bits mais significativos passando-os para 16 bits transcrevendo-os em números inteiros. Estes dados são estratificados em 3 colunas referentes aos eixos x, y e z e logo após plotados em um espaçamento de tempo de 1/3,2k referente a taxa de amostragem comentada nos tópicos anteriores.

As últimas etapas logo após dos dados processados plota-se os gráficos no domínio do tempo e no domínio da frequência.



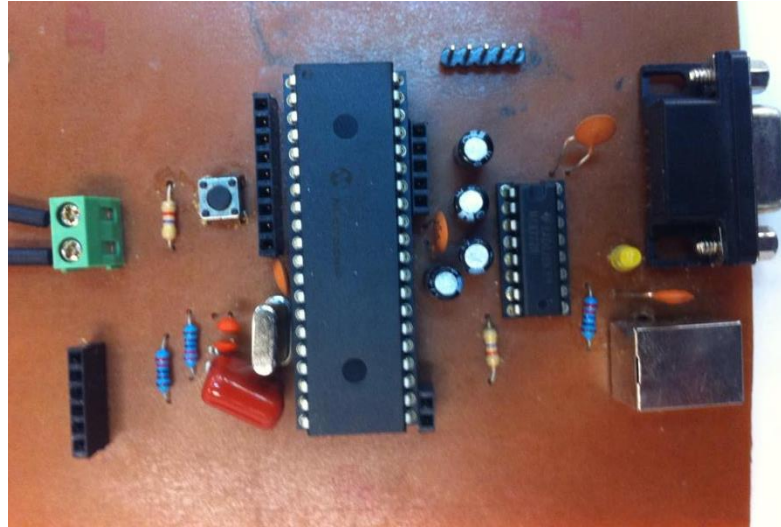
## 4 RESULTADOS

Nesta seção exibirá os ensaios e os resultados obtidos através desta aplicação e na figura a seguir mostra-se o protótipo do sistema de análise de vibração, aplicado ao MIT. Foram realizados 3 ensaios: o primeiro com o rolamento em estado normal, sem existência de falha, o segundo com um dos rolamentos com existência de falha intermediária na pista interna e o terceiro com falha severa no rolamento, nota-se que o sensor foi acoplado em uma das extremidades do motor, na proximidade do mancal, por meio do cabo coaxial há uma transferência de dados à placa de aquisição de dados, sendo estes sinais processados e enviados ao computador, onde é exibido por intermédio do Matlab<sup>®</sup>, este motor de indução trifásico foi ligado a 220V, possui 0,75kW (1cv), ligado em delta, direto na bancada de ensaio e funcionando sem carga. Na figura 24 e 25 pode-se observar a posição em que foi inserido o acelerômetro ao motor.



**Figura 22: Sistema de vibração acoplado ao MIT**  
**Fonte: Autoria própria**

A seguir a Figura 24 ilustra a placa de aquisição de dados finalizada.



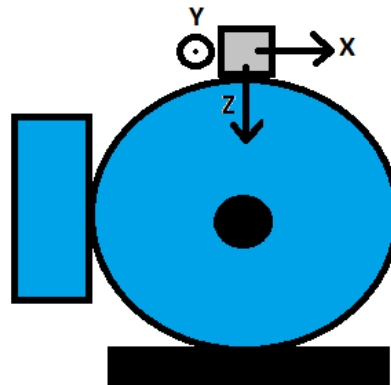
**Figura 23: Foto da placa de aquisição de dados**  
Fonte: Autoria própria

Nota-se na Figura 24 e Figura 25 o posicionamento do acelerômetro ao motor que este esquemático é importante afim de observar os resultados coletados e exibidos por meio do Matlab<sup>®</sup>.

Os resultados foram coletado em binários de 16 *bits* gerando-se um arquivo de extensão em txt. e carregados no Matlab<sup>®</sup>, afim de obter uma análise preliminar e no propósito de validar este trabalho.



