

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL  
TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL**

**CARLOS ANDRE FERREIRA**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICO UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA - PR**

**2019**

**CARLOS ANDRE FERREIRA**

**SISTEMA DE MONITORAMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICO UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em manutenção industrial do COMIN-Coordenação do curso de tecnologia em manutenção industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Hilson Henrique Daum  
Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Henrique Granza

**GUARAPUAVA - PR**

**2019**



---

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

### **SISTEMA DE MONITORAMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO**

**POR**

**CARLOS ANDRÉ FERREIRA**

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 12 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de tecnólogo em manutenção industrial. O candidato foi arguido pela banca examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a banca examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

HILSON HENRIQUE DAUM  
PROF. ORIENTADOR

---

MAURÍCIO MARLON MAZUR  
MEMBRO TITULAR

---

ARTHUR HIRATA BERTACHI  
MEMBRO TITULAR

---

MSC RICARDO VINÍCIUS BUBNA BISCAIA  
COORDENADOR DE CURSO

- A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE ARQUIVADA NA SECRETARIA  
ACADÊMICA -

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, pelo dom do discernimento para chegar ate aqui e por fortalecer-me a cada dia.

Aos meus pais João e Soeli, pelo empenho e dedicação que tiveram ao longo de minha vida, sempre me amparando quando eu pensava em desistir dos meus sonhos.

Aos meus irmãos e irmãs por estarem incentivando em todas as etapas dessa jornada.

A minha esposa Adriana e o meu filho João Francisco, por ser a real motivação da minha vida, por andarem ao meu lado mesmo nos dias mais difíceis dessa caminhada.

Aos meus professores do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial que com de seus ensinamentos permitiram que eu pudesse hoje estar concluindo este trabalho, em particular ao meu orientador, Prof. Hilson, que me acompanhou durante vários meses, dando o auxílio necessário para a elaboração deste trabalho.

A toda Coordenação e Secretaria do curso, por toda a disponibilidade. Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse projeto.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.3 JUSTIFICATIVA.....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS.....	16
2.2 MONITORAMENTO DE PARÂMETROS.....	19
2.2.1 Parâmetro de vibração.....	19
2.2.2 Parâmetro de Corrente Elétrica .....	21
2.2.3 Parâmetro de temperatura .....	22
2.3 TIPOS DE MONITORAMENTO .....	24
2.3.1 Monitoramento subjetivo.....	24
2.3.2 Monitoramento objetivo.....	25
2.3.3 Monitoramento contínuo .....	25
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
3.1 MATERIAIS.....	26
3.1.1 Arduino .....	26
3.1.2 Sensor de temperatura .....	27
3.1.3 Sensor de vibração .....	28
3.1.4 Sensor de corrente .....	29
3.1.5 Custo e aquisição dos componentes .....	31
3.1.6 Medidores de referência .....	31
3.1.7 Motor utilizado para análise .....	33
3.2 METODOLOGIA .....	33
3.2.1 Programação do arduino .....	33
3.2.2 Aquisição de dados PLX-DAQ.....	34
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>36</b>
4.1 AQUISIÇÃO DO PARAMETRO DE CORRENTE .....	37
4.2 AQUISIÇÃO DO PARAMETRO DE TEMPERATURA .....	38
4.3 AQUISIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM COMPARAÇÃO COM O FLUKE.....	39
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>44</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	45
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de especificações para motores.....	17
Figura 2 - Visão geral de um MIT tipo gaiola.....	18
Figura 3 - Imagem temperatura externa de um motor.....	23
Figura 4 - Temperatura interna do enrolamento.....	24
Figura 5 - Placa do Arduino Atmega 2560 .....	26
Figura 6 - Sensor de temperatura MAX6675.....	28
Figura 7 - Sensor de vibração Gy521 MPU6050.....	29
Figura 8 - Sensor SCT 013 – 100 A .....	30
Figura 9 - Diagrama de ligação do resistor de carga.....	31
Figura 10 - Alicate amperímetro Minipa ET-3111 .....	32
Figura 11 - Vibration Tester.....	32
Figura 12 - Termômetro Cason CA-380 .....	33
Figura 13 - Motor e placa de identificação .....	33
Figura 14 - Interface da plataforma de aquisição de dados .....	35
Figura 15 - Interface do sistema de monitoramento contínuo .....	36
Figura 16 - Corrente elétrica do motor .....	37
Figura 17 - Comparativo entre alicate e sistema.....	38
Figura 18 - Temperatura externa do motor .....	39
Figura 19 - Comparação de temperatura .....	39
Figura 20 - Aceleração nos eixos X, Y, Z .....	40
Figura 21 - Aceleração eixo X Gy521.....	41
Figura 22 - Aceleração Fluke eixo X .....	41
Figura 23 - Aceleração eixo Y Gy521.....	42
Figura 24 - Aceleração Fluke eixo Y .....	42
Figura 25 - Aceleração eixo Z Gy521 .....	43
Figura 26 - Aceleração Fluke eixo Z.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de vibração.....	21
Tabela 2 - Descrição da placa arduino atmega2560.....	27
Tabela 3 - Lista de componentes .....	31

## LISTA DE SIGLAS

A	Ampére
a	Aceleração
C	Coulomb
°C	Celsius
CI	Circuito impresso
CV	Cavalo-Vapor
F	Frequência
g	Aceleração gravitacional
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
IDE	Integrated Development Environment
ISO	International Organization for Standardization
Kw	Quilowatt
MIT	Motor de indução trifásico
MHz	Megahertz
Mw	Megawatt
PCI	Placa de circuito impresso
PWM	Pulse Width Modulation
Q	Carga
RPM	Rotação Por Minuto
t	Tempo
TC	Transformador de corrente
Usart	Porta serial
USB	Universal Serial Bus
V	Volts
v	Velocidade
W	Watts
$\omega$	Velocidade angular
$\Delta t$	Variação de temperatura

## RESUMO

FERREIRA, Carlos Andre. **Sistema de monitoramento em motores de indução trifásico utilizando a plataforma arduino.** 45 f. Projeto de pesquisa - Curso superior de Tecnologia em manutenção industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

O projeto desenvolvido consiste na implantação de um sistema de monitoramento contínuo e aquisição de dados de parâmetros em motores elétricos. A proposta deste dispositivo é auxiliar na manutenção preditiva obtendo informações determinantes para prever o estado de conservação do equipamento. A construção desse sistema é baseada na tecnologia da plataforma arduino em conjunto com os sensores de corrente, temperatura e vibração. A aquisição de dados realizada pelo sistema é obtida através da leitura de sinais recebidos na porta COM do computador e armazenados no editor de planilhas Excel. O baixo custo do projeto e os resultados satisfatórios obtidos são os principais fatores que demonstram a viabilidade desse sistema.

**Palavras-chave:** Monitoramento. Aquisição de dados. Manutenção preditiva.

## ABSTRACT

FERREIRA, Carlos Andre. **Monitoring system in three phase induction motors using arduino platform.** 45 p. Research Project - Technology course in industrial maintenance. Federal Technological University of Paraná, Guarapuava, 2019.

This developed project consists in the implementation of a continuous monitoring system and in parameter data acquisition of electric motors. The purpose of this device is to assist in the predictive maintenance, obtaining determining information to predict the conservation status of the equipment. The construction of this system is based on the technology of Arduino platform, combined with current, temperature and vibration sensors. The data acquisition from the system will be obtained by reading the signals that will be received from the computer's COM port, stored in an Excel spreadsheet. The low cost of the project and the achievement of satisfactory results are the main factors that demonstrate the viability of this system.

