

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

DANIEL CABRAL CORREA

Monitoramento Remoto de Falhas em MIT em Meio Industrial

São José - SC

Dezembro/2019

MONITORAMENTO REMOTO DE FALTAS EM MIT EM MEIO INDUSTRIAL

Pré-Projeto de trabalho de conclusão de curso apresentado à Coordenadoria do Curso de Engenharia de Telecomunicações do campus São José do Instituto Federal de Santa Catarina para a aprovação do tema perante banca na disciplina de TCC1.

Orientador: Pedro Armando da Silva Júnior

Coorientador: Mário de Noronha Neto

São José - SC

Dezembro/2019

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um equipamento de manutenção preditiva em motores de indução trifásico em um ambiente industrial. Este dispositivo irá realizar medições no campo magnético externo ao motor, enviando os dados adquiridos a um servidor para serem armazenados e por fim analisados com o auxílio de técnicas de aprendizado de máquina. Neste documento será contextualizado o estudo realizado sobre motores de indução trifásico e seus principais defeitos, rede *Mesh*, *ZigBee* e aprendizado de máquina. Além disso será apresentado a proposta para desenvolvimento do projeto.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Motor de indução trifásico. Campo magnético. Aprendizado de máquina. *ZigBee*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Curto-circuito entre as espiras do estator	10
Figura 2 – Barra quebrada no rotor	10
Figura 3 – Topologia rede <i>Mesh</i>	11
Figura 4 – Backbone Wireless Mesh Network	12
Figura 5 – Client Wireless Mesh Network	12

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Funções dos dispositivo na camada de rede	13
Tabela 2 – Cronograma das atividades previstas	16

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BLE <i>Bluetooth Low Energy</i>	7
FFD <i>Full Function Device</i>	13
IEEE <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	12
MIT <i>Motor de Indução Trifásico</i>	8
RFD <i>Reduced Function Device</i>	13
UFSC <i>Universidade Federal de Santa Catarina</i>	15

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo geral	7
1.2	Objetivos específicos	7
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1	Manutenção	9
2.2	Motor de indução Trifásico	9
2.2.1	Principais Problemas	9
2.3	Rede <i>Mesh</i>	10
2.3.1	Vantagens da rede <i>Mesh</i>	11
2.3.2	Arquitetura	11
2.4	ZigBee	12
2.4.1	Tipos de dispositivos	13
2.4.2	Funções lógicas dos dispositivos	13
2.5	Aprendizado de Máquina	14
3	PROPOSTA	15
3.1	Estudo teórico	15
3.2	Desenvolvimento do dispositivo	15
3.3	Ambiente de testes	15
3.4	Teste e análise de resultados	16
3.5	Cronograma	16
	REFERÊNCIAS	17

1 INTRODUÇÃO

Motores de Indução Trifásico (MIT) tem uma vasta aplicação. Este fato é justificado pois a maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica são de corrente alternada, além disso, a principal vantagem deste motor é a sua simplicidade construtiva e a capacidade de operar sem necessidade de contato com os enrolamentos do rotor. Isso reflete em baixo custo aquisição e manutenção mínima. Outras vantagens são o baixo consumo energético, operação com temperaturas menores, apresentação de menor esforço térmico e um ótimo rendimento, ele utiliza cerca de 95 % de seu consumo total de energia para gerar força motriz (ELETROBRÁS, 2004).

Na indústria os MITs são geralmente utilizados em linhas de produção, quando ocorre uma falha em um dos motores, toda a operação pode ser afetada. Uma solução para mitigar esse problema é a manutenção preditiva, porém as fábricas não possuem uma rede de internet bem difundida para a transmissão dos dados capturados, além disso, a maioria dos motores não possuem sensores para monitorar o seu estado de funcionamento ou conservação.

