

Pedro Henrique Colem da Costa Val

**Sistema de Aquisição de Sinais para
Monitorização Remota de Motores Elétricos
Utilizando o Protocolo de Rede Sem Fio Thread**

Belo Horizonte

2019

Pedro Henrique Colem da Costa Val

**Sistema de Aquisição de Sinais para Monitorização
Remota de Motores Elétricos Utilizando o Protocolo de
Rede Sem Fio Thread**

Monografia apresentada durante o Seminário dos Trabalhos de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

Escola de Engenharia

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Hermes Aguiar Magalhães

Belo Horizonte

2019

Agradecimentos

Os agradecimentos são direcionados à família: Carla Costa Val, Eduardo Costa Val, João Augusto, Paulo Gabriel, Lívia Colen e Vitória Carvalho, aos amigos de graduação, aos colegas de trabalho da Virturian: Rafael Costa, Vinícius de Moraes, Vinícius Leroy, Régia Costa, Christian Vieira, e ao professor orientador: Hermes Aguiar Magalhães.

*“Poets say science takes away from the beauty of the stars — mere globs of gas atoms.
Nothing is “mere”. I too can see the stars on a desert night, and feel them.
But do I see less or more?”*

(Feynman, Richard)

Resumo

Esta monografia contempla as etapas de planejamento, teste, produção e aplicação de um sistema de aquisição de sinais de vibração, temperatura e campo magnético. Esse sistema, inserido no conceito de Indústria 4.0, permite o monitoramento remoto das condições mecânicas e elétricas de motores. É apresentado nesse trabalho o desenvolvimento do *hardware* e *firmware*, assim como a configuração e uso da tecnologia OpenThread, disponibilizada como código aberto pelo Google, que utiliza o Protocolo de Rede Sem Fio Thread, uma topologia pouco explorada no mercado. Além disso, o texto abrange os processos de prototipagem, validação e produção do lote piloto necessários para introduzir o produto no mercado com redução de riscos. O dispositivo eletrônico que realiza a aquisição dos sinais é o Virturian Sense Maker Sensor, propriedade intelectual da empresa Virturian.

Palavras-chaves: Aquisição de Sinais. Indústria 4.0. *Hardware*. *Firmware*. OpenThread. Rede Sem fio. Thread.

Abstract

This monograph includes the stages of planning, testing, production and application of a vibration, temperature and magnetic field acquisition system. This system, inserted in the concept of Industry 4.0, allows the remote monitoring of the mechanical and electrical conditions of motors. This paper presents the development of hardware and firmware as well as the configuration and use of OpenThread technology, made available as open source by Google, which uses the Wireless Network Protocol Thread, little explored in the market. In addition, the text covers the processes of prototyping, validation and production of the pilot batch necessary to introduce the product into the market with risk reduction. The electronic device that performs the acquisition of signals is the Virturian Sense Maker Sensor, intellectual property of Virturian company.

Key-words: Acquisition System. Industry 4.0. Hardware. Firmware. OpenThread. Wireless Network. Thread.

Listas de ilustrações

Figura 1 – Camadas que compõe o padrão IEEE 802.15.4	23
Figura 2 – Resultados da resposta em frequência dos dados de campo magnético de um motor em bom estado. Os eixos X, Y e Z estão representados pelas cores vermelho, preto e azul respectivamente	26
Figura 3 – Resultados da resposta em frequência dos sinais de campo magnético de um motor com rotor danificado. Os eixos X, Y e Z estão representados pelas cores vermelho, preto e azul respectivamente	27
Figura 4 – Arquitetura proposta - VSM Sensor, Gateway e Nuvem	29
Figura 5 – Tipos de nós da rede Thread: classificados como FTDs e MTDs	31
Figura 6 – Exemplo de topologia evidenciando <i>routers</i> e <i>childs</i>	32
Figura 7 – Exemplo de topologia evidenciando o OTBR e o líder de rede.	32
Figura 8 – Sistema proposto: 4 VSM Sensor (MTD) e um <i>gateway</i> (FTD)	33
Figura 9 – Gateway para testes: <i>dongle</i> USB conectado ao Raspberry Pi 3 Model B	34
Figura 10 – <i>Gateway</i> robusto para indústria	34
Figura 11 – Rede OpenThread formada	35
Figura 12 – Canais concorrentes do IEEE 802.11 e 802.15,4	36
Figura 13 – Análise dos canais de WiFi no ambiente de teste, onde é observado a presença de várias redes WiFi em vários canais.	36
Figura 14 – Arquitetura e protocolos de comunicação	37
Figura 15 – Diagrama geral mostrando a arquitetura do MCU CC2652r	38
Figura 16 – Eventos presentes em VSM.c	39
Figura 17 – Bloco funcional do sensor de temperatura MLX90614	41
Figura 18 – Bloco funcional do acelerômetro triaxial KX122-1037	42
Figura 19 – Bloco funcional do magnetômetro MMC34160PJ	43
Figura 20 – Bateria ER14505	43
Figura 21 – Pack com 3 baterias ER14505 em paralelo	44
Figura 22 – Curva de descarga da Bateria ER14505	44
Figura 23 – Processo de prototipagem: obtenção da matéria, montagem e validação	47
Figura 24 – Processo de prototipagem: obtenção da matéria, montagem e validação	48
Figura 25 – Resultado do projeto em 2D e 3D	48
Figura 26 – PCB em Painel	49
Figura 27 – Plataforma para auxílio no desenvolvimento	50
Figura 28 – Imagem obtida por microscópio do componente invertido	52
Figura 29 – Projeto indicando o fiducial - Pino 1	52
Figura 30 – Sinais amostrados pelo acelerômetro KX122-1037 de uma motor à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz	53

Figura 31 – Sinais amostrados pelo acelerômetro K6DS3TR de um motor operando à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz	54
Figura 32 – Sinais amostrados pelo magnetômetro MMC14160 de um motor de 6 polos operando à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz	54
Figura 33 – Gráficos referente a medição de temperatura: VSM Sensor e Infravermelho	55
Figura 34 – Gráfico da medição de tensão da bateria durante 7 dias	56
Figura 35 – Inserção de componentes pela Pick and Place automática.	57
Figura 36 – PCB entre Pick and Place e forno	57
Figura 37 – Montagem concluída	58
Figura 38 – Bancada de teste na fábrica.	58
Figura 39 – Imagens do produto final	59
Figura 40 – Sinais visualizados no <i>dashboard</i>	60

Lista de tabelas

Tabela 1 – Defeitos em motor de indução e frequências características	25
Tabela 2 – URLs e ações.	37
Tabela 3 – Preço dos itens necessário para prototipagem	49
Tabela 4 – Custo da produção para 100 unidades	56

Lista de abreviaturas e siglas

VSM	Virturian Sense Maker;
FTD	Full Thread Device;
FED	Full End Device;
SED	Sleep End Device;
MTD	Minimal Thread Device;
REED	Reelegible End Device;
OAD	Over the Air Download;
I2C	Inter-Integrated Circuit;
SPI	Serial Peripheral Interface;
FPGA	Field Programmable Gate Array;
OTBR	OpenThread Border Router;
SMT	Surface Mount Technology;
SMD	Surface Mount Device;
PTH	Pin Through Hole;
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
NCP	Network Co-Processor
CoAP	Constrained Application Protocol

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Revoluçãoes Industriais	19
1.2	Manutenção Preditiva	19
1.3	Motivação	20
1.4	Objetivos do Projeto	20
1.4.1	Objetivo Geral	20
1.4.2	Objetivos Específicos	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Padrão IEEE 802.15.4	23
2.2	Indústria 4.0	24
2.2.1	Análise de Vibração	24
2.2.2	Análise de Campo Magnético	26
3	METODOLOGIA	29
3.1	Descrição do Processo e Especificações	29
3.2	Arquitetura de Rede Sem Fio	30
3.2.1	OpenThread e Configuração	30
3.2.2	Gateway	33
3.2.3	Software Embarcado no Gateway	35
3.3	Arquitetura de Hardware e Firmware	38
3.3.1	Microcontrolador	38
3.3.2	Periféricos	40
3.3.2.1	Memória Flash Externa	40
3.3.2.2	Memória RAM Externa	40
3.3.2.3	FPGA	40
3.3.2.4	LEDs	40
3.3.3	Sensores	40
3.3.3.1	Sensor de Temperatura	40
3.3.3.2	Sensor de Vibração	41
3.3.3.3	Sensor de Campo Magnético	42
3.3.4	Alimentação	43
3.3.5	OAD	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Prototipagem	47

4.1.1	Fluxo do Processo de Prototipagem	47
4.1.2	Placa de Circuito Impresso	48
4.1.3	Componentes e Montagem	49
4.1.4	Testes de Validação	50
4.1.4.1	Conectividade IoT	52
4.1.4.2	Acelerômetro	52
4.1.4.3	Magnetômetro	54
4.1.4.4	Sensor de temperatura	55
4.1.4.5	Acesso às Memórias Externas	55
4.1.4.6	Medição da Tensão de Alimentação	55
4.2	Produção em Escala	56
4.3	Aplicação na Indústria	59
5	CONCLUSÕES	61
5.1	Conclusão	61
5.2	Propostas de Continuidade	61
	REFERÊNCIAS	63

1 Introdução

1.1 Revoluções Industriais

É vivenciada atualmente a Quarta Revolução Industrial, ou também chamada Indústria 4.0, uma expressão que engloba os conceitos de Cyber-Física, fábricas inteligentes, *Internet of Things*, *Big Data*, *Cloud*, Interligência Artificial e outros que dizem respeito a essa era digital ou era das máquinas. A Primeira Revolução Industrial, foi marcada, principalmente, pelo uso das máquinas à vapor como potente fonte de trabalho, aumentando a produtividade e a variedade da produção. A Segunda Revolução Industrial foi marcada pelos modelos de produção em série de Henry Ford que possibilitaram entregar produtos com o mesmo padrão de qualidade e em larga escala. A robótica consolidou a Terceira Revolução Industrial, as máquinas passaram a dominar o chão de fábrica, substituindo o trabalho humano em grande parte do processo fabril. Todas essas revoluções são chamadas assim pois possibilitaram um ganho para a indústria, a Indústria 4.0 não foge a regra e busca aplicar os conceitos citados, que serão explicados com mais rigor no decorrer desse trabalho, para tornar as máquinas mais eficientes, melhorar a qualidade do produto final, otimizar tempo e recursos. Tendo em vista essa necessidade de aumento da produção, lucro e a concorrência no mercado, e sabendo que as indústrias dependem de suas máquinas, equipamentos elétricos e mecânicos para produzir em larga escala, podemos afirmar que a condição mecânica desses equipamentos é um fator primordial na busca pela eficiência na produtividade.

1.2 Manutenção Preditiva

A manutenção preditiva é o acompanhamento periódico de máquinas e equipamentos, através de dados coletados por sensores ou inspeções. As técnicas usadas para manutenção preditiva são variadas: temos a análise da vibração do equipamento, inspeção visual, monitoramento da temperatura, análise da deformação do material, dentre outras. Por meio desses dados é possível detectar padrões e agendar uma manutenção precedendo uma possível falha, essa detecção pode ser feita por humanos, por algoritmos ou ambos. A previsão de uma falha, quando assertiva, diminui o número de paradas não programadas e aumenta a vida útil dos equipamentos, esses números geram valores para a indústria, pois refletem diretamente na sua base de funcionamento.