**Keywords:** Monitoring. Data acquisition. Predictive maintenance.

## 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento constante do setor industrial torna-se perceptível a presença dos motores elétricos, pois estão presentes na maior parte dos processos produtivos dentro das plantas industriais, onde existe a necessidade de transformar a energia elétrica em mecânica (CAPELLI, 2013).

Dado o crescimento as empresas de pequeno porte nos diversos setores produtivos industriais, alguns fatores como o controle de gastos com a manutenção de equipamentos é fundamental para que se mantenham no mercado atingindo seu objetivo produtivo. A manutenção e o acompanhamento desses equipamentos são de extrema importância, sendo a empresa de pequeno, médio ou grande porte produtivo, visto que ele evita desperdícios e ainda aumenta sua lucratividade.

Quase todo o equipamento é composto por um motor seja ele monofásico, trifásico de corrente alternada ou de corrente contínua. Na indústria geralmente utilizam-se motores trifásicos de corrente alternada, pois a sua robustez apresenta o melhor custo benefício comparado com os outros tipos de motores (GONÇALEZ, 2007).

Quando se trata da manutenção desses motores é necessário levar em consideração fatores externos como causadores de possíveis falhas, desalinhamento, desbalanceamento, sobrecorrente, super aquecimento entre outras causas que influenciam tanto no processo produtivo quanto no funcionamento e na vida útil desse motor. Com objetivo de melhorar as condições dos equipamentos é essencial que haja o monitoramento desses parâmetros.

Toda empresa precisa de um sistema de monitoramento contínuo para que se obtenha o maior controle do processo aumentando sua competitividade, melhorando os “três pilares” de processo: qualidade, redução de custo operacional e melhor desempenho de produção (CAPELLI, 2013).

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de baixo custo para monitoramento contínuo de parâmetros de temperatura, corrente elétrica e vibração em motores de indução trifásico utilizando a plataforma Arduino.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Monitorar parâmetros de vibração, corrente e temperatura em motores de indução trifásico utilizando a plataforma arduino em conjunto com sensores apropriados e realizar aquisição de dados em planilhas no Excel.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a programação na plataforma arduino;
- Elaborar o diagrama esquemático do sistema;
- Instalar e monitorar os sensores no motor de indução;
- Realizar aquisição de dados no Excel;
- Convalidar os dados obtidos com sistemas comerciais de medição;

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Conceitua-se o desempenho do suporte de manutenção como “A capacidade de uma organização de manutenção prover, sob demanda, os recursos necessários para manter um item sob condições especificadas e de acordo com uma dada política de manutenção” (ABNT, 1994).

As falhas em equipamentos industriais é algo normal ao longo de sua vida útil, porém a disponibilidade dessa máquina impacta diretamente no processo produtivo que ela realiza. Sabemos que a máquina parada por falta de manutenção além do custo com reparo do equipamento também agrega a despesa com o processo de produção parado (KARDEC E NASCIF, 2015).

Uma das formas para diminuir o risco de falhas em equipamentos industriais é realizando a manutenção preditiva. Utilizando inspeções como análise de vibrações, monitoramento da temperatura e corrente elétrica que circula no enrolamento do motor.

Utilizar componentes com baixo custo de implantação e utilizar softwares de armazenamento e monitoramento de dados. Além disso, aperfeiçoar e auxiliar a manutenção preditiva, pois o sistema envia os dados dos sensores para o Excel, gerando gráficos das variáveis de temperatura, corrente e vibração. Isso é essencial

para aumentar a confiabilidade do equipamento consequentemente aumentando assim a sua disponibilidade produtiva.

Detectar antecipadamente possíveis falhas em máquinas industriais se torna indispensável para aumentar a vida útil e a confiabilidade do equipamento. A detecção e o diagnóstico de falhas são itens significativos para evitar paradas inesperadas e altos custos operacionais (SUBHASIS NANDI E LII, 2005).

Existem diferentes técnicas para diagnosticar falhas em motores de indução trifásicos, que aplicadas com ferramentas disponíveis para o monitoramento, aumentam a disponibilidade e prolonga a vida do equipamento.

Diferentes produtos comerciais concebidos para monitorar os parâmetros dos motores de indução não são rentáveis, quando usados em motores típicos de baixa e média potência. Esses sistemas de monitoramento são avançados sensores e algoritmos com tecnologia para detectar as falhas no período inicial (CAPELLI, 2013).

Para mudar o conceito que a alta cúpula administrativa de grandes empresas apresenta sobre a manutenção, há uma necessidade de que os gestores apresentem soluções para que as atividades consideradas como despesas, sejam notadas como ações lucrativas para o setor (NEPOMUCENO, 1989).

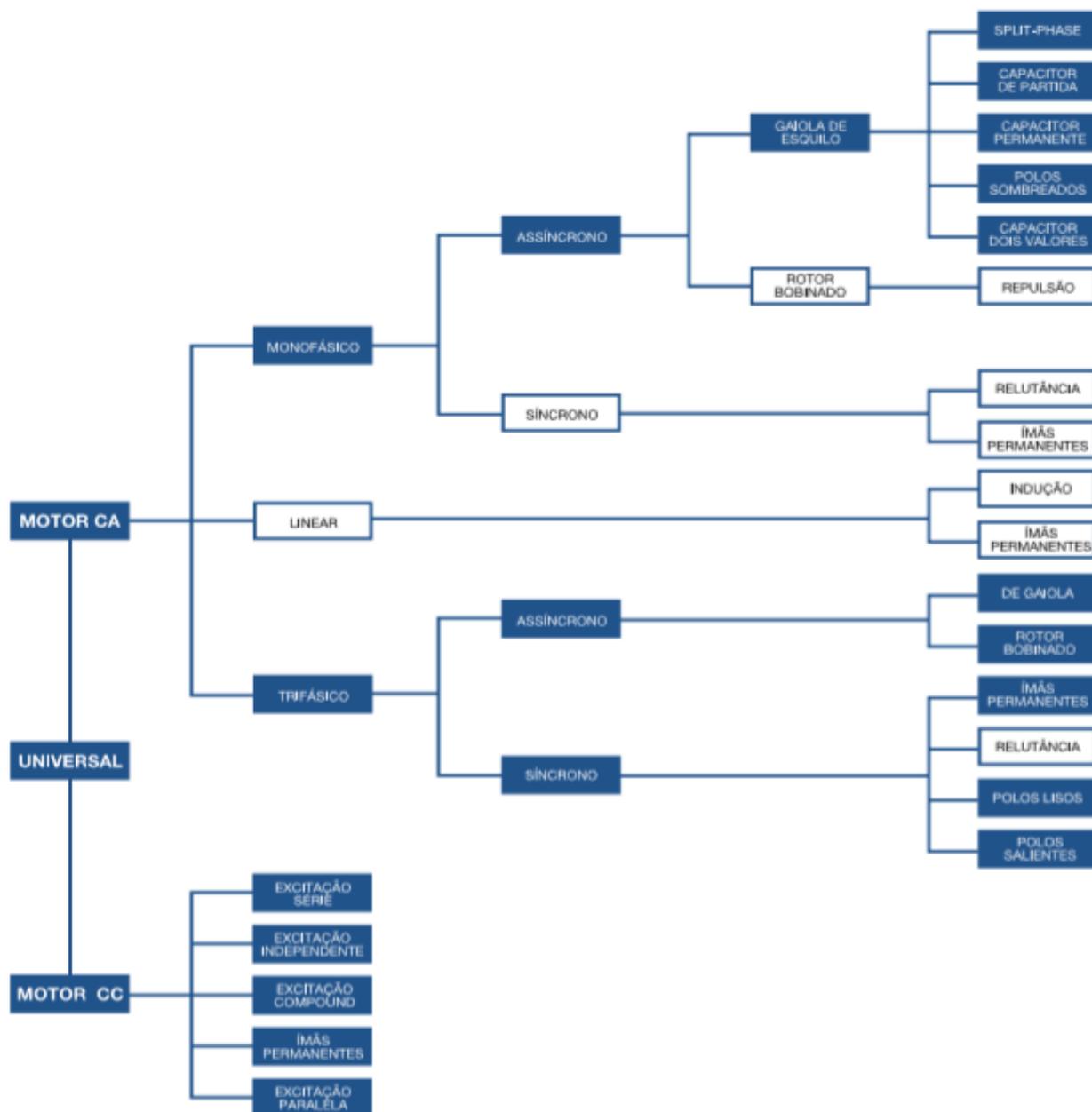
## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo tem por finalidade apresentar os fundamentos teóricos de todos os equipamentos, dispositivos e sistema de aquisição de dados tratados neste trabalho, de modo que suas características de funcionamento e os resultados obtidos sejam compreendidos.