**Figura 24: Posicionamento do acelerômetro ao MIT**  
Fonte: Autoria própria



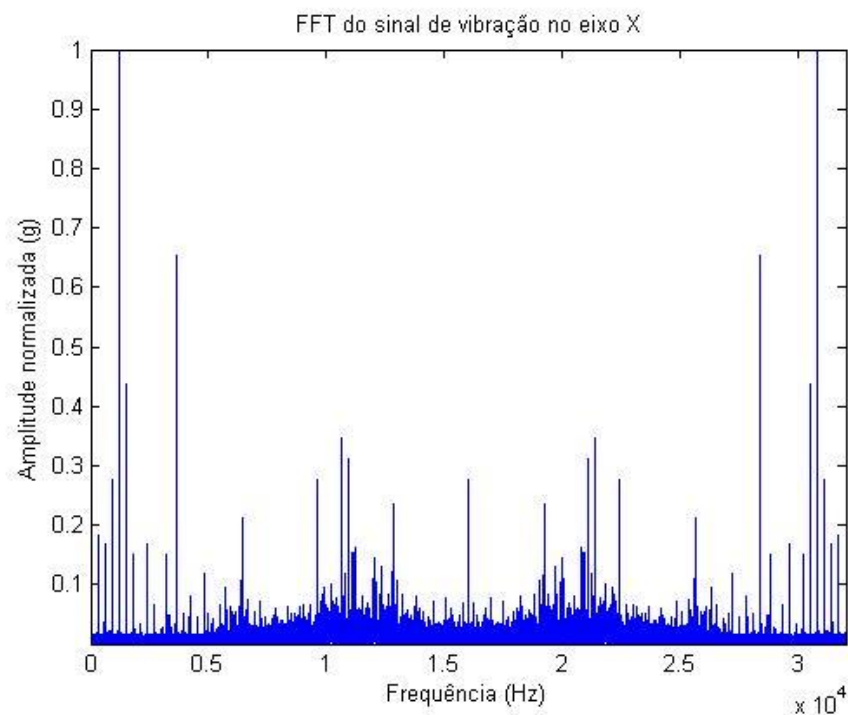
**Figura 25: Esquemático das direções de cada eixo do acelerômetro**  
**Fonte: Autoria própria**

O 1º ensaios foi realizado com o rolamento normal, sem existência de falha.

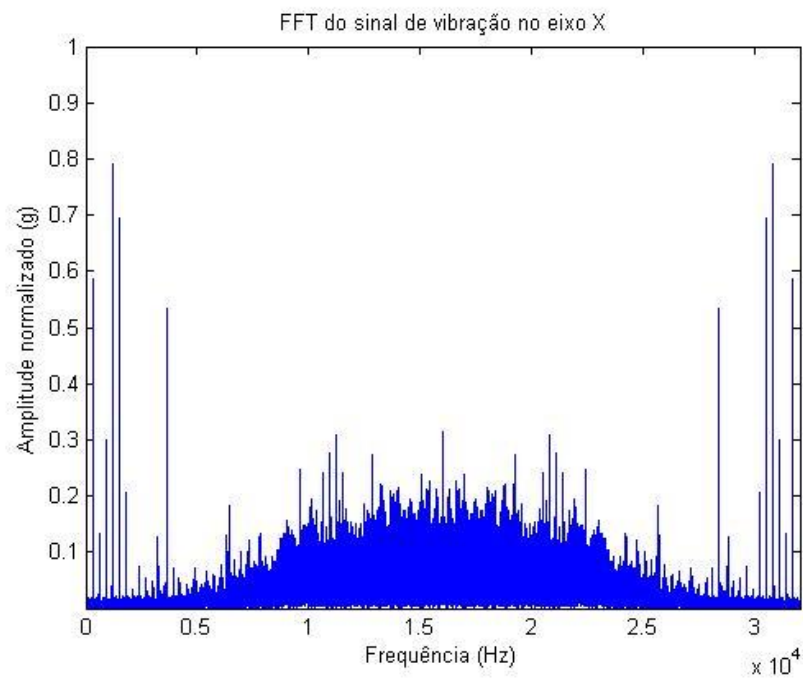
2º Ensaio: Neste teste foi trocado o rolamento do mesmo motor do 1º ensaio, por um rolamento com desgaste de intermediário, gerado por um curto de 50A, que produz pouca vibração.