1.3 Motivação

Tendo em vista o mercado aberto a novas tecnologias e o avanço da Indústria 4.0, foi desenvolvido pela empresa Virturian um algoritmo de detecção de padrões de falhas, ou seja, um algoritmo que utiliza dados coletados por sensores e prediz a saúde de um equipamento elétrico, principalmente de motores. Para alimentar o algoritmo com os dados foi utilizado durante o ano de 2018, uma placa multissensorial desenvolvida pela Texas Instruments, SimpleLink™ Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag ([INSTRUMENTS, 2016](#)), que possui dez sensores, onde são utilizados para medição os sensores de vibração, campo magnético e temperatura. A medição de temperatura é uma das mais importantes, e o sensor presente nessa placa ficou indisponível no mercado. Viu-se então, a necessidade de atualização da tecnologia utilizada, e com isso, foi decidido por desenvolver uma placa de aquisição própria.

O projeto tratado nesse documento é a criação, desenvolvimento, produção, teste e aplicação de um dispositivo remoto de aquisição de sinais, superior ao utilizado anteriormente, utilizando um microcontrolador com maior capacidade de processamento e sensores que permitem amostrar sinais com maior frequência.

O dispositivo foi especificado para ser capaz de coletar sinais de qualidade, em alta frequência de amostragem, por meio de sensores de vibração, temperatura e campo magnético. Os novos parâmetros para especificação foram escolhidos tendo como base o *feedback* das instalações anteriores além de custo, benefícios, tecnologia e aceitação no mercado.

1.4 Objetivos do Projeto

1.4.1 Objetivo Geral

Sabendo-se da necessidade de se desenvolver um sistema IoT de aquisição de sinais, tem-se como objetivo apresentar as etapas que possibilitam a aplicação de um produto no mercado, partindo desde a etapa de especificação até a implantação em uma indústria. O que inclui prototipagem, testes e produção em escala.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica do tema abordado;
- Especificar e desenvolver a arquitetura IoT;
- Especificar e desenvolver o *hardware* e *firmware*;
- Realizar produção e teste do protótipo;

- Realizar produção do lote piloto;
- Analisar os resultados obtidos;
- Indicar os custos do projeto.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Padrão IEEE 802.15.4

O IEEE é uma associação sem fins lucrativos criada nos Estados Unidos em 1963. Um de seus objetivos é gerar conhecimento nos campos de engenharia elétrica, eletrônica e computação. O IEEE, ao longo dos anos, vem padronizando diversos protocolos de comunicação sem fio, tendo em vista o crescimento e a interoperabilidade de tecnologias já existentes no mercado e aquelas que serão desenvolvidas.

Segundo ([MELO, 2017](#)) as normas enquadradas dentro da IEEE 802 visam fornecer as especificações necessárias para o controle de acesso e a camada física de uma rede. Dentre os diversos subgrupos existentes, destacam-se:

- IEEE 802.3 - Ethernet;
- 802.11- Redes locais sem fios (WLAN);
- Redes de área pessoal sem fios (WPAN).

A tecnologia dos rádios utilizados na montagem da rede, e que serviu de base para o desenvolvimento da arquitetura de software e hardware do trabalho aqui apresentado, faz parte do padrão IEEE 802.15.4. Este padrão regula os aspectos relacionados à camada física e ao controle de acesso ao meio MAC - *Media Access Control* para redes *wireless*. Esse padrão engloba os protocolos Zigbee, Bluetooth e Thread, esse último como foco desse trabalho. As camadas que compõe o padrão IEEE 802.15.4 são mostradas na [Figura 1](#)

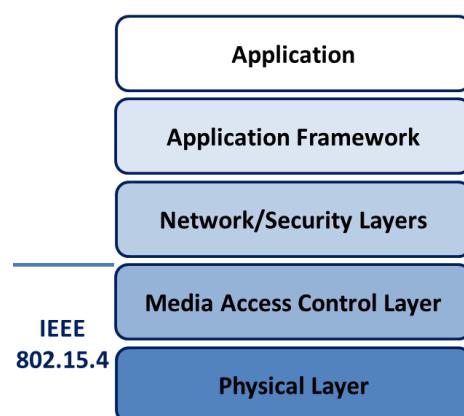


Figura 1 – Camadas que compõe o padrão IEEE 802.15.4

2.2 Indústria 4.0

IoT - *Internet of Things*, se refere à conexão de objetos de uso geral à internet, permitindo ampla distribuição de dispositivos que comunicam com humanos e outros sistemas. ([XIA et al., 2012](#)).

Os objetos citados, além de utilizados em larga escala para aplicações de uso pessoal, tais como: automação residencial e *wearable device* (tecnologias vestíveis), estão sendo aplicados em larga escala na Indústria, o que levou a chamada Indústria 4.0. Segundo ([SILVEIRA, 2019](#)) Indústria 4.0 é um conceito que engloba as principais inovações tecnológicas dos campos de automação, controle e tecnologia da informação, aplicadas aos processos de manufatura. A partir de Sistemas Cyber-Físicos, Internet das Coisas e Internet dos Serviços, os processos de produção tendem a se tornar cada vez mais eficientes, autônomos e customizáveis. São princípios e pilares da Indústria 4.0:

- Capacidade de operação em tempo real: Permitindo tomadas rápidas de decisões, essencial para manutenção preditiva e até mesmo corretiva.
- Virtualização: Sensores espalhados e implantados em uma fábrica possibilitando acompanhar em um monitor a situação de uma planta.
- IoT: Base da indústria 4.0, sensores e atuadores conectados à rede mundial.
- Segurança: Essencial para uma aplicação resiliente com baixas chances de falhas, um dos fatores primordiais que levaram a escolha da rede Thread nesse trabalho descrito.
- *Big Data Analytics*: São estruturas de dados muito extensas e complexas que utilizam novas abordagens para a captura, análise e gerenciamento de informações.

2.2.1 Análise de Vibração

Quando o assunto Indústria 4.0 e manutenção preditiva é abordado, a vibração mecânica dos equipamentos industriais se torna o principal alvo de análise. Segundo ([REIS, 2010](#)), é possível detectar falhas mecânicas a partir de dados coletados por um acelerômetro. Além disso, conhecendo o circuito equivalente de um motor de indução é possível aplicar modelos de detecção de padrões e identificar a causa de um problema mecânico ou até mesmo elétrico.

Existem diversos tipos de falhas que podem ser apresentadas por um motor, as mais comuns são falhas no rotor, estator, mancal de rolamento ou falha de excentricidade. As vibrações também podem identificar tensões elétricas desbalanceadas e redução na eficiência energética. O primeiro passo para análise da vibração é a representação dos

sinais no espectro da frequência, que podem indicar a possível causa. Os principais defeitos e frequências características são apresentados na [Tabela 1](#).

Tabela 1 – Defeitos em motor de indução e frequências características

Defeitos	Frequência característica
Desbalanceamento do conjunto do estator	29 Hz
Desbalanceamento do conjunto do rotor	58 Hz
Aerodinâmico	350 Hz
Rolamento	1600 Hz
Correias	15 Hz

2.2.2 Análise de Campo Magnético

De acordo com (Wildermuth et al., 2015) o uso de micro-sensores em aplicações industriais é de grande interesse, uma vez que as condições ambientais dificultam o acesso de grandes maquinários. Sensores de campo magnético pequenos facilitam a implantação e geram bons resultados. O desempenho de magnetômetros aplicado em motores elétricos foi estudado, gerando análises que mostram a viabilidade do seu uso e da aplicação do dispositivo VSM Sensor, foco desse trabalho.

A Figura 2 exibe, no domínio da frequência, o resultado da coleta de sinais pelo magnetômetro com boa saúde. O motor utilizado para análise é de indução com 3 pares de polos.

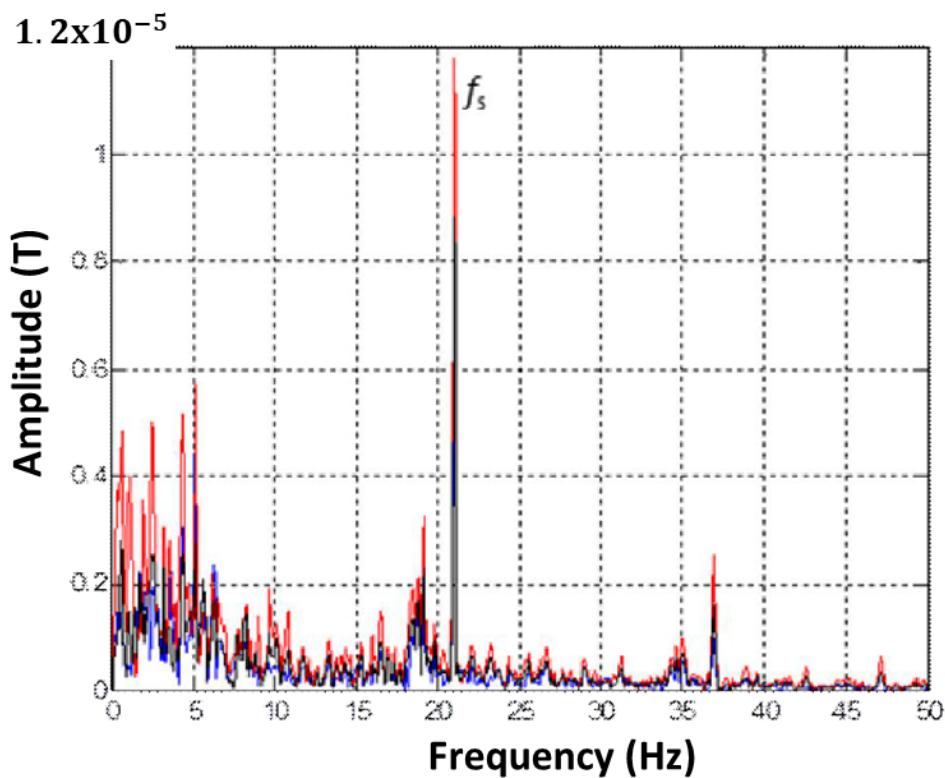


Figura 2 – Resultados da resposta em frequência dos dados de campo magnético de um motor em bom estado. Os eixos X, Y e Z estão representados pelas cores vermelho, preto e azul respectivamente

Pode-se observar uma amplitude maior em $f_s \approx 20\text{Hz}$ em relação às outras frequências, f_s é a velocidade de rotação síncrona, sendo $f \approx 60\text{Hz}$ a frequência da tensão de alimentação e p o número de polos, f_s pode ser algebricamente obtido da seguinte forma:

$$f_s = \frac{120f}{p} = f_s = \frac{120 \cdot 60}{6} \approx 1200\text{rpm} \approx 20\text{Hz} \quad (2.1)$$

Segundo (Ceban; Pusca; Romary, 2012), para o caso específico de um motor com rotor danificado, a consequência é um desbalanceamento do fluxo magnético o que gera um

aumento na amplitude relativa as frequências $f_{bb} = sf_s$ e $3sf_s$, sendo s o escorregamento. Considerando f_x a velocidade de operação, o escorregamento é dado por:

$$s = \frac{f_s - f_x}{f_s} \quad (2.2)$$

Os resultados (Wildermuth et al., 2015), ilustrados na Figura 3, indicam que duas frequências além de f_s se destacam em intensidade de campo magnético, uma em 0.72Hz e outra em $2,2\text{Hz}$ e essas são então as frequências relativas a sf_s e $3sf_s$ respectivamente, uma vez que a falha era conhecida.