Afim de solucionar esses problemas, este trabalho tem como objetivo a confecção de um dispositivo de manutenção preditiva para um ambiente industrial, este fará o monitoramento do motor de forma não intrusiva. Além disso, o dispositivo servirá também como nó em uma rede *Mesh*, com isso nem todos os motores precisam estar conectados ou em uma área com livre acesso a rede Internet, facilitando a transmissão dos dados capturados. Por fim, os dados serão analisados utilizando técnicas de aprendizado de máquina para identificar a atual situação do motor.

Para realizar as medidas não intrusivas no motor foi escolhido usar um sensor de campo magnético, pois este dispositivo tem menor custo se comparado com outros sensores e, também, é possível obter outras informações a partir de cálculos feitos após as aquisições dos dados. Para a transmissão na rede *Mesh* foram selecionadas duas tecnologias *Bluetooth Low Energy (BLE) 5.0* e *ZigBee*. Entre estas duas foi escolhida *ZigBee*, que está à mais tempo no mercado, além disso, o *BLE 5.0*, por ser uma tecnologia nova no mercado, tem seu preço mais caro que o módulo *ZigBee*.

Este documento está organizado em mais dois capítulos além deste. No próximo é apresentado a fundamentação teórica, onde são descritos os principais conceitos que serão utilizados no decorrer deste trabalho. Por fim, no [Capítulo 3](#) é descrita a proposta deste trabalho, além de ser apresentado o cronograma das atividades.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver um equipamento de manutenção preditiva com monitoramento não intrusivo para um motor de indução trifásico em um ambiente industrial, conectado a uma rede *ZigBee* para transmissão dos dados adquiridos por um sensor de campo magnético.

1.2 Objetivos específicos

- Estudar o motor de indução trifásico, identificando os seus principais defeitos e sua assinatura magnética;
- Implementação de uma banco de dados gerenciável em um servidor virtual;

- Conceber uma base de dados com medições do campo magnético do Motor de Indução Trifásico (MIT);
- Gerenciar uma rede *Mesh* utilizando ZigBee;
- Utilizar técnicas de aprendizado de máquina para prever falhas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manutenção

Por definição manutenção é a ação de manter, consertar ou conservar algo (SIGNIFICADOS, 2014). Tendo em vista que o cenário de estudo deste trabalho são indústrias, o ato de realizar manutenção em equipamento é de grande importância, diminuindo os custos, evitando a compra de novos equipamentos e a pausa na operação. Nesta seção serão abordados os principais tipos de manutenção.

A manutenção corretiva é a forma mais primária da manutenção, ou seja, a técnica se resume na restauração do equipamento após a avaria do mesmo. Esta é a técnica mais custosa, pois pode afetar o funcionamento da fábrica, além de diminuir a vida útil do equipamento (ARAÚJO; SANTOS, 2015). A técnica surgiu no começo do século XX após o início da produção em série (NETO, 2017).

Após o fim da Segunda Guerra Mundial, a produção de produtos deveria ser realizada o mais rápido possível devido a reconstrução da Europa. Desta demanda surge a manutenção preventiva, procurando evitar as interrupções no funcionamento das indústrias. Como o próprio nome diz, na manutenção preventiva é realizado um acompanhamento periódico nas peças e quando uma delas apresenta algum desgaste significativo é realizada a troca do item. Porém, é possível que aconteça um dano grave antes da próxima vistoria e, além disso, em muitos casos a peça substituída poderia ser utilizada por mais algum tempo (NETO, 2017).

A fim de aperfeiçoar a técnica anterior surgiu a manutenção preditiva. Esta foi desenvolvida para prevenir anormalidades no equipamento, permitindo assim um uso mais eficiente. Para isso é necessário conhecer as possíveis falhas e fazer um acompanhamento mais rigoroso realizando um monitoramento do produto (ARAÚJO; SANTOS, 2015).