### 2.1 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

O motor de indução trifásico também conhecido por MIT é o mais utilizado em plantas industriais pela sua robustez, vantagens como custo, consumo de energia e fácil manutenção, fatores que impactam diretamente em seu ciclo de vida (CAPELLI, 2013).

Existe no mercado para cada tipo de aplicação um motor específico, sendo eles os motores de corrente contínua ou de corrente alternada, na Figura 1 é apresentado um fluxograma com todos os tipos. Informações como potência nominal, tensão de ligação, número de polos, tipo de carcaça são essenciais para dimensionar corretamente o motor.



**Figura 1 - Fluxograma de especificações para motores**  
 Fonte: WEG Motores

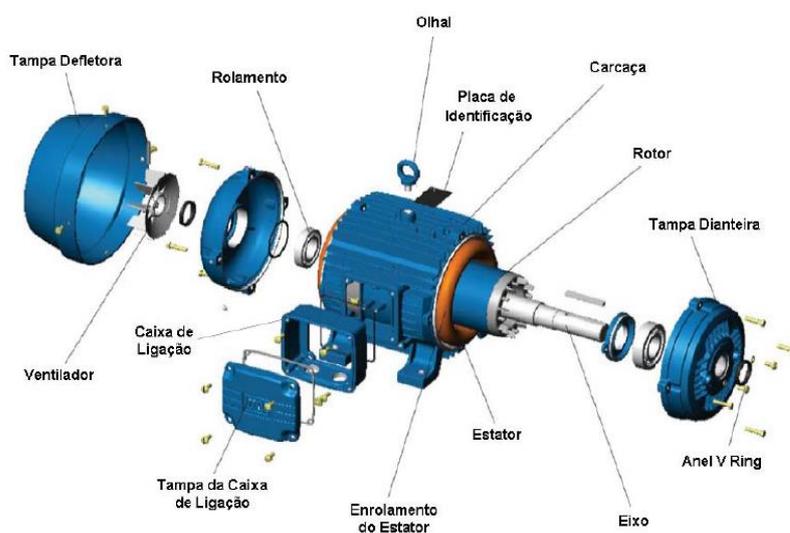
Os motores de corrente contínua possuem custo mais elevado e, além disso, precisam ser alimentados em uma fonte de corrente contínua, ou seja, converter a corrente alternada em contínua. Estes motores funcionam com velocidade ajustável entre amplos limites e apresenta controles de grande flexibilidade e precisão. Por

isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação e da manutenção (WEG MOTORES, 2017).

Os motores de corrente alternada são os mais utilizados dentro das plantas industriais, consideradas por sua robustez, simplicidade e baixo custo se dividem em motores síncronos e de indução.

O motor síncrono funciona com velocidade fixa, sem interferência do escorregamento. Utilizado normalmente para grandes potências devido ao seu alto custo em tamanhos reduzidos. Motor de indução funciona normalmente com uma velocidade constante, que varia ligeiramente com a carga mecânica aplicada ao eixo (WEG MOTORES, 2017).

Na figura 2 pode ser visualizado um motor em vista explodida de um MIT com seus principais componentes individuais. O MIT é composto basicamente por duas partes principais, sendo estator e rotor. O estator que é a parte estacionária e rotor a parte rotativa. Componentes como rolamentos, tampa defletora, carcaça, eixo, ventilador, enrolamento, completam todo o conjunto (CAPELLI, 2013).



**Figura 2 - Visão geral de um MIT tipo gaiola**  
**Fonte: Catálogo WEG**

Existem dois tipos diferentes de rotores de motor de indução, sendo rotor de gaiola de esquilo e rotor bobinado. O rotor tipo gaiola de esquilo é constituído por barras condutoras colocadas em serie e encaixadas em ranhuras na superfície do rotor, elas são postas em curto-circuito em suas extremidades pelos chamados anéis. Já o rotor bobinado possui um conjunto de enrolamentos parecido com o do

estator. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas (CHAPMAN, 2013).

Ao alimentar o enrolamento do estator, uma tensão é induzida no enrolamento do rotor. Esse campo eletromagnético entre estator e rotor faz com que ocorra o movimento (CHAPMAN, 2013).

## 2.2 MONITORAMENTO DE PARÂMETROS

Para aumentar a vida útil de motores elétricos é indispensável o acompanhamento de variáveis que impactam diretamente no seu funcionamento. A análise contínua dos parâmetros de vibração, corrente e temperatura tornam-se fundamentais para diagnosticar possíveis falhas em motores elétricos.

### 2.2.1 Parâmetro de vibração

A vibração é vista por muitos como um vilão, pois resulta em transmissão de forças excessivas no equipamento muitas vezes não previsto, causando desgaste prematuro em diversos componentes do mesmo (FILHO 2013).

O monitoramento e análise de vibração faz parte do método preditivo de manutenção que é considerado um dos mais importantes para a conservação do equipamento. A grande importância do acompanhamento de vibrações está voltada para equipamentos rotativos, onde os métodos e instrumentos utilizados em conjunto com software de apoio estão sendo aplicados para monitoramento (KARDEC E NASCIF, 2015).

Com o avanço tecnológico o monitoramento automatizado possui a capacidade de gerenciar as condições e avaliar as possíveis falhas de um determinado equipamento muito antes de ocorrer a parada da máquina (MITCHELL, 2007).

Há certa complexidade no estudo de vibrações, pois cada equipamento possui diferentes aspectos estruturais e necessita de uma análise detalhada para cada caso (FILHO 2013).

O motor elétrico de indução possui um valor de fator de potência, ou seja, o quanto da energia consumida por ele esta sendo convertida em trabalho, porém

existem perdas por diferentes em alguns motivos, a vibração é considerada uma perda, pois a energia é dissipada através dela.