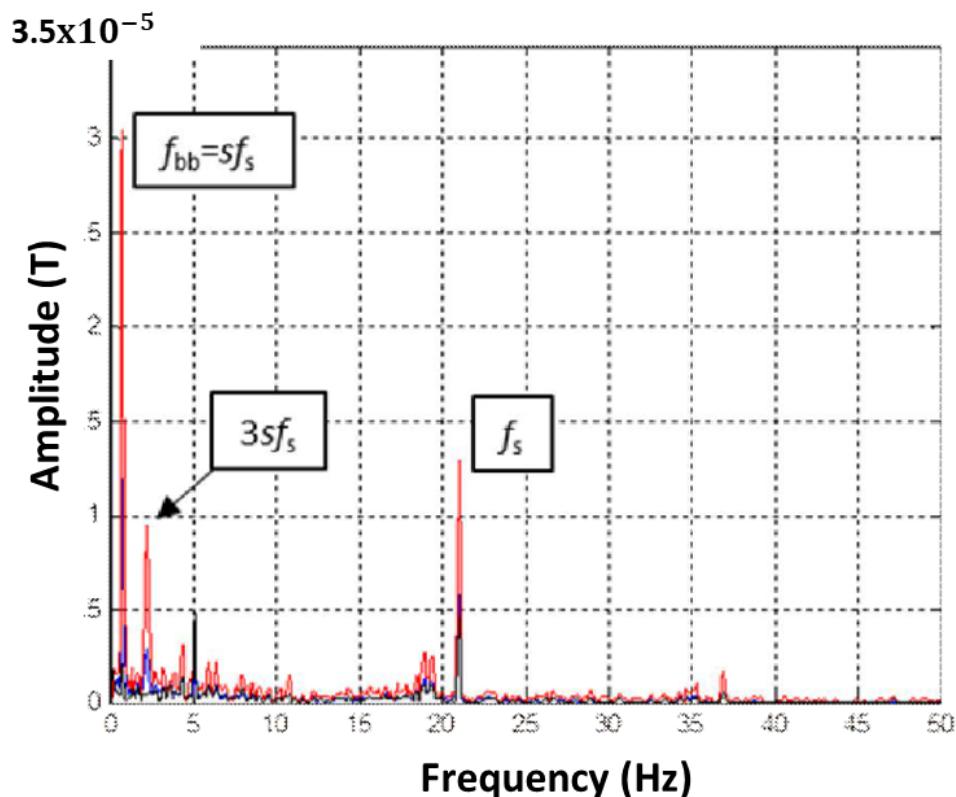


Figura 3 – Resultados da resposta em frequência dos sinais de campo magnético de um motor com rotor danificado. Os eixos X, Y e Z estão representados pelas cores vermelho, preto e azul respectivamente

Concluiu-se que é possível realizar o processo inverso, analisando o espectro de frequência e à partir dele identificar um possível defeito.

3 Metodologia

3.1 Descrição do Processo e Especificações

O processo consiste em coletar sinais a partir dos sensores instalados nos motores e enviar através de uma rede sem fio para um servidor na nuvem. Para que isso se torne possível, a aquisição é realizada pelo dispositivo VSM Sensor: Virturian Sense Maker Sensor. Os dados são enviados para um *gateway* com acesso à internet, que os envia para o servidor do Google Cloud. Essa arquitetura é mostrada na [Figura 4](#). As máquinas remotas do Google Cloud executam os algorítimos de processamento de sinais e exibem os resultados na tela, essa parte não será abordada com detalhes nesse trabalho.



Figura 4 – Arquitetura proposta - VSM Sensor, Gateway e Nuvem

O VSM sensor foi projetado para ser capaz de coletar dados de temperatura, vibração e campo magnético através de sensores, enviar dados para o *gateway* utilizando um protocolo de comunicação sem fio, ter duração de bateria superior a 1 ano e permitir que o *firmware* do VSM Sensor seja atualizado remotamente: OAD (*Over the Air Download*).

3.2 Arquitetura de Rede Sem Fio

3.2.1 OpenThread e Configuração

A tecnologia de comunicação sem fio escolhida no desenvolvimento desse trabalho é a OpenThread ([OpenThread, 2019a](#)). Essa tecnologia, disponibilizada pelo Google, é uma implementação *open-source* do Thread ([OpenThread, 2019b](#)). O Google trouxe essa tecnologia para o mercado com o objetivo de acelerar o desenvolvimento de produtos conectados em uma residência, mas que também se mostra com uma alta capacidade de portabilidade para a indústria. Thread é baseado no protocolo IPv6 para aplicações em IoT na camada física IEEE 802.15.4-2006, permitindo uma comunicação entre dispositivos em rede mesh com baixo consumo de energia. As outras aplicações na mesma camada física contemplam o ZigBee, Z-Wave e Bluetooth 5.0, isso significa que o microcontrolador que torna a comunicação do VSM Sensor possível em OpenThread pode também se comunicar por esses outros protocolos citados, ou seja, a portabilidade para o Bluetooth 5.0 é possível, o que torna a escolha ainda mais segura.

O OpenThread permite uma aplicação segura e estável. As principais características são:

- Simplicidade: Fácil instalação e operação;
- Segurança: Todos os nós da rede Thread são autenticados e as comunicações são criptografadas;
- Confiabilidade: A rede se recompõe de forma automática e caso haja dois ou mais dispositivos fora da área de cobertura, esses formam uma nova rede.
- Eficiência: Dispositivos com baixo consumo podem operar dormindo permitindo que a bateria dure por anos;
- Escalabilidade: A rede permite integração de centenas de dispositivos;

Cada nó pode ser configurado de diversas formas, que podem ser divididas em duas categorias: FTDs - *Full Thread Devices* e MTDs - *Minimal Thread Devices*. Os dispositivos *Full Thread Devices* podem ser:

- *Routers*;
- *Router Eligible End Device* (REED) — Podem ser promovidos a roteador, caso necessário;
- *Full End Device* (FED) — Não podem ser promovidos a roteadores.

Um dispositivo configurado como *Minimal Thread Device* não é capaz de encaminhar dados provenientes de outros dispositivos, pois isso é responsabilidade de um FTD. São dois tipos de MTDs:

- *Minimal End Device* (MED) — Rádio está sempre ligado, utilizado quando a aplicação demanda uma comunicação com o dispositivo a qualquer momento;
- *Sleepy End Device* (SED) — Rádio está normalmente desligado e liga quando é necessário enviar alguma informação para um *router*.

Os *routers*, ou roteadores, são os nós capazes de encaminhar pacotes para qualquer outro nó da rede e de permitir a entrada de novos dispositivos na rede o que é chamado de comissionamento. Os *End Devices* se comunicam primeiramente com um *router*, ou seja, *End Devices* não se comunicam ponto a ponto entre si. Além dessas diferenças, o *Router* mantém o rádio sempre ligado, enquanto o *End Device* pode desligar o rádio em alguns momentos reduzindo o consumo de energia. *Routers* também são chamados de *Parents* e *End Devices* de *Childs*. Os tipos estão representados na [Figura 5](#) e [Figura 6](#).

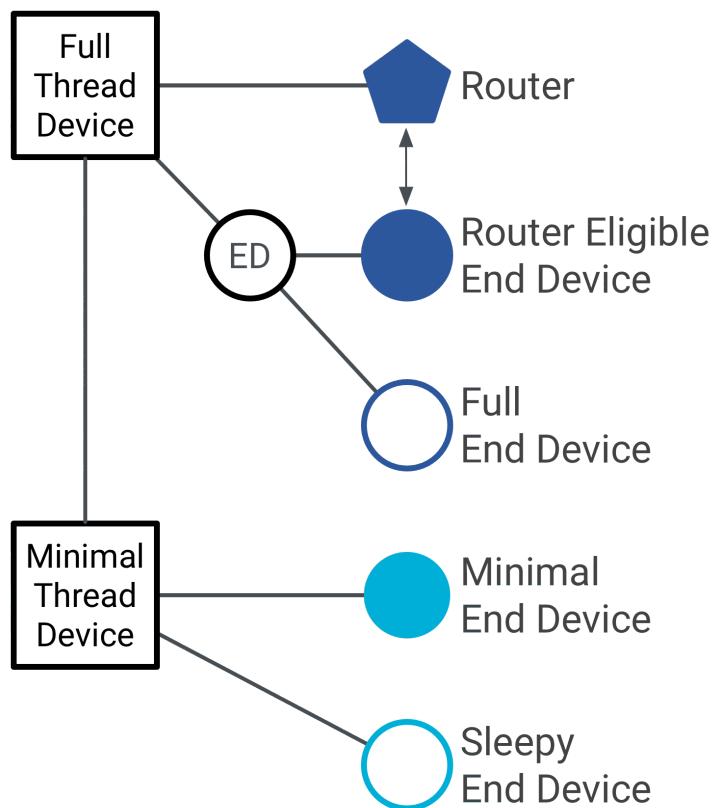


Figura 5 – Tipos de nós da rede Thread: classificados como FTDs e MTDs

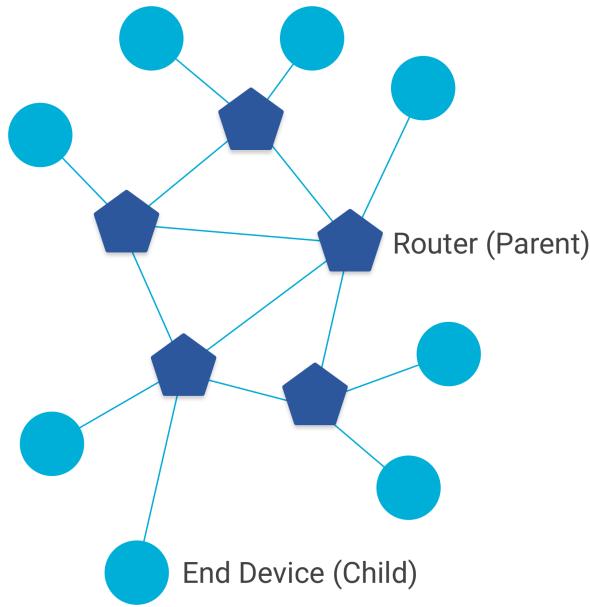


Figura 6 – Exemplo de topologia evidenciando *routers* e *childs*

Qualquer configuração de rede OpenThread precisa de um *Thread Leader*. Esse é o nó responsável por organizar a rede e estruturá-la de maneira eficiente. Outro nó essencial é o *Open Thread Border Router* (OTBR), que faz a conexão entre a rede e a internet, nesse ponto é necessário uma comunicação que pode ser, por exemplo: via WiFi, Ethernet ou LTE. O OTBR é também um *router*, e consequentemente pode ser um *Thread Leader*. Um exemplo de topologia com OTBR e comunicação com a nuvem (internet) é ilustrado na Figura 7.

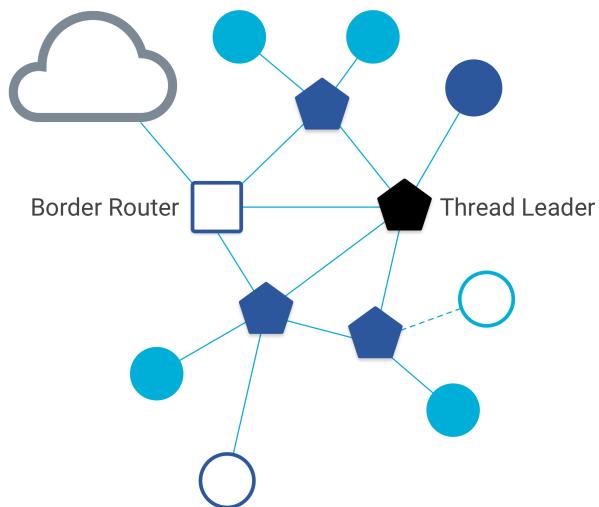
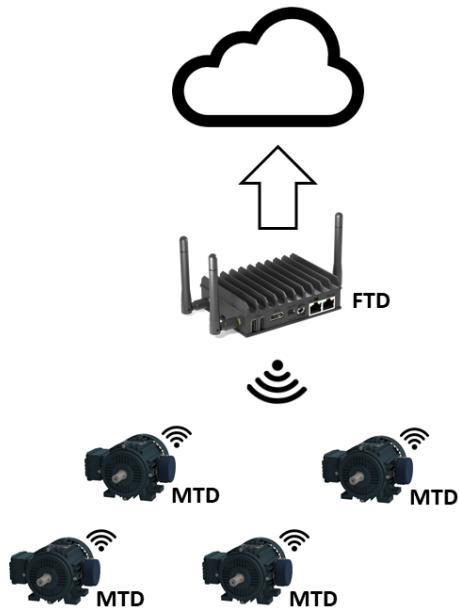


Figura 7 – Exemplo de topologia evidenciando o OTBR e o líder de rede.