2.2 Motor de indução Trifásico

O motor de indução é um motor elétrico que funciona a partir de campos magnéticos girantes (TECNOGERA, 2016). Possui estrutura e funcionamento simples, ele é constituído por:

- Rotor - Formado por chapas de aço finas em formato de anel é a parte móvel do motor, o rotor é uma estrutura que gira em torno de seu próprio eixo, produzindo movimento de rotação e entregando energia mecânica à carga. Funciona de forma simultânea com o estator;
- Estator - Também é formado por chapas de aço finas ou enrolamentos, o estator permanece fixo à carcaça do motor, sua principal função é conduzir a energia da fonte para o entreferro. Funciona de forma simultânea com o rotor;
- Entreferro - Espaço entre o rotor e o estator;
- Eixo - é a estruturas onde o rotor e o estator são montadas e onde a carga é conectada.

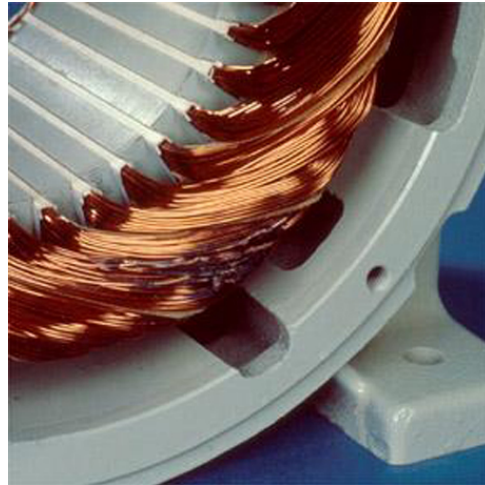
2.2.1 Principais Problemas

Curto-circuito entre as espiras do estator

O Curto-circuito entre as espiras do Estator surge a partir de problemas no isolamento do enrolamento, com isso, é gerado alteração na amplitude nas fases do estator e um aumento de corrente na

fase afetada, modificando o fator de potência do estator e amplificando as correntes induzidas no rotor. Em seguida, acontece um aumento de temperatura nos enrolamentos do estator, acelerando a degradação do material isolante, gerando outros curtos (MENEGAT, 2014).

Figura 1 – Curto-circuito entre as espiras do estator



Barra quebrada no rotor

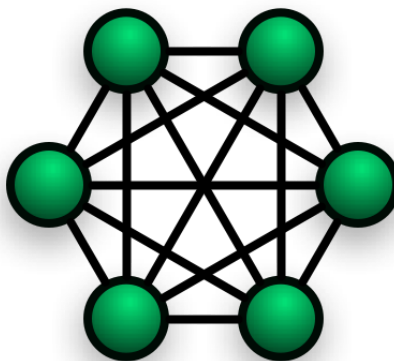
A falha por barra quebrada no rotor pode ser causada durante a operação por esforços gerados em regimes de temperatura, vibrações, impactos mecânicos e fraturas por fadiga. Esta quebra faz com que parte da corrente que passaria na barra quebrada comece a passar nas barras adjacentes. Estas barras sujeitas a uma carga maior esquentam rapidamente e este aumento de temperatura contribui diretamente para o aumento da falta. Isto também contribui para haver uma distorção do campo magnético do rotor como um todo. (Araujo, 2016).

Figura 2 – Barra quebrada no rotor



2.3 Rede Mesh

Redes *Mesh* são redes estruturadas em malha, onde todos os nós podem conversar entre si sem passar obrigatoriamente por um nó central. Esta rede é dinamicamente auto-gerenciável e auto-organizável, ou seja, caso outro nó seja adicionado à rede, ele receberá as configurações automaticamente sem a necessidade de parar toda a rede durante este processo, aumentando o número de caminhos alternativos.

Figura 3 – Topologia rede *Mesh*

Redes *Mesh* possuem dois tipos de nós. Um dos nós é conhecido como roteador *Mesh*, contém as funções de roteamento para manter a rede operando na topologia de malha. Estes roteadores possuem mobilidade reduzida e formam vários enlaces sem fio com os demais nós. Além disso, funcionam como *gateways* e *bridges*, e garantem a conexão com outras redes (SANTOS et al., 2010).