As variáveis que definem a vibração do equipamento são: o deslocamento (Equação 1), velocidade (Equação 2), frequência e aceleração (Equação 3). Todas estas representam a quantidade de vibração do equipamento, podendo ser possível identificar a origem e sua causa.

$$\text{Deslocamento } x = A \sin \omega t \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{Velocidade } v = A\omega \cos \omega t = dx/dt \quad \text{ou} \quad v = 2\pi.f. A \text{ (rad/s)} \quad \text{Equação (2)}$$

$$\text{Aceleração } a = -A\omega^2 \sin \omega t = dv/dt \quad \text{ou} \quad a = (2\pi.f)^2.A \text{ (m/s}^2\text{)} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

A = amplitude do vetor de zero a pico (mm)

$\omega$  = velocidade angular (rad/s)

t = tempo (s)

f = frequência (Hz)

Ao saber o valor da constante da amplitude de deslocamento pode-se aplicar nas equações 1, 2, 3 e verificar qual a melhor variável deverá ser monitorado (KARDEC E NASCIF, 2015).

O monitoramento contínuo em equipamentos utilizando medidores fixos que alimentam um sistema com informações em tempo real e possibilita acessar os dados do equipamento remotamente (FILHO, 2013).

Com a evolução dos sistemas digitais e de novas tecnologias, a portabilidade se tornou algo cada vez mais desejado no mercado. Quanto menor e mais portátil um aparelho se torna, realizando as mesmas funções de seus antecessores, mais ele atende as expectativas do mercado (FILHO, 2013).

Na tabela 1 é especifica diferentes classes para cada tipo de maquinas, ela é dividida em quatro classes e classificada em quatro níveis de criticidade (ISSO 20816-1 2016).

**Tabela 1 - Classificação de vibração**

R.m.s vibration velocity mm/s	class I	class II	class III	class IV
0,28	A	A	A	A
0,45	A	A	A	A
0,71	A	A	A	A
1,12	B	A	A	A
1,8	B	B	A	A
2,8	C	B	B	A
4,5	C	C	B	B
7,1	D	C	C	B
11,2	D	C	C	C
18	D	D	D	C
26	D	D	D	D
45	D	D	D	D

Fonte: Adaptado de IEC Motor Service Manual

- Classe I: motores individuais acoplados a máquinas individuais operando em condições normais. (Máquinas de produção até 15 kW são típicos exemplos desta).
- Classe II: Máquinas de tamanho médio (tipicamente motores elétricos de 15 a 75 kW) sem fundações especiais, rigidamente montados ou máquinas (até 300 kW) em fundações especiais.
- Classe III: Movimentadores primários grandes e outras máquinas com grandes massas rotativas e fundações pesadas que são relativamente rígidas em relação a direção da medição de vibração.
- Classe IV: Movimentadores primários grandes e outras máquinas com grandes massas rotativas e fundações pesadas que são relativamente frouxas em relação a direção da medição de vibração. (Ex.: Conjuntos turbo geradores e turbinas a gás com saídas maiores que 10 MW).

### 2.2.2 Parâmetro de Corrente Elétrica

O movimento ou fluxo de elétrons é chamado de corrente. Para se produzir a corrente, os elétrons devem ser deslocados pelo efeito de uma diferença de potencial (GUSSOW, 2009).

A corrente elétrica é representada pela letra (I), e sua unidade de medida em ampère (A). Define-se que um ampère é o deslocamento de um Coulomb através de um condutor em um intervalo de um segundo. Os conceitos mencionados são descritos na Equação (GUSSOW, 2009).

$$I = Q/T \qquad \text{Equação (4)}$$

Onde,

I = corrente elétrica (A)

Q = carga (C)

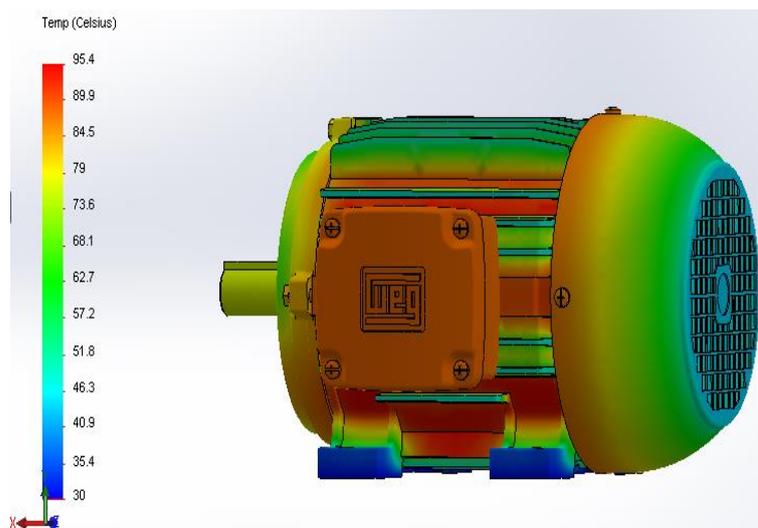
T = tempo, (s)

Detectar os defeitos de um equipamento muito antes deles acontecerem, através de parâmetros em variáveis como vibração e corrente, possibilita ao responsável pela manutenção planejar uma ação para solucionar o defeito previsto. O monitoramento contínuo da corrente elétrica em motores trifásicos especificamente no estator é uma maneira de prevenir esse tipo de falhas (LAMIN, 2007).

### 2.2.3 Parâmetro de temperatura

Um fator determinante para a vida útil de um motor é a temperatura do seu enrolamento na Figura 3 é possível observar as isotermas de aquecimento de um motor elétrico. A temperatura elevada por um longo período de tempo danifica o seu isolamento, causando um curto entre as bobinas (GONÇALEZ, 2007).

Um componente muito utilizado é o rele térmico, dispositivo mecânico atua pelo princípio dos bimetálicos, eficiente porém o acompanhamento da temperatura interna através do software se mostra mais eficiente (GONÇALEZ, 2007).



**Figura 3 - Imagem temperatura externa de um motor**  
**Fonte: Catálogo WEG**

A classe de isolamento de um motor elétrico é a classe de especificação de isolamento térmico do equipamento, ou seja, é a máxima temperatura que o bobinado do motor suporta sem alterar sua característica.

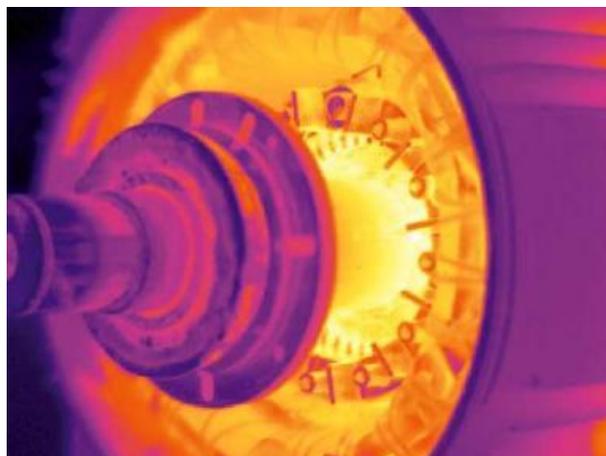
Segundo a WEG os motores comercializados pela empresa são padronizados em três classes de isolamento, sendo elas respectivamente, B, F e H. Na classe B o bobinado suporta até 135 °C, classe F até 150 °C e na classe H até 180 °C, considerando a temperatura ambiente em média 40 °C (WEG MOTORES). Comparando as classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas e os respectivos limites de temperatura conforme ABNT NBR 17094 e IEC 60034-1, são as seguintes: Classe A (105 °C) Classe E (120 °C) Classe B (130 °C) Classe F (155 °C) Classe H (180 °C).