Para aplicação desejada foram considerados dois casos, os casos em larga escala, com mais de vinte sensores e os casos em pequena escala, com menos de vinte sensores.

Para aplicações em larga escala são necessários alguns roteadores e para aplicações em pequena escala os sensores podem se comunicar diretamente com o *gateway*, economizando energia.

Visando atender o primeiro cliente com a nova arquitetura, foi implementada a configuração de pequena escala, conforme pode ser observado na [Figura 8](#), pois demandou a instalação de quatro dispositivos VSM Sensor configurados como MTD e um *gateway*. Os MTDs são MED, mas a atualização remota de *firmware* os permitem tornar SED.



Fonte: Autor

Figura 8 – Sistema proposto: 4 VSM Sensor (MTD) e um *gateway* (FTD)

3.2.2 *Gateway*

Como já mencionado, o *gateway* é o ponto que mantém toda a aplicação comunicando com a internet. Durante todo o desenvolvimento fez-se necessário utilizar um OTBR para realização de todos os testes. O *gateway* de teste contempla os seguintes *hardwares*:

- Raspberry Pi 3 Model B;
- nRF52840 Micro Dev Kit USB Dongle (Rádio);
- Fonte chaveada 5.0V/3A com cabo micro usb;
- SSD card 16GB;

Essa configuração para testes é exibida na [Figura 9](#).

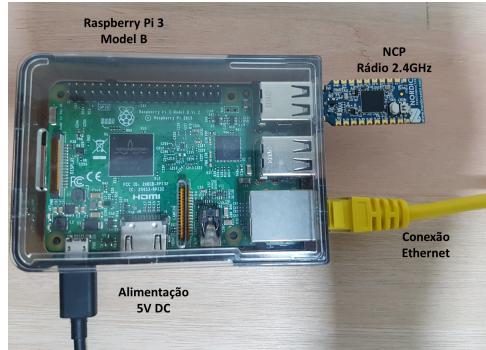


Figura 9 – Gateway para testes: *dongle* USB conectado ao Raspberry Pi 3 Model B

A aplicação na indústria demanda um hardware que apresenta robustez ao ambiente com poeira, umidade, entre outros. Por isso foi escolhida uma configuração adequada para esse ambiente, com possibilidade de conexão WiFi, Ethernet e LTE, sendo versátil. O rádio escolhido foi o GW16126 CATM1 / BT5 Mini-PCIe Card, permitindo a conectividade com a rede OpenThread. Todas as conexões sem fio presentes nesse *gateway* demandam uma antena externa, o que irá garantir um aumento da área de cobertura, tanto para conexão com internet quanto para rede OpenThread. O *gateway* para aplicação na indústria contempla as seguintes partes:

- FITLET2 IoT Gateway;
- WiFi 802.11ac;
- GW16126 CATM1 / BT5 Mini-PCIe Card (Rádio);
- Fonte chaveada 12V;

O gateway para aplicação na indústria é exibido na [Figura 10](#).



Figura 10 – *Gateway* robusto para indústria

3.2.3 Software Embarcado no *Gateway*

Tanto para o *gateway* de testes quanto para o gateway aplicado na indústria, o sistema operacional utilizado é o Linux. Faz-se necessário instalar no ambiente Linux as aplicações que satisfazem as características demandadas. A aplicação exige que o micro-computador utilizado seja também um nó da rede OpenThread. Para isso fez-se necessário compilar e gravar o *firmware* disponível em ([OpenThread, 2019b](#)) na respectiva placa de rádio, a placa de rádio é denominada NCP (*Network Co-Processor*). O *firmware* foi gravado nas respectivas placas utilizando o software nRF CONNECT ([nRF..., 2019](#)). Com o rádio conectado, o próximo passo é instalar a aplicação WPANTUND ([OpenThread, 2019a](#)) no Linux que permite a comunicação do sistema com o NCP. Após completada a instalação, a rede é formada pelo OTBR, como pode ser visto na [Figura 11](#)

```
$sudo wpanctl status

wpan0 => [
    "NCP:State" => "associated"
    "Daemon:Enabled" => true
    "NCP:Version" => "OPENTHREAD/20170716-00982-g4c6801ad; NRF52840; Jan 17 2019 10:07:33"
    "Daemon:Version" => "0.08.00d (/1a6a91d; Jan 23 2019 14:17:05)"
    "Config:NCP:DriverName" => "spinel"
    "NCP:HardwareAddress" => [2C1E5A183110A8DF]
    "NCP:Channel" => 21
    "Network:NodeType" => "leader"
    "Network:Name" => "OpenThread"
    "Network:XPANID" => 0x1111111122222222
    "Network:PANID" => 0x1234
    "IPv6:LinkLocalAddress" => "fe80::e8b4:3169:1da:7066"
    "IPv6:MeshLocalAddress" => "fd11:1111:1122:0:8177:29d2:a0c:551f"
    "IPv6:MeshLocalPrefix" => "fd11:1111:1122::/64"
    "com.nestlabs.internal:Network:AllowingJoin" => false
]
```

Figura 11 – Rede OpenThread formada

Podemos observar que a rede está operando com o nome OpenThread no canal 21. Nesse caso a rede apresentou instabilidade, o que demandou a alteração para o canal 26. A comunicação da rede OpenThread é realizada na frequência 2.4GHz, ou seja, é a mesma frequência de operação do WiFi. Segundo ([NXP, 2015](#)), o IEEE 802.11 contempla um total de 14 canais com larguras de banda iguais a 5MHz cada. Por outro lado, o IEEE 802.15.4, camada física do OpenThread, contempla 16 canais, cada um com largura de banda equivalente a 2MHz. Para que não haja sobreposição de frequências utilizadas e interferências, é justificada escolha do canal 26, pois é considerado aplicações na América Latina que utiliza o padrão IEEE 802.11b conforme ilustrado na [Figura 12](#). Com essa configuração a rede apresentou estabilidade.

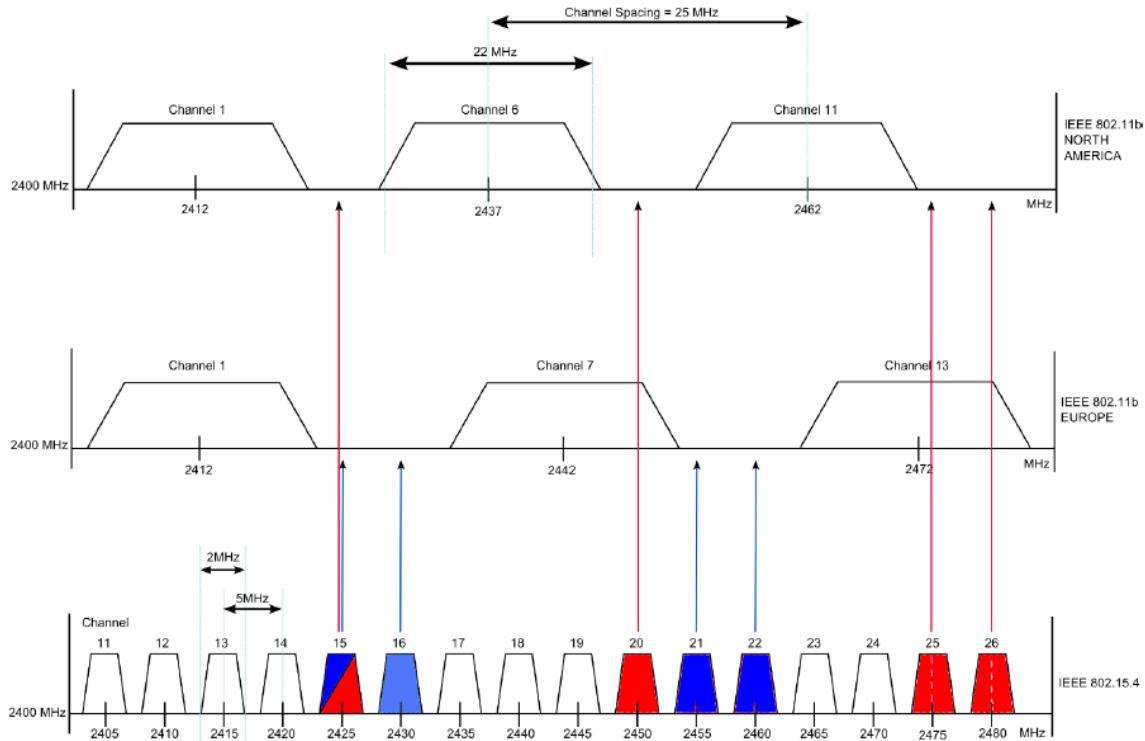


Figura 12 – Canais concorrentes do IEEE 802.11 e 802.15,4

Utilizando o aplicativo para celular WiFi Analyzer (WIFI..., 2018) fez-se a varredura em toda a região que abrange os canais citados anteriormente. O local físico analisado é o mesmo da realização dos testes. O resultado é exibido na Figura 13.

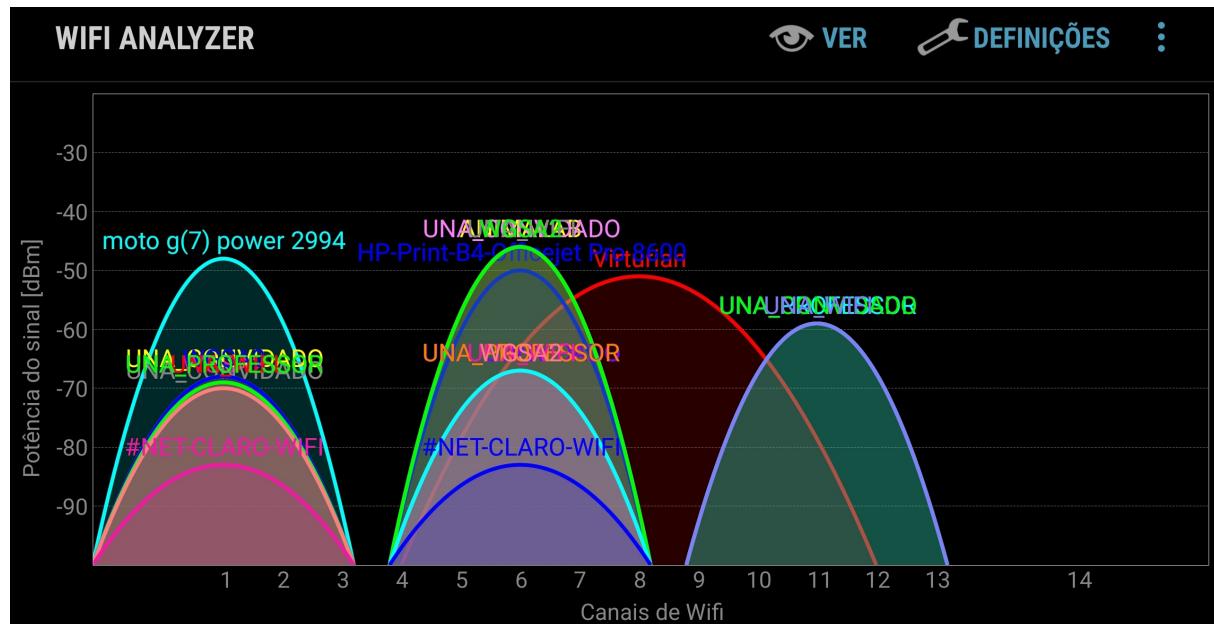


Figura 13 – Análise dos canais de WiFi no ambiente de teste, onde é observado a presença de várias redes WiFi em vários canais.