3º Ensaio: Neste teste utilizou-se um o rolamento no mesmo motor dos ensaios anteriores, com severidade de desgaste de 1 hora, que produza vibração mais elevada.

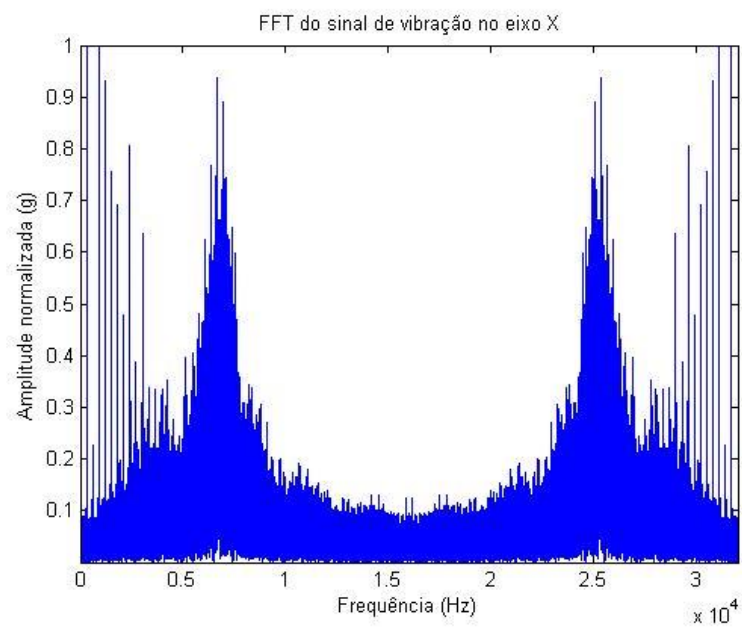
Evolução de falhas vista nos três ensaios na direção x:



**Figura 26: Gráfico FFT do sinal no eixo X, 1º ensaio**  
**Fonte: Autoria própria**

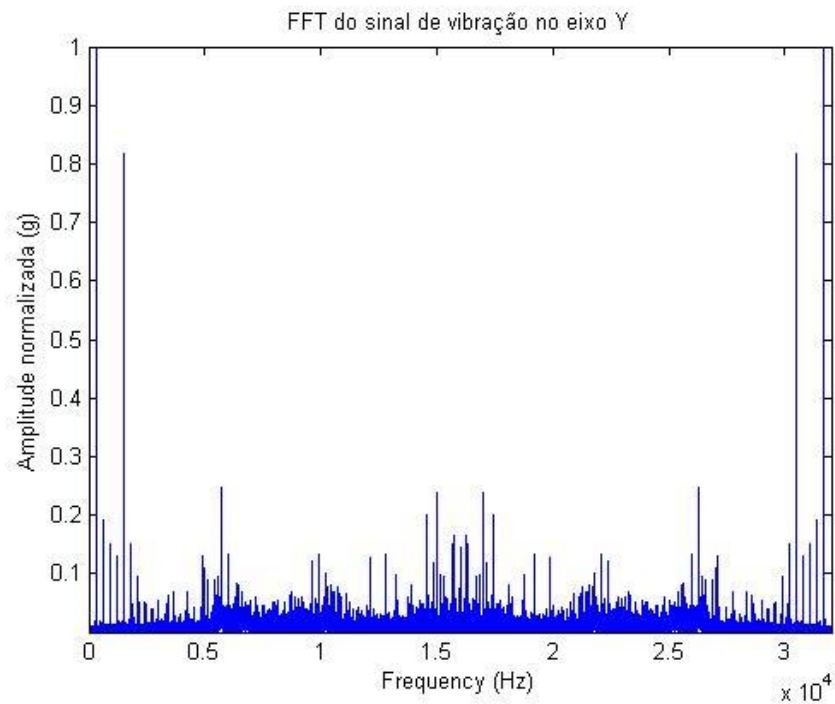


**Figura 27: Gráfico FFT do sinal no eixo X, 2º ensaio**  
Fonte: Autoria própria

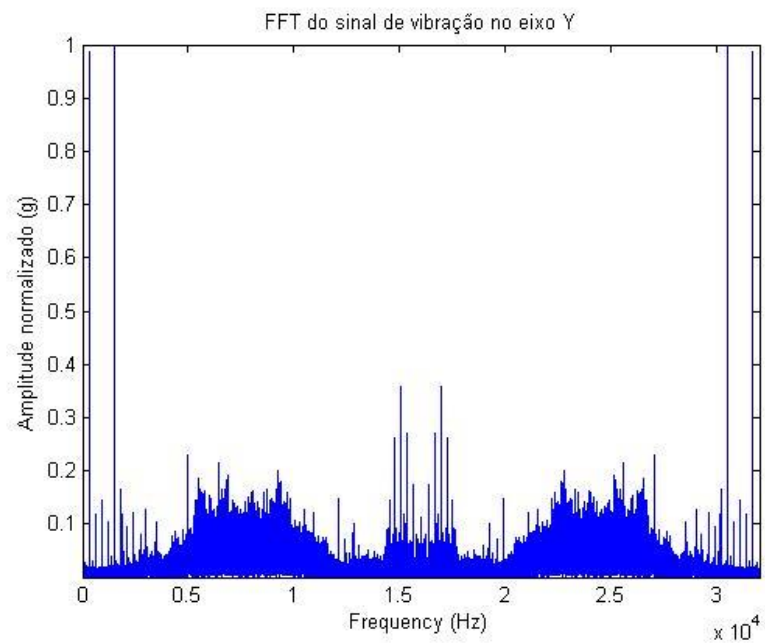


**Figura 28: Gráfico FFT do sinal no eixo X, 3º ensaio**  
Fonte: Autoria própria

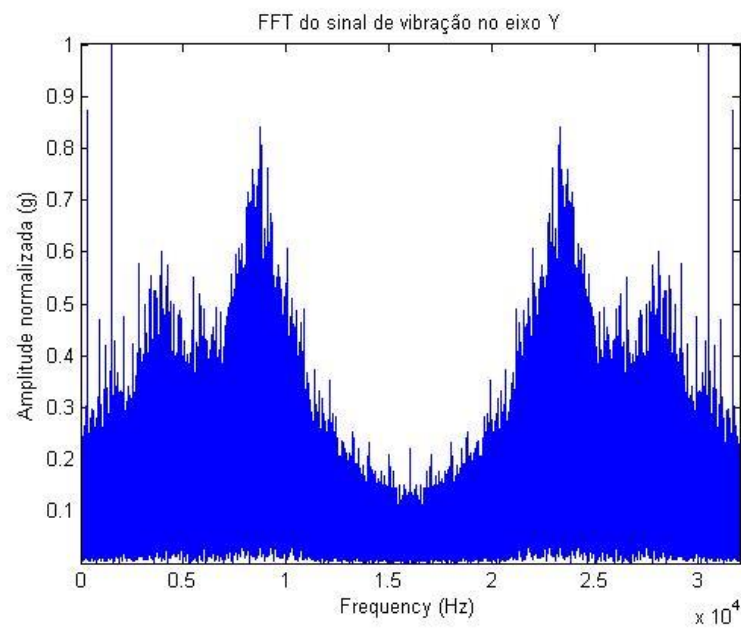
Evolução de falhas vista nos três ensaios na direção Y:



**Figura 29: Gráfico FFT do sinal no eixo Y, 1º ensaio**  
Fonte: Autoria própria

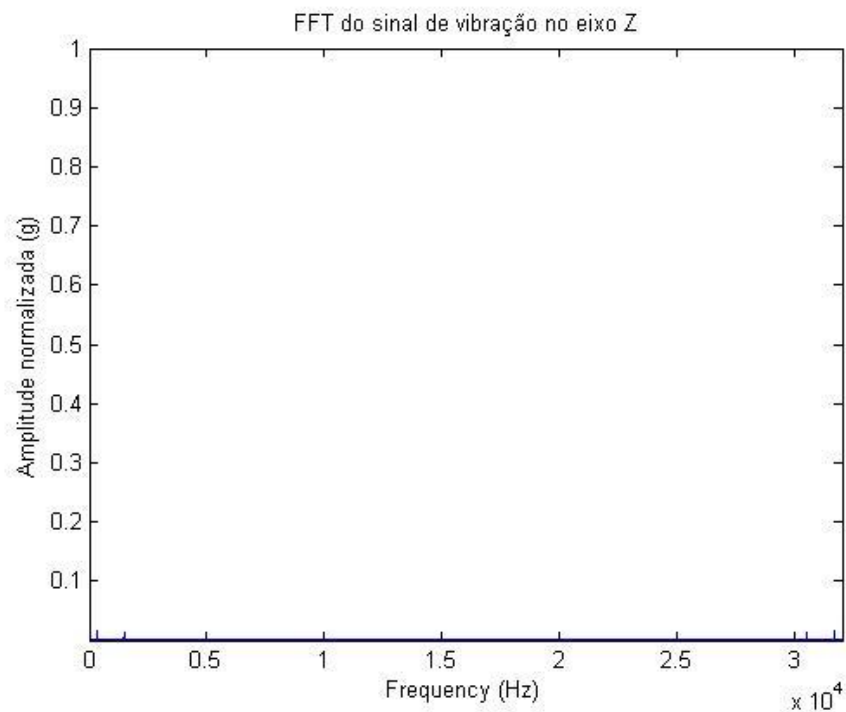


**Figura 30: Gráfico FFT do sinal no eixo Y, 2º ensaio**  
Fonte: Autoria própria

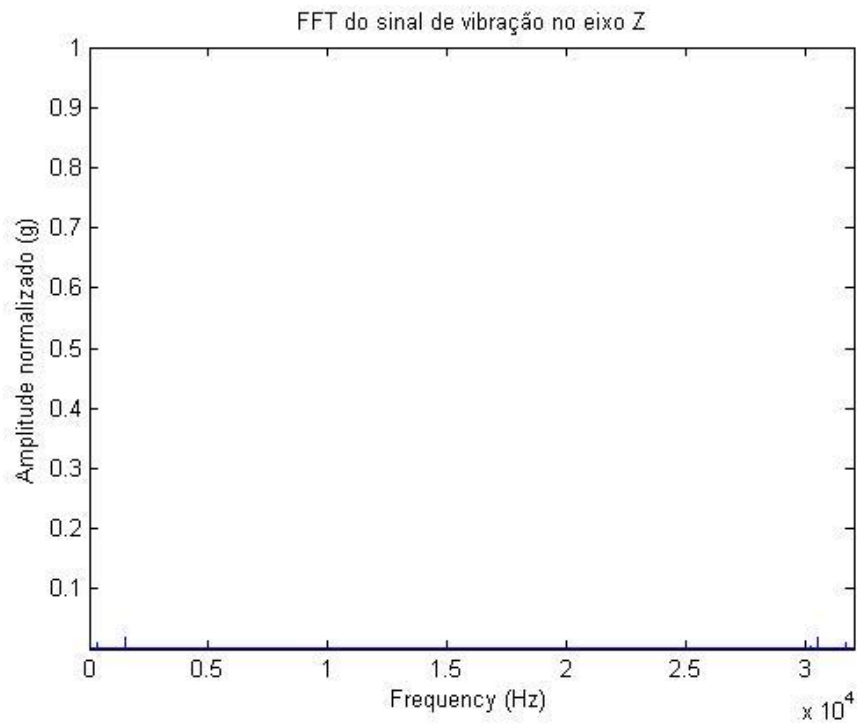


**Figura 31: Gráfico FFT do sinal no eixo Y, 3º ensaio**  
**Fonte: Autoria própria**

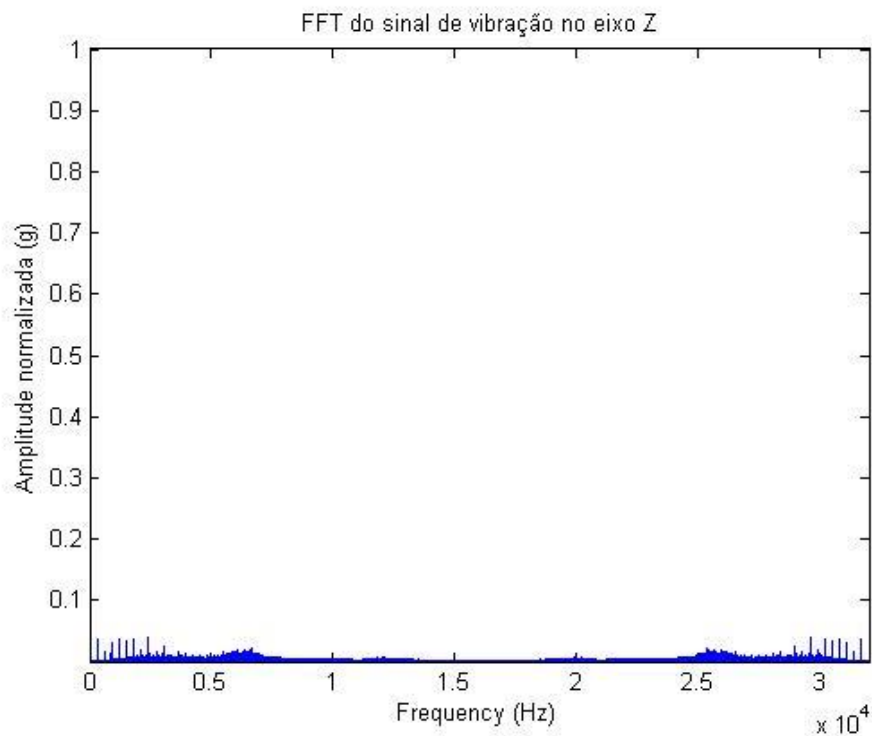
Evolução de falhas vista nos três ensaios na direção Y:



**Figura 32: Gráfico FFT do sinal no eixo Z, 1º ensaio**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 33: Gráfico FFT do sinal no eixo Z, 2º ensaio**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 34: Gráfico FFT do sinal no eixo Z, 3º ensaio**  
**Fonte: Autoria própria**

É possível identificar o comportamento anormal dos rolamentos pela análise da FFT, verifica-se um aumento de vibração por meio dos gráficos. Esta

vibração é captada pelo sistema de aquisição de dados, onde o sensor está acoplado na extremidade do motor, os referidos são tratados pelo Matlab<sup>®</sup>. Leva-se em consideração que o motor foi posto em funcionamento sem carga, e que neste trabalho foi aplicado apenas para uma falha na pista interna do rolamento, por meio dos gráficos verificou-se esta degradação, principalmente nos eixos X e Y.

Vale salientar que o programa não é em tempo real e este foi amostrado após coletar um banco de 10(dez) amostras para cada ensaio, a fim de certificar o comportamento dos sinais.