O outro nó é conhecido como cliente *Mesh*. Estes nós possuem grande mobilidade, mas podendo também ser fixos. Além disso, este tem menor complexidade tanto no *hardware* quanto no *software*, pois não precisa realizar as funções de roteamento.

2.3.1 Vantagens da rede *Mesh*

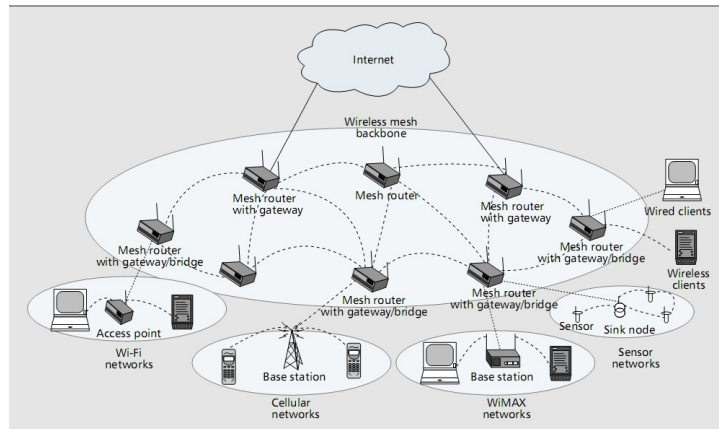
- O custo de implementação e manutenção é baixo devido à não necessidade de pontos de acesso ou cabos para conectar os roteadores e os clientes;
- Para conectar a rede *Mesh* à internet só é necessário que um roteador esteja conectado, todos os outros nós terão acesso utilizando múltiplos saltos, sendo assim indicado para ambientes onde não existam cabos *Ethernet* suficientes;
- Como a rede é auto-organizável, novos nós podem ser adicionados sem que haja uma reconfiguração ou intervenção da rede;
- Caso algum nó falhe a comunicação não será interrompida, o pacote poderá passar por um outro nó sem que ocorra algum problema, já que o sistema encontra novas rotas de forma dinâmica;
- Como os roteadores *Mesh* possuem as funcionalidades de *gateway* e *bridge* é possível a integração da rede *Mesh* com outras redes, por exemplo, Wi-Fi, redes de aparelhos celulares, entre outras. Isto também permite a integração de diferentes redes através da utilização de redes *Mesh*.

2.3.2 Arquitetura

Backbone Wireless Mesh Network

Na arquitetura *Backbone Wireless Mesh Network* os roteadores *Mesh* estão presentes, oferecendo aos seus clientes características de auto-configuração e recuperação de rota caso um dos nós tenha problema. Além disso, este arranjo possibilita integração com outros tipos de rede, por exemplo, redes *Wireless*. Nesta configuração os roteadores não possuem mobilidade, diferente dos clientes que são móveis. (SANTOS et al., 2010)

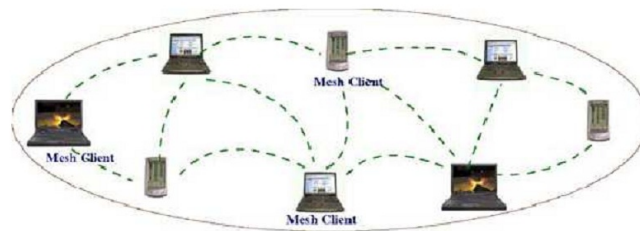
Figura 4 – Backbone Wireless Mesh Network



Client Wireless Mesh Network

Na arquitetura *Client Wireless Mesh Network* os roteadores são dispensáveis, as configurações e o roteamento agora são realizados pelos clientes. Sendo assim, é necessário que os nós finais tenham uma infraestrutura mais robusta para realizar as funções que antes eram apenas dos roteadores.