A transferência de pacote de dados entre VSM Sensors e OTBR é realizada por meio do protocolo CoAP (*Constrained Application Protocol*) (BORMANN, 2016), esse protocolo é especializado para comunicação entre dispositivos IoT. As mensagens CoAP são destinadas sempre a um endereço IPv6. Na arquitetura da rede OpenThread, cada dispositivo tem um endereço IPv6, conforme mostrado na Figura 11, o IPv6 do gateway é *fd11 : 1111 : 1122 : 0 : 8177 : 29d2 : a0c : 551f*.

Os VSM Sensors enviam pacotes de dados para o *gateway* via CoAP e o *gateway* envia as mensagens para o servidor na nuvem pelo protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) (MQTT, 2014), também especializado em aplicações IoT.

Para gerenciar o tráfego de dados, foi desenvolvida uma aplicação na linguagem Node.js denominada CoAP-Server. Já o VSM Sensor faz o papel de um CoAP-Client que, por sua vez, destina sua mensagem ao endereço de IPv6 do gateway em uma determinada URL (Uniform Resource Locator), o CoAP-Server identifica essas mensagens e executa a ação necessária, essa arquitetura é ilustrada na Figura 14.

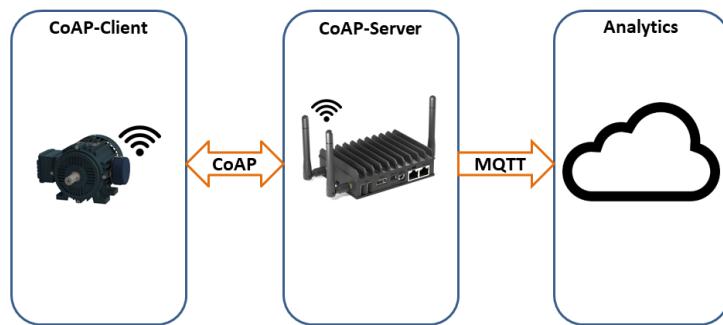


Figura 14 – Arquitetura e protocolos de comunicação

As mensagens enviadas pelo Coap-Client para URLs refletem diretamente em ações executadas pelo CoAP-Server, as ações são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – URLs e ações.

URL	Ação do CoAP-Server
/DATA	Processar o pacote de dados e enviar via MQTT para o servidor na nuvem
/CONFIG	Responder ao Coap-Client com o pacote de dados referente à configuração do acelerômetro e magnetômetro
/ACC	Processar o pacote de dados de aceleração e enviar via MQTT para o servidor na nuvem
/MAG	Processar o pacote de dados de campo magnético e enviar via MQTT para o servidor na nuvem
/OAD	Responder ao Coap-Client com a versão do firmware novo, caso haja
/IMAGE	Responder ao Coap-Client com o bloco requisitado do firmware para atualização remota

3.3 Arquitetura de Hardware e Firmware

3.3.1 Microcontrolador

O microcontrolador é a base de toda a arquitetura. Para a aplicação foi escolhido o CC2652r do fabricante Texas Instruments ([INSTRUMENTS, 2018](#)). O CC2652r possibilita a comunicação de alta velocidade entre periféricos e sensores via 4 fios pelo protocolo SPI - *Serial Peripheral Interface* e comunicação a dois fios via I2C - *Inter-Integrated Circuit*. O microcontrolador possui várias entradas e saídas digitais e analógicas que foram utilizadas para integração com os periféricos. As características principais da arquitetura do MCU - *Microcontroller Unit* CC2652r são apresentadas na [Figura 15](#).

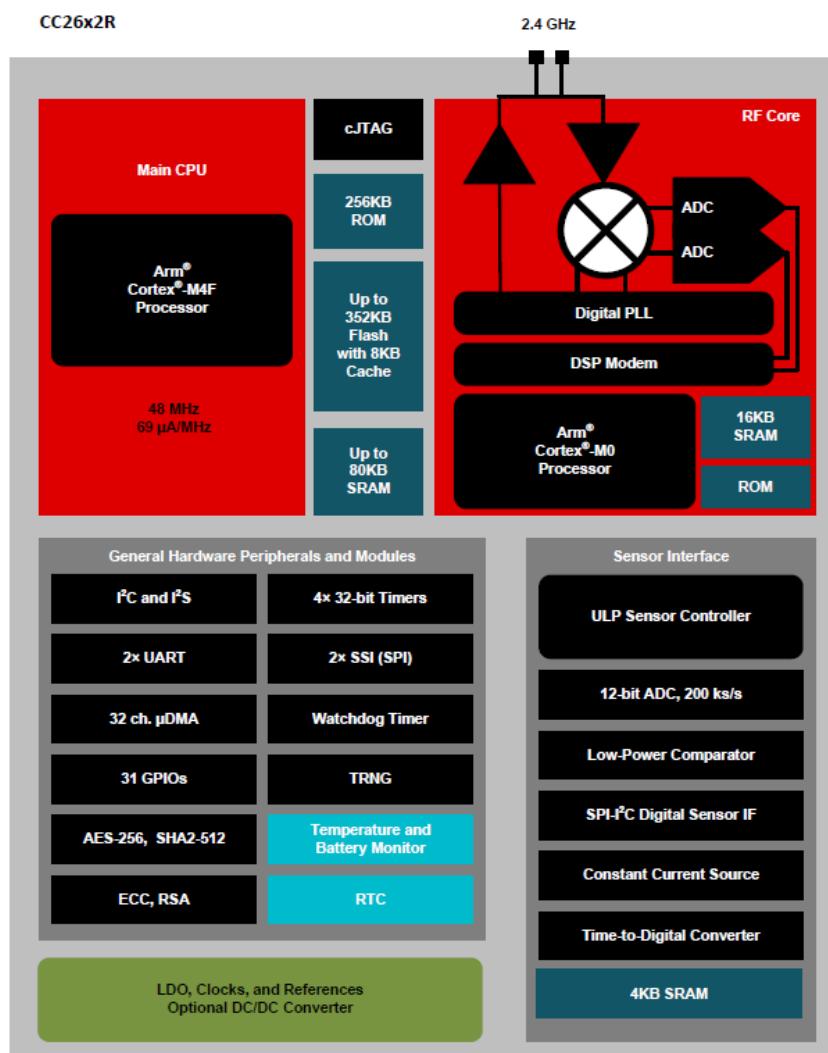


Figura 15 – Diagrama geral mostrando a arquitetura do MCU CC2652r

O desenvolvimento do *firmware* para o MCU CC2652r foi realizado tendo como base a *stack* do OpenThread ([OpenThread, 2019a](#)) e o TIRTOS - *Texas Instruments Real Time Operational System* de código aberto ([INSTRUMENTS, 2019](#)). Utilizou-se a IDE

Code Composer Studio, que integra o compilador e a interface para carregar e depurar o código. A linguagem de programação utilizada é a linguagem C.

A aplicação é separada em duas threads, a prioritária se refere à aplicação de gerenciamento de rede presente em otstack.c e a não prioritária que se refere a aplicação do usuário. O código VSM.c estrutura e executa as funções principais das bibliotecas de sensores, bibliotecas do OpenThread, atualização automática de *firmware* e comunicação CoAP com o *gateway*. Essa estrutura foi construída com base em eventos: após ocorrência de um determinado evento, é executada a ação necessária. Tanto a aplicação do usuário quanto a de gerenciamento de rede acessam as outras de forma dinâmica. A figura apresenta os eventos presentes em VSM.c. Esses eventos são divididos em três categorias: comissionamento, envio de pacotes de dados CoAP para o *gateway* e administração OAD.

- Comissionamento: Acessa api da rede Thread, é a aplicação do usuário responsável por se conectar a uma determinada rede criada pelo OTBR e por mantê-la estável.
- Configuração e pacotes CoAP: Caso o comissionamento esteja OK, os eventos aqui presentes são responsáveis por acessar os sensores e enviar os devidos pacotes com a massa de dados para o gateway.
- Administração OAD: administra o envio e recebimento de pacotes relativos à atualização automática de *firmware*.

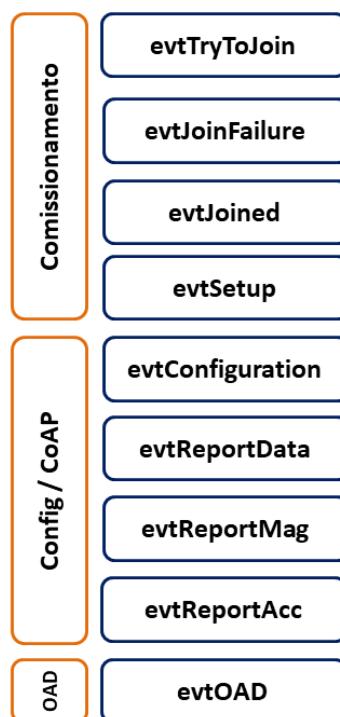


Figura 16 – Eventos presentes em VSM.c

3.3.2 Periféricos

3.3.2.1 Memória Flash Externa

A atualização remota de *firmware* demanda o uso de uma memória flash externa. Fez-se a escolha pelo componente AT25XV041B do fabricante Adesto Technologies ([TECHNOLOGIES, 2017](#)) com capacidade de armazenar até 4 Mbit. Esse periférico comunica com o microcontrolador CC2652r a 4 fios, via protocolo SPI.

As funções desenvolvidas são de leitura e escrita de páginas de dados na memória, além de funções que colocam o periférico em *sleep mode*, para economizar energia.

3.3.2.2 Memória RAM Externa

A memória RAM faz-se necessária quando a aplicação demanda um uso de memória volátil maior do que a que se faz presente no microcontrolador. O componente escolhido foi 20005142C ([MICROCHIP, 2014](#)) com 1 Mbit de capacidade e que se comunica com o microcontrolador via SPI. A memória RAM externa não é utilizada nessa aplicação pois a memória interna do microcontrolador CC2652r é suficiente.

3.3.2.3 FPGA

A fim de se desenvolver aplicações futuras que demandam algoritmos de alta complexidade e análise praticamente instantânea de dados, a FPGA (Field Programmable Gate Array) faz-se necessária. Para essa primeira aplicação a FPGA não foi utilizada pois a capacidade de processamento do CC2652r se mostrou suficiente. Fez-se a escolha pela Intel MAX 10 FPGA ([INTEL, 2014](#)).

3.3.2.4 LEDs

Dois LEDs vermelhos estão presentes no projeto. Um conectado à FPGA e outro ao microcontrolador, os LEDs são necessários durante os testes pois são ótima fonte de visualização na depuração de código. Os LEDs são ativados apenas durante os testes, em produção eles não são utilizados pois consomem energia e além de tudo não estão à mostra.