A temperatura do ponto mais quente do enrolamento (figura 4) deve ser mantida abaixo do limite da classe. A temperatura total vale a soma da temperatura ambiente com a elevação de temperatura  $\Delta t$  mais a diferença que existe entre a temperatura média do enrolamento e a do ponto mais quente (WEG MOTORES).

Segundo a NBR17094 que regulamenta máquinas elétricas girantes entre elas motores, apresenta as seguintes condições de operação:

- A temperatura ambiente é no máximo 40 °C, acima disso as condições de trabalho são consideradas especiais.
- A diferença entre a temperatura média e a do ponto mais quente não varia muito de motor para motor e seu valor estabelecido baseado na

prática é 5 °C, para as classes A e E, 10 °C para as classes B e F e 15 °C para a classe H.



**Figura 4 - Temperatura interna do enrolamento**  
Fonte: Catálogo WEG

A alta temperatura no enrolamento do motor por um longo período de tempo prejudica de forma irreversível o seu isolamento. Com o aquecimento gerado a camada de verniz que protege todo o enrolamento de cobre rompe causando curto circuito entre as bobinas (LAMIN 2007).

A condição de uso depende exclusivamente da vida útil do sistema de isolamento dos enrolamentos. Se considerarmos um aumento de 8 a 10 °C acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade (WEG MOTORES, 2019).

## 2.3 TIPOS DE MONITORAMENTO

### 2.3.1 Monitoramento subjetivo

Variáveis como temperatura, vibração, ruído, e folgas já são acompanhadas há muito tempo, porém sem o auxílio de equipamentos. O examinador utiliza seus próprios sentidos para diagnosticar o problema da máquina (KARDEC E NASCIF, 2015).

Este tipo de monitoramento ocorre quando o profissional da manutenção possui muita experiência e conhecimento no equipamento. E mesmo com a vasta

experiência possibilite a identificação de uma falha, ela não deve ser adotada como base para a tomada de decisão (KARDEC E NASCIF, 2015).

Outro fator que deve ser levado em conta para adotar esse tipo de monitoramento é a segurança do mantenedor, pois ele entra em contato direto com o equipamento utilizando os próprios sentidos para verificar possíveis avarias, isso torna o procedimento perigoso.

### 2.3.2 Monitoramento objetivo

Utiliza-se de um conjunto de equipamentos ou instrumentos especiais para realizar o monitoramento, com objetivo de fornecer os valores de medição do parâmetro que está sendo analisado (KARDEC E NASCIF, 2015).

Para obter êxito nesse tipo de monitoramento fatores como profissional qualificado, instrumento calibrado, interpretação correta de dados deveram ser considerado para a aplicação do método (KARDEC E NASCIF, 2015).

### 2.3.3 Monitoramento contínuo

Trata-se de um monitoramento objetivo, porém ele é aplicado quando o tempo de desenvolvimento do defeito é muito curto. Aplicado em equipamentos considerados vitais para uma linha de produção. Com o monitoramento contínuo é possível controlar variáveis típicas como vibração, corrente elétrica e a temperatura em motores elétricos (KARDEC E NASCIF, 2015).

O monitoramento contínuo se resume em aplicar um conjunto de dispositivos que promovem o acesso aos dados em tempo real, e permite a interação remota entre o técnico e o equipamento. A manutenção preditiva e o monitoramento contínuo em conjunto auxiliam na diminuição de chamadas técnicas desnecessárias ou de urgência, isso tem impacto direto no orçamento, pois paradas sem programação tende a encarecer o processo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi necessário utilizar diferentes dispositivos, sendo eles a plataforma Arduino com o microcontrolador Atmega 2560, módulos de sensores de vibração Gy521-5060, sensor de corrente não evasivo Sct013-100 e um termopar tipo k Max6675. Além dos sensores foi empregado nos testes em laboratório um motor elétrico trifásico. Para convalidar as medições foram utilizados aparelhos de medição como o Fluke 810, o alicate amperímetro e termômetro digital. Associando os sensores no motor elétrico, foi desenvolvido um sistema de monitoramento contínuo e aquisição de dados para as variáveis.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Arduino

O arduino é uma plataforma desenvolvida totalmente de código aberto ideal para a criação de sistemas eletrônicos, tendo em vista custo baixo e de fácil implantação. Na figura 5 é possível visualizar a placa do arduino Atmega 2560.



**Figura 5 - Placa do Arduino Atmega 2560**  
Fonte: site arduino

Com aplicabilidade dessa plataforma podemos ler sensores, controlar saídas a partir de botões, controlar motores, até mesmo adicionar outras placas de ampliação de funcionalidades (MONK, 2014).

Atualmente no mercado existem diferentes tipos de placas de prototipagem cada uma com sua característica diferente, sem contar nos chamados “clones” que são placas construídas por outros fabricantes compatíveis com o arduino original.

A placa utilizada no projeto foi o arduino Mega 2560, seu microcontrolador Atmega 2560. Possui 54 pinos digitais (entrada/saída) sendo que 15 podem ser usado como saídas PWM os pinos (2 a 13 e 44 a 46), 16 pinos analógicos, 4 USARTs (Portas Seriais de Hardware), um cristal oscilador de 16 MHz, entrada USB, entrada de alimentação, soquete de comunicação ICSP e um botão reset (ROBOCORE TECNOLOGIA, 2019).

As características da plataforma arduino que compõe o sistema de monitoramento pode ser visualizada na Tabela 2, todos esses atributos foram fundamentais para o bom funcionamento do conjunto de sensores utilizados.

**Tabela 2 - Descrição da placa arduino atemega2560**

Tamanho	5,3 cm x 10,2 cm x 1,0 cm
Microcontrolador	Atmega2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V
Pinos de entrada/saída (I/O) digitais	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Pinos de entradas analógicas	16
Corrente DC por pino I/O	40mA
Corrente DC para pino de 3,3V	50mA
Memória <b>Flash</b>	256KB (dos quais, 8KB são usados pelo <i>bootloader</i> )
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidade de Clock	16 MHz

Fonte: Adaptado do site Arduino

### 3.1.2 Sensor de temperatura

Foi utilizado neste projeto o sensor termopar tipo K com modulo MAX6675. Na Figura 6 é possível visualizar o sensor de temperatura com o modulo que trata os sinais recebidos, o qual facilita o processo de aquisição do sinal.

O termopar é um sensor de temperatura muito utilizado na indústria, o modulo MAX6675 mede a tensão no termopar e envia, via SPI, o valor medido já com sinal tratado.