Pode-se apontar neste trabalho que a comunicação I2C não é viável, pois não garante os 3,2 KHz de frequência de amostragem do sinal, pois segundo a Analog Device (2015), com este protocolo atinge-se uma frequência de 800Hz de taxa de amostragem. Verificou-se também neste chip que existia um curto circuito na saída do SDO para um resistor de “0” Ohms ligado ao terra, Assim, o sinal não podia ser coletado e foi necessário retirar este resistor para que os dados fossem coletados utilizando o protocolo SPI, que garante os 3,2KHz necessários para estimar a falha.



## 5 CONCLUSÃO

Pôde-se verificar por meio dos resultados preliminares obtidos, que o sistema de leitura de sinais de vibração desenvolvido neste trabalho é promissor, pois foi capaz de efetuar a leituras de vibração das falhas de rolamento no motor de indução trifásico em três situações específicas.

Tal sistema de aquisição pode ser utilizado para o monitoramento do incremento da severidade de falhas no MIT, atuando na faixa de 3,2kHz com a sensibilidade de 16g. O tempo de cada coleta de amostra foi de 30 segundos e através da FFT plotado pelo Matlab<sup>®</sup> conseguiu-se inferir a severidade de cada falha.

Com isso pode-se concluir que este trabalho cumpriu parcialmente com os objetivos estabelecidos, sua utilização se beneficia no baixo custo, e um início para desenvolvimento de trabalhos futuros, que pode-se utilizar outro acelerômetro com uma faixa de amostragem maior, e aplicá-lo a demais falhas, tais como, falha no rotor, falha no estator e diversas outras falhas no rolamento.

## 6 REFERÊNCIAS

ANALOG DEVICES, Inc. **Manual do Acelerômetro digital**. Nowood, 2009–2015. 40p

ATMEL, USB CDC Driver Implementation. 2005 Disponível em: <<http://www.atmel.com/images/doc6269.pdf>> acesso em: 01 julho 2009.

ADITEQ, Pierri, R. A, **Curso de Treinamento Fundamentos de Vibrações Para Manutenção Preditiva**, 2ª ed abril 2006

BETTA, Giovanni; LIGUORI, Consolatina; PAOLILLO, Alfred; PIETROSANTO, Antonio. A IMP-based FFT-Analyzer for the Fault Diagnosis of Rotating Machine Based on Vibration Analysis, In: IEEE INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, Budapest, Hungria, v1, p. 572-577, maio.2001.

BELLINI, A.; FILIPPETTI, F.; TASSONI, C.; CAPOLINO, G. A. Advances in diagnostic techniques for induction machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v55 p.4109-4126, dec. 2008.

BONNETT, AUSTIN H; YUNG, C.. Increased efficiency versus increased reliability. **IEEE Industry Applications Magazine**. v14. p. 29-36, jan.2008.

BRITO, Claudio Marzo Cavalcante de. Modelagem computacional de Métodos de Partida de um Motor de Indução Trifásico no SIMULINK/MATLAB<sup>®</sup>. II CONGRESSO DE PESQUISA E INOVAÇÃO DA REDE NORTE NORDESTE DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA – CEFET-PI/UNED-Floriano, João Pessoa, 2007. 10p.

BRITO, J. N. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. 214 p.

CAMPBELL, Bruce H.; Siemens Energy & Autom. Inc. Failed motors-rewind or replace?. **IEEE Industry Applications Magazine**, Norwood, v3, p. 45- 50, 1997.

CHIA-CHOU, YEH; SIZOV, G.Y.; SAYED-AHMED, A.; DEMERDASH, N. A. O.; POVINELLI, R. J.; YAZ, E. E.; IONEL, D. M. Reconfigurable Motor for Experimental Emulation of Stator Winding Interturn and Broken Bar Faults in Polyphase Induction Machines. **IEEE Transactions Energy Conversion**, 2008. 10p.