3.3.3 Sensores

3.3.3.1 Sensor de Temperatura

A aplicação demanda uma leitura de temperatura da carcaça do motor elétrico, utilizou-se o sensor de temperatura por infravermelho MLX90614 ([MELEXIS, 2018](#)) do fabricante Melexis. Esse sensor permite realizar medição de temperatura sem contato, permitindo obter temperaturas na faixa de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$ na carcaça do próprio sensor

e temperaturas na faixa de -70°C a $+380^{\circ}\text{C}$ na carcaça do motor elétrico, essa por infravermelho. O sensor possui comunicação a dois fios I2C (Inter-Integrated Circuit), possibilitando a comunicação com o microcontrolador CC2652r. Criou-se uma biblioteca de funções para que o CC2652r acessasse os registradores do MLX90614 coletando os dados de temperatura. A Figura 17 exibe, de forma resumida, o bloco funcional desse sensor de temperatura.

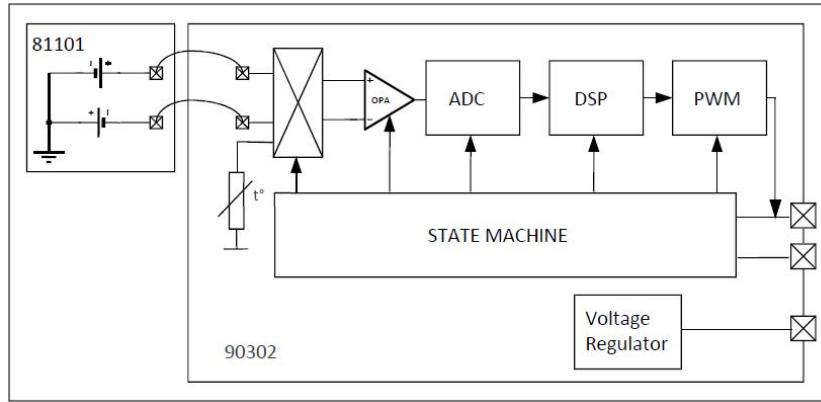


Figura 17 – Bloco funcional do sensor de temperatura MLX90614

A biblioteca é formada por quatro funções que acessam registradores do sensor pelo protocolo I2C:

- void mlx90614ESF_Setup(void): Configura o sensor ajustando parâmetros de emissividade do meio material;
- void mlx90614ESF_SleepMode(void): Coloca o sensor em estado *sleep*, utilizada quando o sensor não é utilizado durante a execução da aplicação, economizando energia;
- void mlx90614ESF_ExitSleepMode(void): Ativa o sensor, desligando o *sleep mode*, utilizada quando uma medição é realizada.
- void mlx90614ESF_Acquisition(oad_vsmData_t *oad_vsmData_p, uint8_t sample): acessa os registradores contendo os dados de temperatura da carcaça e temperatura do objeto (motor). Aqui é feito o condicionamento de sinais, para transformar os dados de saída em 16bits em inteiros.

3.3.3.2 Sensor de Vibração

O sensor de vibração designado para aplicação é o KX122-1037, do fabricante KIONIX (KIONIX, 2018), esse sensor é capaz de coletar dados de aceleração nos eixos

X, Y e Z nas faixas selecionáveis $-2g$ a $2g$, $-4g$ a $4g$ ou $-8g$ a $8g$, sendo g a medida da aceleração da gravidade.

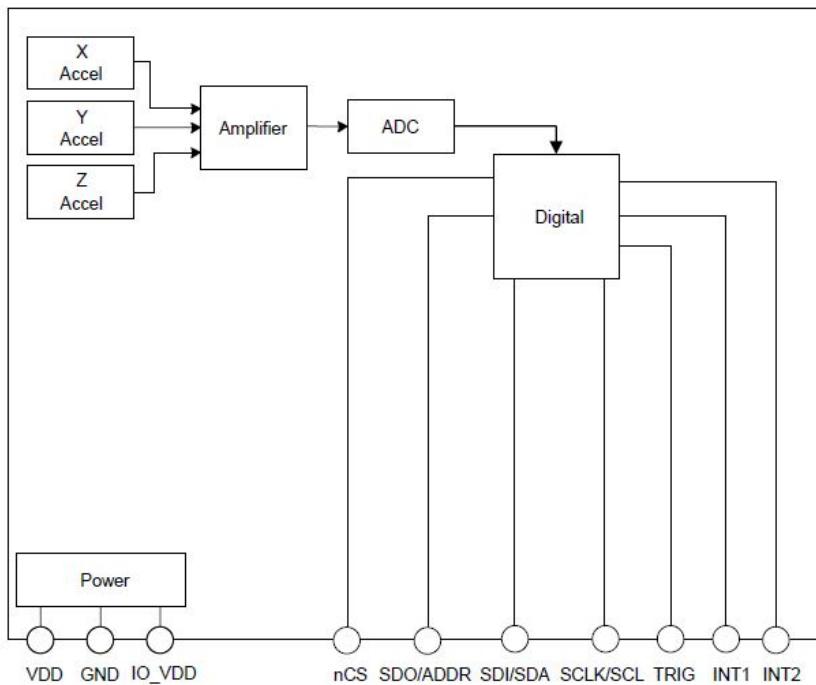


Figura 18 – Bloco funcional do acelerômetro triaxial KX122-1037

A biblioteca é formada por quatro funções que acessam registradores do sensor pelo protocolo I2C:

- void kx122_1037_Setup(int16_t accFreq): Configura o acelerômetro ajustando a sensibilidade, range de medição e frequência de amostragem;
- void kx122_1037_SleepMode(void): Coloca o sensor em estado *sleep*, utilizada quando o sensor não é utilizado durante a execução da aplicação, economizando energia;
- void kx122_1037_AcquisitionSingle(oad_vsmData_t *oad_vsmData_p, uint8_t sample): acessa os registradores coletando os dados de aceleração referentes aos eixos X, Y e Z, uma amostra por eixo. Os dados são condicionados para permitir a leitura de forma clara;
- void kx122_1037_AcquisitionBuffer(oad_vsmDataAcc_t *oad_vsmDataAcc_p): Coleta uma quantidade maior de dados por eixo e armazena em um *buffer*.

3.3.3.3 Sensor de Campo Magnético

O magnetômetro utilizado na aplicação é o MMC34160PJ, fabricado pela MEMSIC ([MEMSIC, 2013](#)), esse sensor é capaz de amostrar dados de campo magnético em três

eixos, X, Y e Z, na faixa de amplitude -16 a $+16$ gauss. O bloco funcional desse sensor é mostrado na Figura 19.

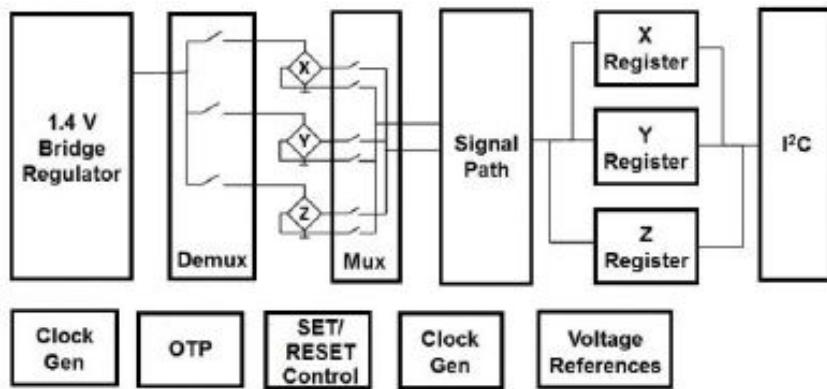


Figura 19 – Bloco funcional do magnetômetro MMC34160PJ

- void MMC34160PJ_AcquisitionBuffer(oad_vsmDataMag_t *oad_vsmDataMag_p, int16_t magFreq): Coleta uma quantidade maior de amostras por eixo e armazena em um *buffer*;
- void MMC34160PJ_AcquisitionSingle(oad_vsmData_t *oad_vsmData_p, uint8_t sample): acessa os registradores coletando os dados de campo magnético referentes aos eixos X, Y e Z, uma amostra por eixo. Os dados são condicionados para permitir a leitura de forma clara.

3.3.4 Alimentação

A alimentação do VSM Sensor é um fator crítico, pois a bateria deve ser duradoura. Foi projetado para aplicação um pack de 3 baterias ER14505 3.6V Primary lithium-thionyl chloride, da marca Ex-Power ([EX-POWER, 2018](#)), em paralelo. Cara bateria possui uma capacidade de 2400 mAh, após a montagem do pack é totalizado 7200 mAh.



Figura 20 – Bateria ER14505



Figura 21 – Pack com 3 baterias ER14505 em paralelo

A bateria é mostrada na [Figura 20](#) e o *pack* na [Figura 21](#). Um fator importante para escolha dessa bateria é a curva de descarga, exibida na [Figura 22](#). De acordo com essa curva, a tensão elétrica de saída se mantém constante na maior parte do tempo e decresce de maneira abrupta quando a carga está chegando ao fim. Dessa é possível utilizar praticamente toda a energia (7200 mAh) presente na bateria com uma tensão de saída suficiente para alimentar o circuito eletrônico. Tem-se então uma alta densidade de energia utilizada de maneira otimizada.

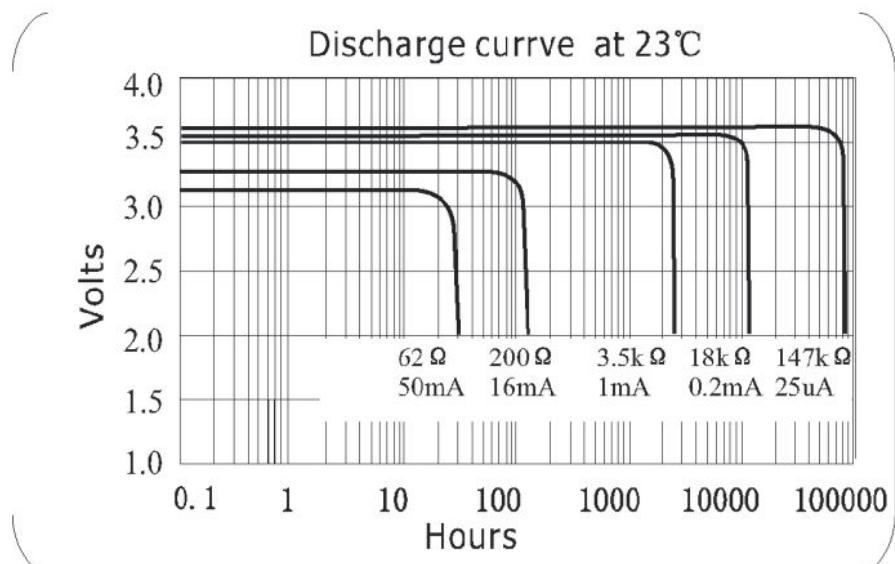


Figura 22 – Curva de descarga da Bateria ER14505

Para que seja possível alimentar todo o circuito com 3,3 V fez-se necessário a inclusão de um regulador de tensão linear que permite uma entrada de até 5 V e gera

saída regulada de 3,3 V. O componente para essa função é o S-13R1C33-N4T1U3, do fabricante ABLIC.

Por se tratar de um projeto de comunicação sem fio é necessário tomar conhecimento da tensão da bateria. Para isso, foi utilizada uma entrada analógica do microcontrolador CC2652r como conversor A/D (Analógico/Digital). O microcontrolador CC2652r possui uma medição interna de tensão de alimentação. Assim têm-se as leituras da tensão da bateria e da tensão regulada.

Foram criadas duas funções:

- AONBatMonBatteryVoltageGet(): Coleta os dados da tensão de alimentação do MCU CC2652r;
- void adc_external_voltage(oad_vsmData_t *oad_vsmData_p): Coleta e condiciona o sinal proveniente do conversor A/D que mede a tensão de alimentação externa (bateria).