Figura 5 – Client Wireless Mesh Network



2.4 ZigBee

O ZigBee foi criado pela *ZigBee Alliance* em conjunto com o *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, buscando ofertar uma rede com baixa potência de operação e com isso gerar um baixo consumo de energia nos dispositivos, estendendo a vida útil de suas baterias. A seguir são apresentadas as principais características da rede:

- Diferentes frequências de operação e taxa de dados: 868 MHz e 20kbps; 915 MHz e 40kbps; 2.4 GHz e 250 kbps;
- Um mesmo nó pode executar diferentes papéis em uma mesma rede;
- São possíveis as configurações em diversas topologias de rede, neste trabalho será utilizado a topologia de rede *Mesh*;
- Habilidade de se auto-organizar e auto-reestruturar;
- Permite um número elevado de dispositivos conectados à rede (máximo de 65.535 dispositivos por cada dispositivo coordenador);
- Alta durabilidade da bateria dos dispositivos;

- Interoperabilidade, ou seja, a capacidade de se comunicar de forma transparente com outros sistemas.

2.4.1 Tipos de dispositivos

É definido pelo padrão **IEEE** que as redes Zigbee possuem dois tipos de dispositivos, sendo eles, *Full Function Device* (**FFD**) e o *Reduced Function Device* (**RFD**).

O primeiro é apto para funcionar em qualquer modo (coordenador, roteador ou dispositivo final). Além disso, não possui nenhuma restrição podendo se comunicar tanto com **FFD** quanto com **RFD**. Já o segundo possui limitação por ser um dispositivo mais simples e de menor custo, ele só pode ocupar o papel de dispositivo final, podendo comunicar apenas com **FFD**.

2.4.2 Funções lógicas dos dispositivos

Coordenador

O coordenador sempre opera em estado ativo para efetuar o controle da rede e possui uma alimentação direta para diminuir os riscos de falha no nó centralizador da rede. Este é o nó inicial da rede, ao ser iniciado como coordenador iniciará sua rede selecionando um identificador PAN único no seu raio de influência. Na inicialização, todos os canais da frequência de operação são escaneados até esse PAN ID único ser encontrado.

Roteador

O roteador é utilizado em topologias *Mesh* para dar maior robustez à rede. Eles possuem tabelas de roteamento e, por serem **FFD**, permitem encontrar o menor caminho para se chegar ao destino. Caso o roteador não possua o endereço de destino requisitado, este fará o *broadcast* de uma requisição de rota (*route request*) e receberá do destino a rota mais eficaz atualizando sua tabela. Este mecanismo dá à rede a característica de auto-regeneração caso ocorra a queda das funcionalidades de outros nós roteadores na rede.

Dispositivo final

Os dispositivos finais são na maioria das vezes **RFD**, portanto não coordenam nem roteiam a rede. São implementados em microcontroladores pequenos, com pouca memória e pouca potência. Eles passam a maior parte do tempo no estado inativo, acordando apenas para se comunicar com **FFD** (VASQUES et al., 2010).

Na tabela 1 são mostradas as diferenças entre as funções lógicas dos dispositivos.

Tabela 1 – Funções dos dispositivos na camada de rede

Coordenador <i>ZigBee</i>	Roteador <i>ZigBee</i>	Dispositivo final <i>ZigBee</i>	Função na Camada de Rede
✓			Estabelecer uma nova rede <i>ZigBee</i>
✓	✓		Conceder endereço lógico de rede
✓	✓		Permitir que dispositivos entrem ou saiam da rede
✓	✓		Manter lista de vizinhos e rotas
✓	✓		Rotear pacotes de camada de rede
✓	✓	✓	Transferir pacotes da camada de rede

2.5 Aprendizado de Máquina

Por definição aprendizado de máquina é uma função que ajuda o *software* a executar uma tarefa sem regras ou programação explícitas, transformando dados em ação inteligente. Resumindo, é possível identificar padrões a partir de uma base de dados (Noronha, 2019).