O chip MAX6675 opera em uma tensão de 3 V e 5,5 V, sua faixa de medição é de 0 °C a +600 °C com erro de  $\pm 5$  °C. Este sensor executa compensação de junta fria e digitalizada o sinal de um sensor termopar tipo K. Os dados são gerados em um formato somente leitura compatível com SPI com resolução de 12 bits. Este conversor resolve temperatura para 0,25°C, permitindo leituras de ate 1024 °C

Conversão de temperatura do MAX6675 inclui hardware de condicionamento de sinal para converter o sinal do termopar em uma voltagem compatível com os canais de entrada do ADC. O T + e T- as entradas são conectadas ao circuito interno que reduz a introdução de erros de ruído nos fios do termopar. Antes de converter as tensões termoelétricas em valores de temperatura equivalentes, é necessário compensar a diferença entre o lado da junção fria do termopar (temperatura ambiente MAX6675) e uma referência virtual a 0 °C. Para um termopar tipo K, a tensão muda em  $41\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ , o que aproxima a característica do termopar com a seguinte equação linear:



**Figura 6 - Sensor de temperatura MAX6675**  
Fonte: Robocore Tecnologia

### 3.1.3 Sensor de vibração

O sensor utilizado nesse projeto foi o acelerômetro e giroscópio, na Figura 7 é possível visualizar o sensor de vibração Gy – 521. Ele possui 3 eixos encapsulados em um único chip do tipo MEMS, sendo ao todo 6 graus de liberdade (6 DOF). Esse

módulo de sensor possui também embutido no CI MPU6050 um sensor de temperatura permitindo medições entre -40 e +85 °C.

Possui alta precisão devido ao conversor analógico digital de 16-bits para cada canal. Portanto o sensor possibilita a captura das coordenadas X, Y e Z ao mesmo tempo. A comunicação com o microcontrolador usa a interface I2C, por meio dos pinos SCL e SDA do sensor. Nos pinos XDA e XCL podem ligados outros dispositivos I2C, como um magnetômetro, por exemplo, e criar um sistema de orientação completo. A alimentação do módulo pode variar entre 3 e 5 V, mas para eficiência dos resultados e precisão recomenda-se utilizar 5 V.

Especificações:

- Chip: MPU-6050
- Tensão de Operação: 3-5 V
- Conversor AD 16 bits
- Comunicação: Protocolo padrão I2C
- Faixa do Giroscópio:  $\pm 250$ , 500, 1000, 2000°/s
- Faixa do Acelerômetro:  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$ ,  $\pm 16$  g
- Dimensões: 20 x 16 x 1 mm



**Figura 7 - Sensor de vibração Gy521 MPU6050**  
Fonte: Filipeflop

### 3.1.4 Sensor de corrente

Transformadores TCs, são sensores que medem a corrente alternada (AC), o sensor SCT 013 (Figura 8 a) utilizado no projeto é um sensor não invasivo com capacidade para medição de corrente até 100 A.

Como qualquer outro transformador, este sensor possui um enrolamento primário, um núcleo magnético e um enrolamento secundário. O enrolamento secundário é feito de muitas voltas de um fio de cobre esmaltado abrigado no interior do casco do transformador.

A corrente alternada que flui nas primárias produz um campo magnético no núcleo, o que induz uma corrente no circuito de enrolamento secundário. A corrente no enrolamento secundário é proporcional à corrente que flui no enrolamento primário. Em sua isolação o circuito secundário é isolado do circuito primário, sem qualquer contato entre eles.

Na figura 8 b é possível verificar a forma correta de ligação do sensor, se montarmos um cabo com mais de uma via, conforme a Figura 8 c, então ele irá medir a soma das correntes em cada um dos condutores. No caso de um cabo de dois núcleos, a mesma corrente estará fluindo em direções opostas e a soma será zero. Na figura 8 b é possível verificara forma correta de ligação do sensor.

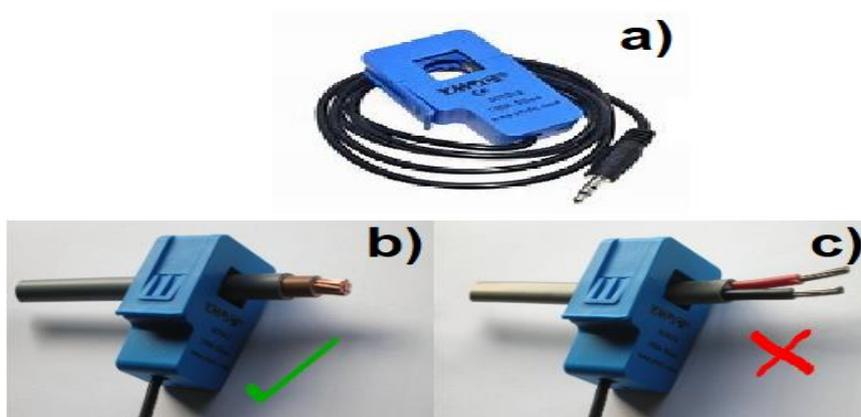
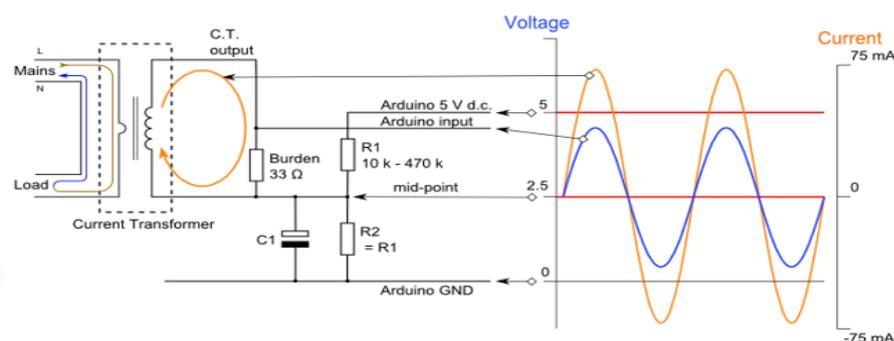


Figura 8 - Sensor SCT 013 – 100 A  
Fonte: learn.openenergymonitor

A saída atual TC precisa ser usada com um resistor de carga (figura 9), esse resistor completa ou fecha o circuito secundário do TC. O valor da carga é escolhido para fornecer uma tensão proporcional à corrente secundária. O valor da carga precisa ser baixo o suficiente para evitar a saturação do núcleo de TC.



**Figura 9 - Diagrama de ligação do resistor de carga**  
**Fonte: learn.openenergymonitor**

### 3.1.5 Custo e aquisição dos componentes

Primeiramente foi realizado um levantamento de preços (Tabela 3) de todos os itens que fizeram parte do projeto. A compra foi efetuada em um site via internet, pois a diversidade dos produtos encontrados facilitou a compra em um só fornecedor. Todos os componentes utilizados são de origem chinesa, porém o custo benefício se tornou viável.

**Tabela 3 - Lista de componentes**

Componentes	Quantidade	Valor(R\$)
Plataforma do arduino	1	66,00
Módulo de temperatura	1	30,00
Sensor corrente	1	49,00
Acelerômetro	1	16,80
Display	1	17,45
Kit jumpers/case/protoboard	1	59,50
Caixa para montagem	1	30,00
Valor total R\$		268,75

**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.6 Medidores de referência

Para realizar a comparação dos resultados obtidos pelo sistema de monitoramento foi necessário utilizar diferentes aparelhos de medição para fim de validar os resultados.

O alicate amperímetro da marca Minipa (Figura 10) foi utilizado para aferir a corrente de uma das fases do motor. Este aparelho possui excelente confiabilidade

para medições de corrente alternada até 1000 A com precisão de  $\pm 3\%$  segundo o manual do fabricante.