3.3.5 OAD

OAD - *Over the Air Download* é o processo que permite a atualização remota de *firmware*. Para que isso ocorra o VSM Sensor (CoAP-Cliente) envia periodicamente uma mensagem para o *gateway* (CoAP-Server) a fim de se obter informações referentes a disponibilidade de um novo *firmware*. O VSM Sensor processa a informação, e caso haja um novo *firmware* disponível, é realizada a transmissão dos pacotes binários divididos em 128bytes, esses pacotes são armazenados na memória flash externa. Concluído o *download*, o dispositivo é reinicializado, os dados são copiados para a memória flash interna do microcontrolador e esse passa a ser o novo *firmware* em produção.

4 Resultados e Discussão

4.1 Prototipagem

4.1.1 Fluxo do Processo de Prototipagem

O processo de prototipagem é delicado e essencial para que se obtenha um produto de qualidade e funcional. Após o planejamento, o processo foi dividido em três etapas: obtenção da matéria, montagem e validação, conforme exibido na [Figura 23](#).

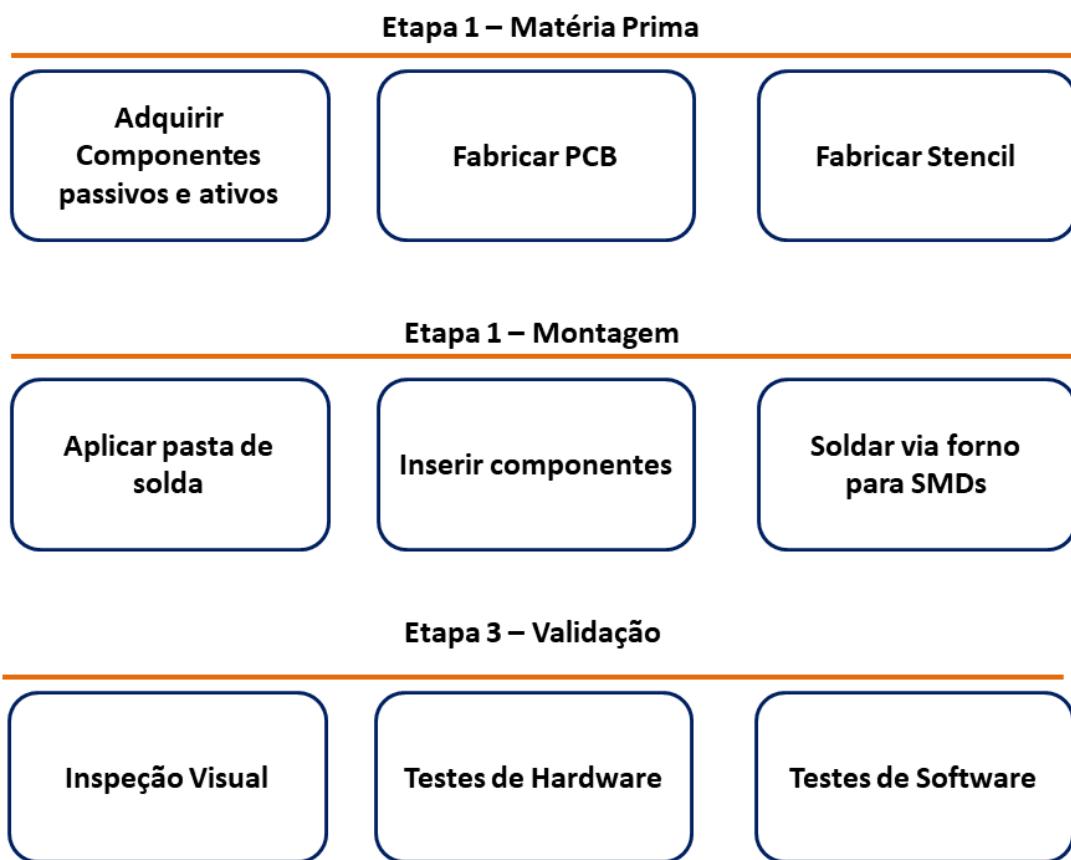
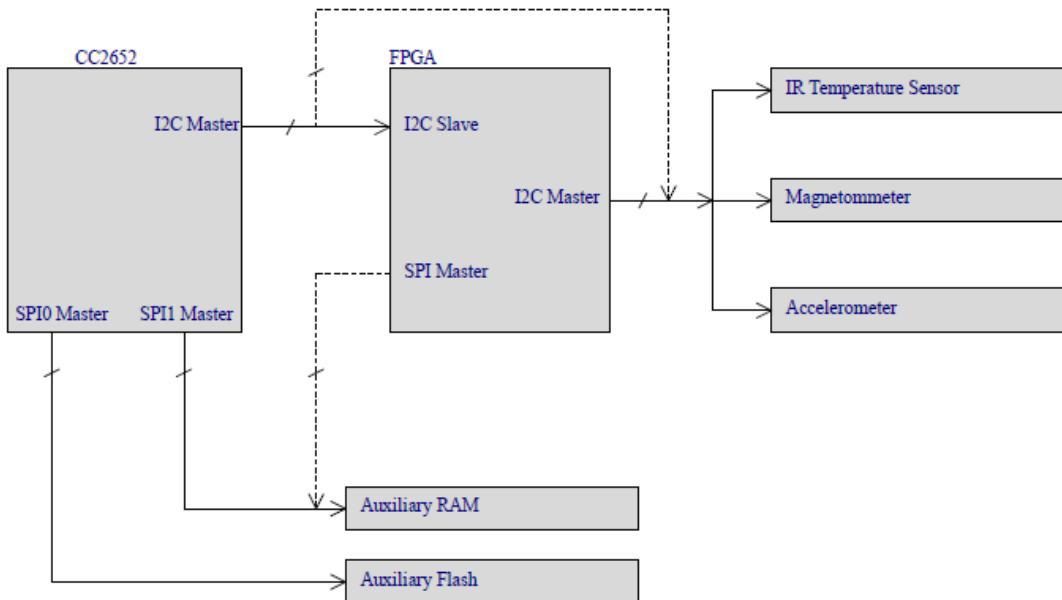


Figura 23 – Processo de prototipagem: obtenção da matéria, montagem e validação

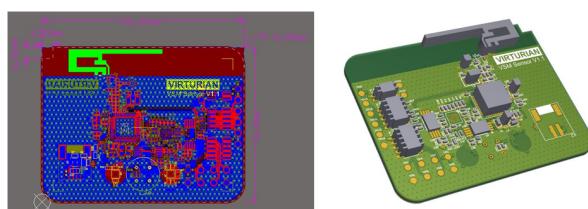
4.1.2 Placa de Circuito Impresso

Após especificação do projeto, escolha dos componentes ativos, definição do *layout* da PCB, a arquitetura circuito eletrônico foi estruturado conforme [Figura 24](#).



[Figura 24](#) – Processo de prototipagem: obtenção da matéria, montagem e validação

A arquitetura evidencia as conexões entre o MCU, FPGA (opcional), memórias externas e sensores. Concluída essa etapa, a revisão do projeto e o roteamento para produção da PCB foram realizados com o auxílio de um engenheiro com maior experiência na área a fim de maximizar o sucesso do projeto. Essa etapa foi desenvolvida utilizando o *software* Altium 18.0. Os resultados da Versão VSM1.1 sé mostrado na [Figura 25](#).



[Figura 25](#) – Resultado do projeto em 2D e 3D

Fez-se o planejamento para produção de quatro dispositivos dispostos em um painel, com o projeto pronto foi possível realizar a fabricação do stencil. O projeto do painel é ilustrado na [Figura 26](#)

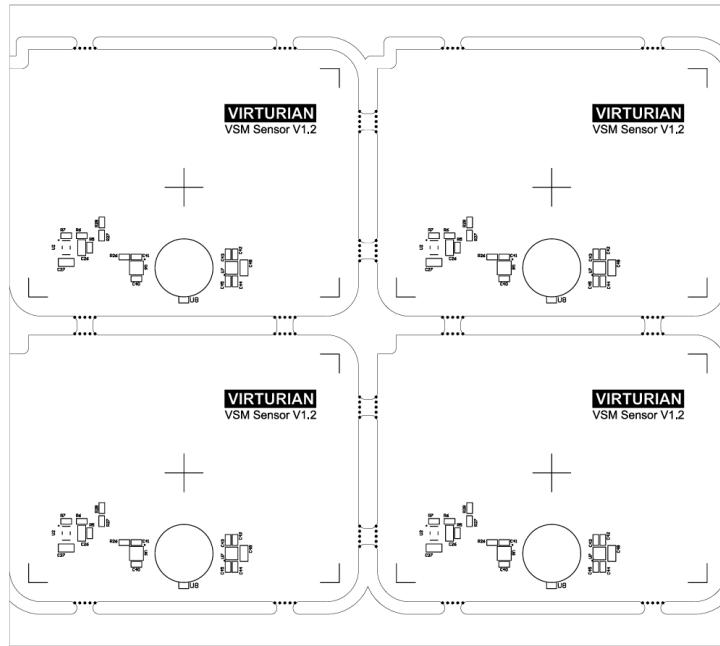


Figura 26 – PCB em Painel

4.1.3 Componentes e Montagem

A escolha dos componentes é feita com base nas recomendações dos fabricantes, preço e disponibilidade no mercado. Os fornecedores escolhidos são de confiança, os componentes foram importados dos Estados Unidos. A Tabela 3 apresenta o custo dos itens necessários para prototipagem, não foram considerados impostos nessa tabela.

Tabela 3 – Preço dos itens necessário para prototipagem

Item	Fornecedor	Preço Total	Preço Unitário
PCB	Lauquen	R\$1960,00	R\$490
Componentes Passivos e Ativos	Digikey Mouser Texas Instruments	US\$595,73	US\$148,93
Montagem	AGTe	R\$1140,00	R\$285
Stencil	Stentec	R\$1100	-
Bateria	Strema	R\$236,00	R\$59,00

Os componentes são a parte crítica do protótipo e do projeto em geral. Os componentes eletrônicos são divididos em duas categorias de montagem: SMT - *Surface Mount Technology* e PTH - *Pin Through Hole*. Apenas um componente faz parte da tecnologia de montagem PTH que é realizada com solda manual pela montadora escolhida, esse componente é o sensor de temperatura por infravermelho. Os SMDs - *Surface Mount Devices*, são os componentes que contemplam a SMT e são a maioria nesse projeto. A montagem dos SMDs é realizada de forma automática por máquinas e durante esse processo há um

desperdício de cerca de 10%. Além disso, é necessário realizar a compra de componentes em rolos para que seja possível o encaixe da fita de componentes na máquina. Isso gera um acréscimo de valor. Nos fornecedores escolhidos, esse valor é de US\$7,00. Os componentes foram comprados em quantidades suficientes para produzir os quatro protótipos, considerando uma pequena sobra. Importante ressaltar que para alguns componentes, um aumento de quantidade reflete em uma diminuição do valor unitário. A empresa escolhida para montagem foi a AGTechnologies, localizada em Santa Rita do Sapucaí-MG.

4.1.4 Testes de Validação

Plataforma de teste e desenvolvimento apresentada na Figura 27 possui os seguintes itens interligados:

- Módulo de desenvolvimento CC2652R Wireless MCU LaunchPadTM;
- Módulo de desenvolvimento KX122-1037-EVB0A0;
- Sensor de temperatura MLX90614;
- *Protoboard* e fios conectores;

Essa plataforma se mostrou imprescindível para realizar o desenvolvimento do firmware e testes dos sensores enquanto a montagem do produto final não era completada.