O processo acontece da seguinte maneira, primeiramente deve haver uma base de dados inicial contendo várias informações possibilitando, assim, uma análise mais precisa. Em seguida acontece o treinamento, onde os dados são transformados em representações, ou seja, são gerados equações matemáticas e diagramas relacionais. Por fim, são inseridos novos dados, fazendo com que o sistema verifique através das equações a qual grupo pertence a última informação inserida. Além disso, esta informação será armazenada para melhorar a precisão da próxima análise.

Em manutenção preditiva, normalmente são utilizados algoritmos de aprendizado de máquina dos tipos supervisionado e não supervisionado. O que difere estes tipos é a forma em que é realizado o treinamento. Sendo que os algoritmos do tipo supervisionado realizam o treinamento utilizando uma base de dados, onde a entrada e a saída são conhecidas. Enquanto, no tipo não supervisionado apenas as entradas são conhecidas (Noronha, 2019).

3 PROPOSTA

Para este projeto é proposto o desenvolvimento de um dispositivo para a manutenção preditiva de um motor de indução trifásico em um ambiente industrial. Este protótipo realizará medições do campo magnético do motor. Após essa etapa, será realizada a transmissão dos dados coletados. Tendo em vista que a proposta deste dispositivo é para um ambiente industrial, será implementada uma rede *Mesh*. Com os resultados armazenados, será realizada uma análise dos dados com auxílio de um algoritmo de aprendizado de máquina. Para o cumprimento desta proposta, o presente documento divide o projeto em quatro etapas: o estudo teórico, o desenvolvimento do dispositivo, o ambiente de testes e testes e análise dos resultados.

3.1 Estudo teórico

Inicialmente será realizado um estudo sobre [MIT](#), sendo explorado seu funcionamento, suas vantagens e as suas principais falhas. Portanto, é fundamental nessa etapa entender as diferenças no motor quando o mesmo está funcionando perfeitamente, quando ele está funcionando com uma barra do rotor quebrada ou quando ele está funcionando com um curto-circuito nas espiras do estator, qual o comportamento do motor nestes estados e como ocorre as transições entre eles..

Devido ao ambiente onde será utilizado o dispositivo a ser desenvolvido, será feito um estudo sobre as redes *Mesh*, e conseqüentemente sobre [ZigBee](#), sendo esta a tecnologia escolhida para realizar as transmissões das medidas. Para encerrar esta etapa será realizada uma pesquisa sobre aprendizado de máquina, com o objetivo de identificar alguns algoritmos para seu uso na última etapa deste trabalho.

3.2 Desenvolvimento do dispositivo

Esta fase consiste em desenvolver um dispositivo para teste. O protótipo deverá conter um sensor de campo magnético e amplificadores, estes serão cedidos pela Universidade Federal de Santa Catarina ([UFSC](#)), para realizar as medidas do campo magnético do [MIT](#). O dispositivo também deverá conter um módulo [ZigBee](#) para transmitir os dados capturados e retransmitir dados de outros dispositivos. Tendo em vista que o objetivo é desenvolver uma solução para indústria, e também considerando que o dispositivo participará de uma rede *Mesh*, o dispositivo deverá ser replicado pelo menos mais duas vezes.

Após a montagem do protótipo, o mesmo deverá medir o campo magnético do [MIT](#), transmitir os dados capturados para o nó seguinte e retransmitir dados recebidos de outros dispositivos.

3.3 Ambiente de testes

Esta etapa consiste em preparar o ambiente de realização dos testes dos dispositivos confeccionados. Antes de realizar os testes será necessário criar uma base de dados com medições de um [MIT](#) em seu funcionamento perfeito, com barras do rotor quebradas e com curto-circuito nas espiras do estator. Para os testes será necessário além do protótipo os seguintes itens:

- Motor de indução trifásico;
- Máquina virtual;
- Computador;
- Nó ZigBee com Internet;
- Base de dados.