**Figura 10 - Alicate amperímetro Minipa ET-3111**  
Fonte: Autoria própria

A variação de vibração apresentada pelo motor analisado foi aferida pelo aparelho Fluke 810 (Figura 11). Esse equipamento é um medidor de vibração que após análise dos resultados ele apresenta o diagnóstico incorporado e localização das quatro principais falhas mecânicas padrão: rolamentos, folgas, desalinhamento, desbalanceamento.



**Figura 11 - Vibration Tester**  
Fonte: Autoria Própria

Para validar a temperatura do sistema de monitoramento foi utilizado o termômetro da marca Cason CA-380 com faixa de medição de  $-32$  à  $380\text{ }^{\circ}\text{C}$  e resolução de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esse termômetro possui mira a laser com ótima precisão.



**Figura 12 - Termômetro Cason CA-380**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.1.7 Motor utilizado para análise

Foi utilizado um motor elétrico de indução trifásico apresentado na (Figura 13 a), com potência nominal de 0.50 cv de 4 polos, com velocidade de 1680 RPM, com data de fabricação no ano de 2015, dados retirados da placa de identificação do motor (Figura 13 b). Esse motor é qualifica na classe I, segundo a norma são motores individuais acoplados a máquinas individuais operando em condições normais.



**Figura 13 - Motor e placa de identificação**  
**Fonte: Autoria própria**

## 3.2 METODOLOGIA

### 3.2.1 Programação do arduino

A linguagem de programação utilizada pelo arduino é baseada em C++, conhecida como linguagem de programação de alto nível.

Para realizar a programação foi utilizado um software IDE (Integrated Development Environment). Nesse ambiente foi escrito o programa e utilizado para compila-lo, ou seja, converter o programa em linguagem da máquina, esse processo de transformação de linguagem é chamado de compilar (MONK, 2014).

A estrutura básica para um programa do arduino foi constituído por duas instruções obrigatórias, o setup e o loop. O setup foi utilizado para definir os parâmetros iniciais e a função loop executa a programação enquanto a placa estiver sendo alimentada.

### 3.2.2 Aquisição de dados PLX-DAQ

Plx-DAQ é uma ferramenta de complemento de aquisição de dados de microcontrolador da Parallax para Microsoft Excel. Qualquer microcontrolador conectados a qualquer sensor e à porta serial de um PC pode enviar dados diretamente para o Excel.

O sistema de aquisição de dados da ferramenta PLX-DAQ é um processo de medição das grandezas como corrente elétrica, temperatura e vibração utilizando um hardware e um software, a sua comunicação ocorre conforme a figura 17.

Comparando este sistema com os métodos tradicionais de medição, os sistemas DAQ baseados em PC exploram a capacidade de processamento, produtividade, sistemas de visualização e recursos de conectividades dos computadores padrão da indústria.

O PLX-DAQ transmite e representa graficamente os valores lidos pelos sensores em tempo real direto no Excel, gravando ate 26 colunas de dados com taxa de transmissão de 128k. Os requisitos mínimos para este sistema é possuir um computador com sistema operacional Windows e o pacote Office, para utilizar o Excel (Parallax).

O sistema irá monitorou três variáveis sendo elas, vibração, corrente e temperatura interna do motor. Com isso podemos aplicar o método de manutenção preditiva, pois este sistema permitirá o monitoramento contínuo das variáveis apresentando melhor custo-benefício.

Todas as informações sobre o sistema foram armazenadas em formato XML no próprio Excel, podendo ser acessada a qualquer momento. Essas informações

permitirá ao gestor de manutenção uma tomada de decisão antecipada, conforme os dados apresentados pelo equipamento.

As variáveis na manutenção em tempo real incluem a velocidade do computador de 1.2 GHz, a taxa em que os dados estão sendo enviados é de 27 vezes por segundo. O Excel recebe esses dados em linhas ou gráficos, acaso necessite de dados de alta velocidade em tempo real. A visualização de um gráfico retardará consideravelmente o tempo de processamento. Plx-DAQ tem um buffer de caracteres 5000 nos dados do evento chega mais rápido do que pode ser processado pelo Excel (PARALLAX, 2019).

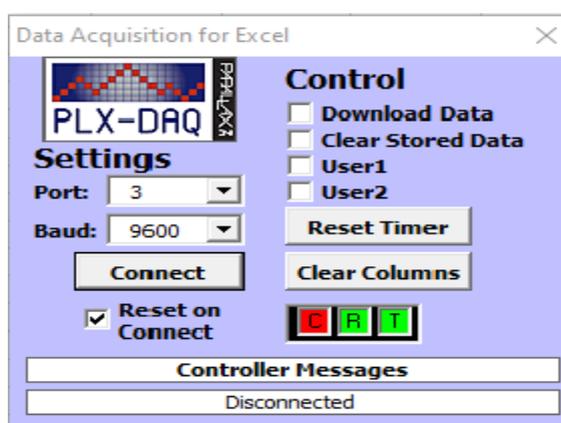


Figura 14 - Interface da plataforma de aquisição de dados  
Fonte: Manual Parallax

## 4 RESULTADOS

Após as etapas de programação e montagem do sistema, foi realizada análise de vibração, corrente e temperatura em um motor na bancada de testes do laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná do Campus Guarapuava UTFPR.

Com o sistema de aquisição de dados foram obtidos os valores de temperatura, corrente, potencia e aceleração nos eixos x, y, z. A programação do sistema possibilita que os sensores realizem a leitura de dados 27 vezes por segundo como apresentado na figura 15. Após a leitura os dados são enviados para uma planilha no Excel.



Data	Hora	Temp	I	W	AcX	AcY	AcZ
13/12/2019	15:35:18	33,25	1,98	368	-1	2	-4,7
13/12/2019	15:35:18	33,25	1,95	366	1	-1,9	5,3
13/12/2019	15:35:18	33,25	1,83	365	-0,9	1,7	-3
13/12/2019	15:35:18	33,75	1,74	368	1	-2	5,5
13/12/2019	15:35:18	33,75	1,66	364	-1	2,3	-4,7
13/12/2019	15:35:18	33,75	1,68	368	1	-1,9	5,3
13/12/2019	15:35:18	33,75	1,66	365	-0,8	2	-3
13/12/2019	15:35:18	33,75	1,67	367	0,9	-1,9	5,5
13/12/2019	15:35:18	34,75	1,68	370	-1	1,7	-4,7
13/12/2019	15:35:18	34,75	1,68	369	1,12	-2	5,3
13/12/2019	15:35:18	34,75	1,68	370	-0,8	2,3	-3
13/12/2019	15:35:18	35,25	1,67	367	0,9	-1,9	5,5
13/12/2019	15:35:18	35,25	1,65	362	-1	2	-4,7
13/12/2019	15:35:18	35,25	1,65	364	1,12	-1,9	5,3
13/12/2019	15:35:18	35,25	1,67	366	-0,8	1,7	-3
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,66	364	0,9	-2	5,5
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,67	366	-1	2,3	-4,7
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,66	365	1,12	-1,9	5,3
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,67	367	-0,8	2	-3
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,65	362	0,9	-1,9	5,5
13/12/2019	15:35:18	35,75	1,66	365	-1	1,7	-4,7
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,65	362	1,12	-2	5,3
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,65	362	-0,8	2,3	-3
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,65	363	0,9	-1,9	5,5
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,64	360	-1	2	-4,7
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,66	364	1,12	-1,9	5,3
13/12/2019	15:35:18	36,25	1,65	362	-0,8	1,7	-3

Figura 15 - Interface do sistema de monitoramento contínuo  
Fonte: Autoria própria





**Figura 17 - Comparativo entre alicate e sistema  
Autoria própria**

## 4.2 AQUISIÇÃO DO PARAMETRO DE TEMPERATURA

A temperatura obtida pelo sensor Max6675, apresentado na Figura 18, é referente a carcaça do motor, porém a intenção é verificar a temperatura mais próxima possível do enrolamento. O acesso ao local que o sensor deverá ser instalado será a caixa de ligação do motor, pois é por ela que se tem acesso aos cabos vindos diretamente das bobinas.