FIGUEIREDO, Lúcia J; GAFANIZ, Ana R; LOPES, Gustavo S; PEREIRA, Rúben. **Aplicações de Acelerômetros**, Instituto Superior Técnico, Monografia, Lisboa, Portugal, dez. 2007.

GOEDEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, Paulo J A. **Load torque identification in induction motor using neural networks technique** (Qualis Engenharia IV). Electric Power Systems Research, São Carlos, Sp. v.77, p35-45, 2007.

LAMIM FILHO, Paulo Cezar Monteiro. **Monitoramento Permanente de Motores de Indução Trifásico**. Tese- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 148 p

LIMA, Jeferson J. de; BURGARDT, Israel; PONTES, José C. A. de. **Uma abordagem prática da utilização da técnica de análise de vibração utilizando a Transformada de Fourier em acelerômetro**. Encontro de Engenharia e Tecnologia de Campos Gerais. 2013. 11p.

MARUTHI, G.S.; HEGDE, V. Preliminary Investigation on Bearing Fault Analysis in Three Phase Induction Motor by MEMS Accelerometer. ADVANCES IN ELECTRONICS, COMPUTERS AND COMMUNICATIONS, INTERNATIONAL CONFERENCE, Bangalore, 2014. 6p.

NAGHSHINEH, S; AMERI, Golafsoun; ZERESHKI, Mazdak; KRISHNAN, S; ABDOLI-ERAMAKI, M. **Human Motion capture using Tri-Axial accelerometers**. [S.L]:[s.n], [2009]. Disponível em: <<http://edge.rit.edu/content/P10010/public/PDF/HME.pdf>>. Acesso em: 8 out. 2015. 49p.

OPPENHEIM, A. V., Schafer, R. W. **Digital Signal Processing, London Prentice Hall International**, 1975.

PATSKO, Luís Fernando; BOHR; MAXWELL. **Tutorial Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**, 2006

PEREIRA, Fábio. **Microcontrolares PIC: Programação em C**. 7ed. São Paulo: Érica LTDA., 2010

RAJ, Vineetha P; NATARAJAN, K; GIRIKUMAR, T. G. Induction Motor Fault Detection and Diagnosis by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer. INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TRENDS IN COMMUNICATION,

CONTROL, SIGNAL PROCESSING & COMPUTING APPLICATIONS (C2SPCA), p. 10-11, oct. 2013

SUETAKE, M. **Sistema Inteligentes para Monitoramento e Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012. 126 p.

TSYPKIN, Mikhail, Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique - a Practical Implementation. IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE (IEMDC). 2011. 411 f.

VITOR, A. L. DE O.; OLIVEIRA, F. M. DE; RONQUI, L. A.; GOEDTEL, A.; SCALASSARA, P. R.; SILVA, SÉRGIO A. O. DA, VALLIM, M. B. R. Detecção De Falhas Elétricas Em Motores De Indução Utilizando Rede *Radial Basis Function*. ANAIS DO XX CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA BELO HORIZONTE, MG, Set. de 2014.

XENOS, Harilaus G. **Gerenciando a Manutenção Produtiva: O Caminho para Eliminar Falhas nos Equipamentos e Aumentar a Produtividade**. Belo Horizonte: EDG desenvolvimento de gerencia, 2005. 305p.

WEG, Motores Elétricos: Linhas de Produtos Características Especificações Instalações Manutenções. 2005 Disponível em: <<http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/Catalogo%20de-%20Motores.pdf>> acesso em: 26 setembro 2015.

YAVNE, R. An economical method for calculating the discrete Fourier transform. PROC. AFIPS FALL JOINT COMPUTER CONF. 33, 1968. 12p.

MICROCHIP Technology. **PIC18F4550 Data Sheet 14-Pin, Flash-Based 8-Bit. CMOS Microcontrollers**. 2010. Datasheet. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40039F.pdf>>. Acesso em: 29 de jul. de 2015.