3.4 Teste e análise de resultados

O principal objetivo dessa fase é validar o equipamento confeccionado e localizar algum problema caso exista. Nos primeiros testes serão montados dois cenários. No primeiro apenas um MIT entrará em operação com um dispositivo acoplado a ele, enquanto os demais protótipos servirão apenas de nó de comunicação. Este cenário será repetido diversas vezes, porém o motor em operação será trocado. Enquanto no segundo cenário será realizado teste com vários motores em funcionamento. Neste cenário todos os motores terão um protótipo junto de si.

Com os cenários de teste descritos anteriormente será analisado se a partir dos dados informados por cada dispositivo será possível identificar a situação atual do motor, em seguida, será comparada a resposta da solução com a real situação do motor monitorado. Também será analisado o comportamento da rede *Mesh* durante os dois cenários. Outros cenários serão montados na medida em que o trabalho for se desenvolvendo.

3.5 Cronograma

O cronograma das atividades previstas para o desenvolvimento deste projeto está apresentado na [Tabela 2](#). A lista exibida em seguida apresenta melhor cada etapa citada no cronograma.

Tabela 2 – Cronograma das atividades previstas

Etapa	Mês								
	nov	dez	jan	fev	mar	abr	mai	jun	julho
1	✓	✓	✓	✓	✓				
2			✓	✓	✓				
3					✓	✓	✓		
4						✓	✓	✓	
5					✓	✓	✓	✓	✓
6									✓

1. Estudo teórico;
2. Desenvolvimento de dispositivo;
3. Aquisição de dados;
4. Análise dos resultados;
5. Documentação do projeto;
6. Correções.

REFERÊNCIAS

- Araujo, R. d. E. Equipamento para detecção de faltas em motores de indução trifásicos. *Universidade Federal de Santa Catarina*, v. 1, n. 1, p. 138, 2016. Citado na página 10.
- ARAÚJO, I. M. D.; SANTOS, C. K. S. *Manutenção Elétrica Industrial*. 2015. Disponível em: <<http://www.dee.ufrn.br/~joao/manut/>>. Citado na página 9.
- ELETROBRÁS. *Motor Elétrico: guia básico*. [S.l.]: Procel Indústria, 2004. ISBN 9788587257307. Citado na página 7.
- MENEGAT, J. Estudo de falhas incipientes em motores de indução trifásicos utilizando a transformada discreta de wavelet. *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, v. 1, n. 1, p. 88, 2014. Citado na página 10.
- NETO, T. C. M. *A história da evolução do sistema de gestão de manutenção*. 2017. Disponível em: <<https://www.webartigos.com/artigos/a-historia-da-evolucao-do-sistema-de-gestao-de-manutencao/75650>>. Citado na página 9.
- Noronha, M. d. N. *ZigBee*. 2019. Disponível em: <<https://www.dropbox.com/sh/f58f23teber9zbo/AAC73J5zzG4qEPNvoMrPv1Gqa?dl=0&preview=Introdu%C3%A7%C3%A3o+ML+-+IFSC+2019.pdf>>. Citado na página 14.
- SANTOS, E. B. dos et al. *redes sem fio em malha*. 2010. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/malha/index.html>. Citado na página 11.
- SIGNIFICADOS. *Significado de Manutenção*. 2014. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/manutencao/>>. Citado na página 9.
- TECNOGERA. *Descubra os princípios de funcionamento de um motor de indução trifásico*. 2016. Disponível em: <<https://www.tecnogera.com.br/blog/descubra-os-principios-de-funcionamento-de-um-motor-de-inducao-trifasico>>. Citado na página 9.
- VASQUES, B. L. R. P. et al. *ZigBee*. 2010. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/zigbee/index.html>. Citado na página 13.