Não foi possível ter o acesso neste motor, porém em outro motor parecido foi analisado o local pretendido e pode e tem como ser fixado o termopar. A caixa de ligação é o local escolhido para fixar o sensor, pois é ideal para saber a qual temperatura do enrolamento, e através do manual do motor comparar a informação do sensor com a temperatura determinada pelo fabricante.

A temperatura registrada pelo sistema (Figura 19 a) foi comparada com o termômetro Cason CA-380, apresentada na (Figura 19 b).







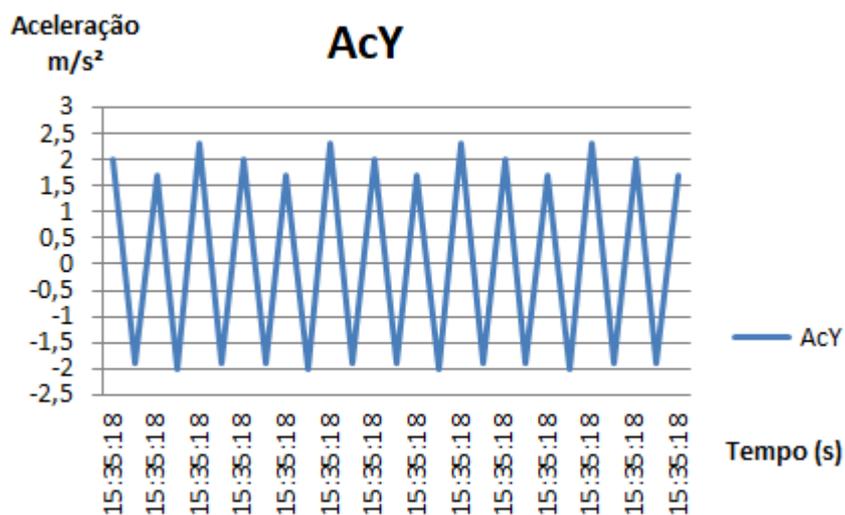


Figura 23 - Aceleração eixo Y Gy521  
Fonte: Autoria própria

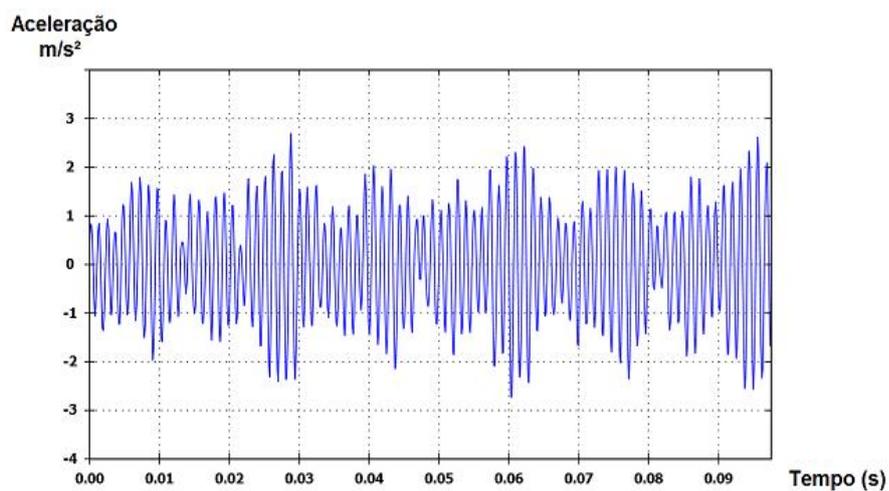


Figura 24 - Aceleração Fluke eixo Y  
Fonte: Autoria própria



## 5 CONCLUSÃO

As atividades realizadas ao longo do projeto tiveram como propósito desenvolver um sistema de monitoramento contínuo e aquisição de dados de parâmetros em motores elétricos trifásicos, com a programação da plataforma arduino em conjunto com sensores para auxiliar na manutenção preditiva produzindo um histórico do equipamento.

Fatores como custo de materiais, tempo de implantação do sistema foram considerados para validar o desempenho do sistema, ao compararmos o custo benefício deste sistema de monitoramento com outros já existentes no mercado.

Para dados comparativos foi utilizado para aferir a corrente elétrica o alicate amperímetro marca Minipa ET-3111, para a temperatura um termômetro digital da marca Cason CA-380 e para aferição da vibração o Fluke 810.

Com a obtenção dos resultados, notou-se a eficiência do sistema, pois ele apresenta os valores em tempo real e armazena todos os parâmetros solicitados, podendo ser implantado como suporte para a manutenção preditiva. O sistema desenvolvido apresentou dados semelhantes aos dos equipamentos utilizados para a comparação, assim validando a sua confiabilidade.

Esse sistema de monitoramento poderá ser utilizado em motores de até 30 cv, considerando um fator de potência de 0.70, pois o transformador de corrente realiza a medição de corrente de até 100 A, os sensores de temperatura e vibração podem ser utilizados em motores com maior potencial.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para a melhoria desse projeto estuda-se a troca da plataforma arduino 2560 por uma ESP32, com o sistema de wifi e Bluetooth embutido na placa de circuito, assim realizar a aquisição de dados de maneira remota, podendo ter acesso via aplicativo pelo celular, assim otimizando o sistema de manutenção preditiva.

Poderá ser substituído o módulo do sensor de temperatura termopar Max 6675 por um modulo infravermelho Mlx90614esf, facilitando a instalação.

## REFERÊNCIAS

CAPELLI, A. **Automação Industrial: controle do movimento e processos contínuos**. 3. ed. Sao Paulo: Érica, 2013.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas elétricas**. Tradução de Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FILHO, L. F. S. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Gestão de Ativos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.

GONÇALEZ, F. G. **Estudo do motor de indução trifásico e desenvolvimento de um dispositivo de proteção efetiva de motore operando em condições anormais: rotor bloqueado e falta de fase**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

GUSSOW, M. **Eleticidade Básica**. Tradução de Jose Lucimar do Nascimento. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014.

MITCHELL, J. S. From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance. **Revista Sound & Vibration**, San Juan Capistrano, California, 2007.

MONK, S. **Projetos com arduino e android**. Porto Alegre: Bookman, 2014.

NBR5462. slide share, 2014. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/eavargas2512/nbr-5462-2>>. Acesso em: 16 out. 2018.

ROBOCORE Tecnologia Disponível em: <<https://www.robocore.net/loja/produtos/arduino-mega-2560-r3.html>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

Acesso em 8 de Setembro de 2019, disponível em Parallax: <https://www.parallax.com/downloads/plx-daq>

Nepomuceno, L. X. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Blucher, (1989).

Subhasis Nandi, H. A. **Condition Monitoring and fault Diagnosis of Electrical Motors - a review**. IEEE Transactions on Energy Conversion Vol. 20, Janeiro,2006.