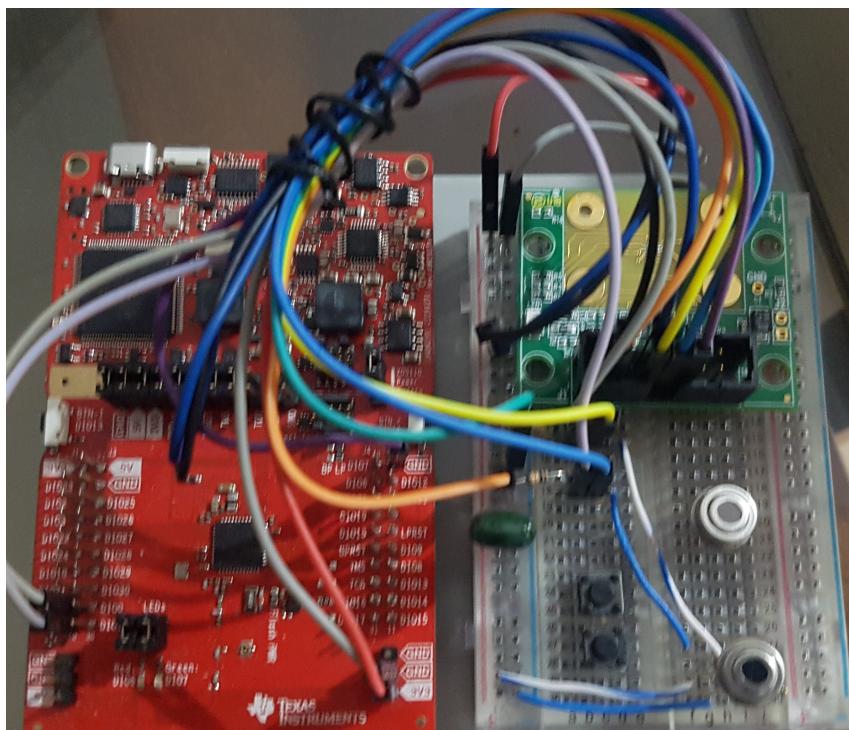


Figura 27 – Plataforma para auxílio no desenvolvimento

A plataforma de desenvolvimento permitiu que os *drivers* de comunicação com os periféricos e sensores fossem desenvolvidos para que o dispositivo, uma vez montado, pudesse ser testado com rapidez. Os testes realizados foram: inspeção visual, teste de continuidade/curto-circuito, teste de corrente, conectividade entre sensores, periféricos e rede OpenThread.

O teste de inspeção visual consiste em observar pontos de solda, posição e alinhamento dos componentes soldados, resquícios de solda e identificar qualquer anomalia aparente. A primeira inspeção visual não identificou anormalidades.

Após inspeção visual é realizado um teste de continuidade e curto-circuito que consiste em verificar os principais pontos da placa considerados críticos, por exemplo: verificação de alimentação dos componentes ativos e de possíveis curtos entre V_{CC} e *Ground*. O resultado dessa verificação foi satisfatório.

O teste de corrente é realizado da seguinte forma: alimenta-se o circuito com uma fonte de bancada regulada com proteção de corrente. Limita-se a corrente em um valor considerado ideal que não permitirá a queima de componentes do circuito. A proteção foi ajustada para 30 mA. Caso a corrente atinja esse valor significa que há alguma anormalidade no circuito ou projeto, uma vez que a corrente máxima esperada é de aproximadamente 10mA. Durante esse teste foi observado que a proteção da fonte de bancada atuou, indicando uma possível falha. Ao depurar o circuito, foi realizado novamente o teste de inspeção visual, mas dessa vez com o auxílio de um microscópio. Durante essa etapa foi verificado um erro no processo de inserção de um componente: o oscilador de 24MHz, presente no circuito da FPGA, foi montado invertido, conforme é mostrado na [Figura 28](#), o fiducial indica o Pino 1 do componente. Para correção, foi realizado o reparo que consistiu na rotação desse componente em 180 graus.

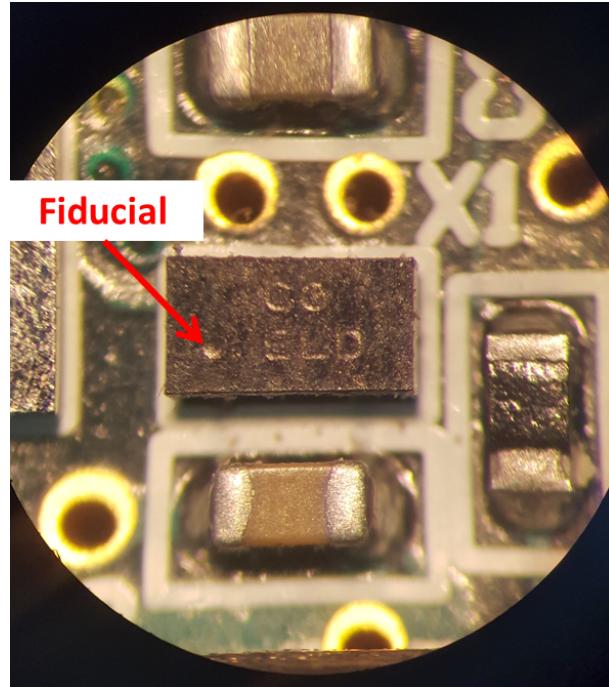


Figura 28 – Imagem obtida por microscópio do componente invertido

A Figura 29 indica a posição correta.

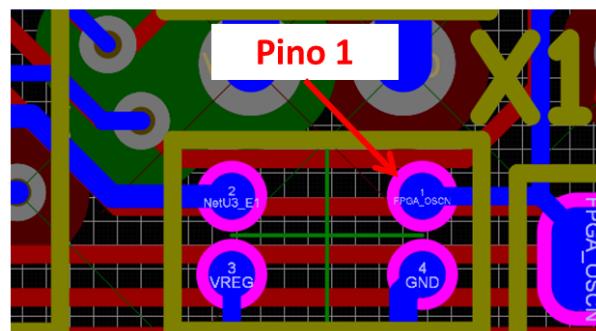


Figura 29 – Projeto indicando o fiducial - Pino 1

4.1.4.1 Conectividade IoT

É enviado para o *gateway* via MQTT um pacote de dados a cada dois minutos, esses dados podem ser visualizados. O software utilizado nesse caso é o MQTT SPY, configurado para exibir na tela todos os dados que estão na nuvem.

4.1.4.2 Acelerômetro

Primeiramente o sensor foi colocado em repouso numa superfície plana orientado com eixo X na mesma direção do plano e foi observado uma aceleração de 0,99g no eixo

Z e 0g nos eixos X e Y. Dispondo o eixo X na mesma orientação do plano foi obtido 0,98g para esse eixo e 0g para o eixo Y e Z.

O segundo passo foi colocar o sensor em um motor girando à vazio e alimentado com tensão cuja frequência é de 60Hz. Os sinais foram coletados e foram representados no domínio do tempo e da frequência. Pode se observar, na [Figura 30](#) que no eixo Z os sinais ficam em torno de $|1|g$, aceleração da gravidade, e os sinais em torno de 120Hz, múltiplo da tensão de alimentação se destacam, observado no domínio da frequência.

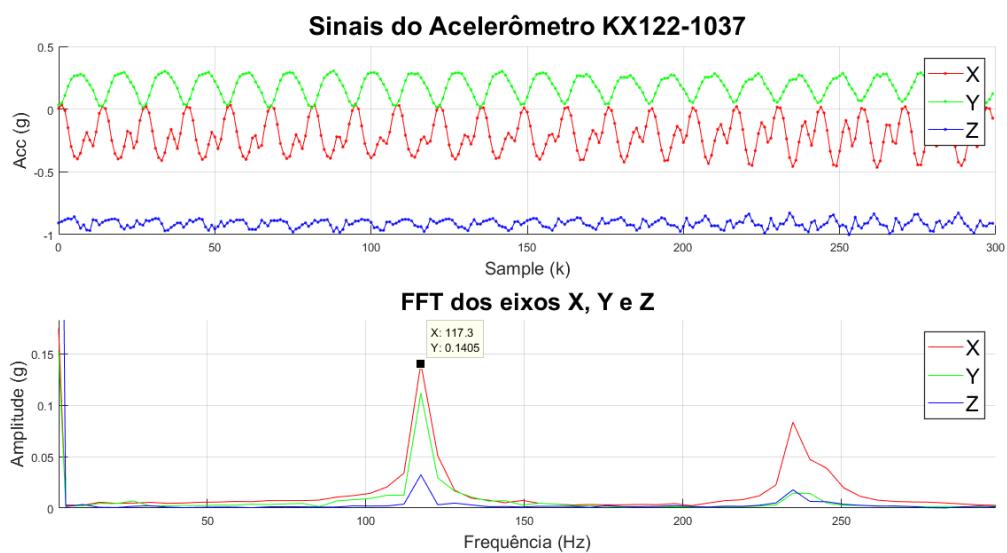


Figura 30 – Sinais amostrados pelo acelerômetro KX122-1037 de uma motor à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz

Esses dados foram confrontados com a medição proveniente do acelerômetro K6DS3TR do fabricante STM. Os resultados dessa medição estão presentes na [Figura 31](#). Comparando os dois resultados, pode ser observado que os sinais se assemelham em amplitudes, além disso, frequências em torno dos 120Hz se destacam em ambos. Para a aplicação desejada não é necessário que os sinais sejam de alta precisão, mas sim que permitam observar as frequências características dos defeitos de um motor elétrico no espectro da frequência.

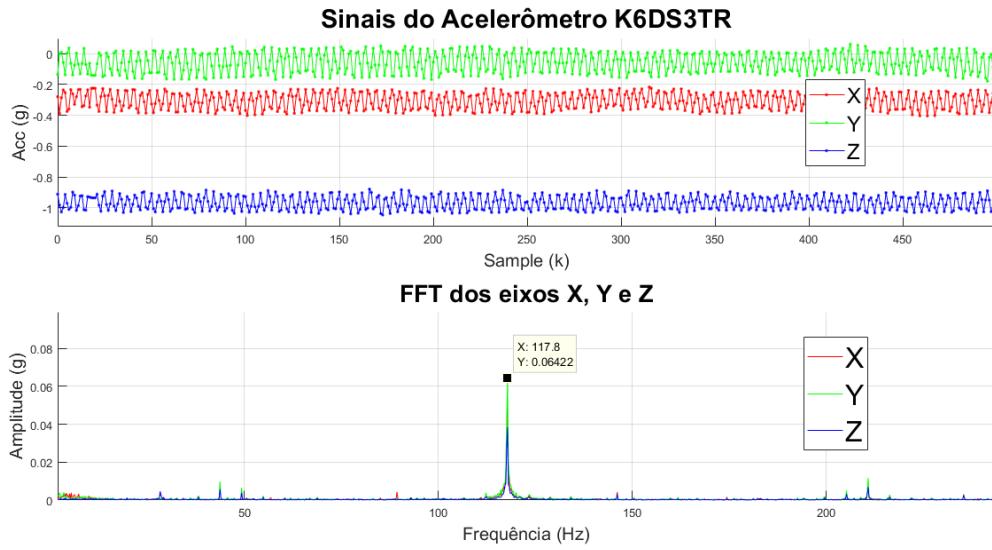


Figura 31 – Sinais amostrados pelo acelerômetro K6DS3TR de um motor operando à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz

4.1.4.3 Magnetômetro

Foram coletados sinais pelo sensor de campo magnético de um motor a fim de validar as medições do magnetômetro, o resultado é apresentado na ???. De acordo com (Wildermuth et al., 2015), (Ceban; Pusca; Romary, 2012) e pela subseção 2.2.2, os dados se mostram coerentes, pois ao observar o espectro em baixas frequências, há um destaque na região de 20Hz.

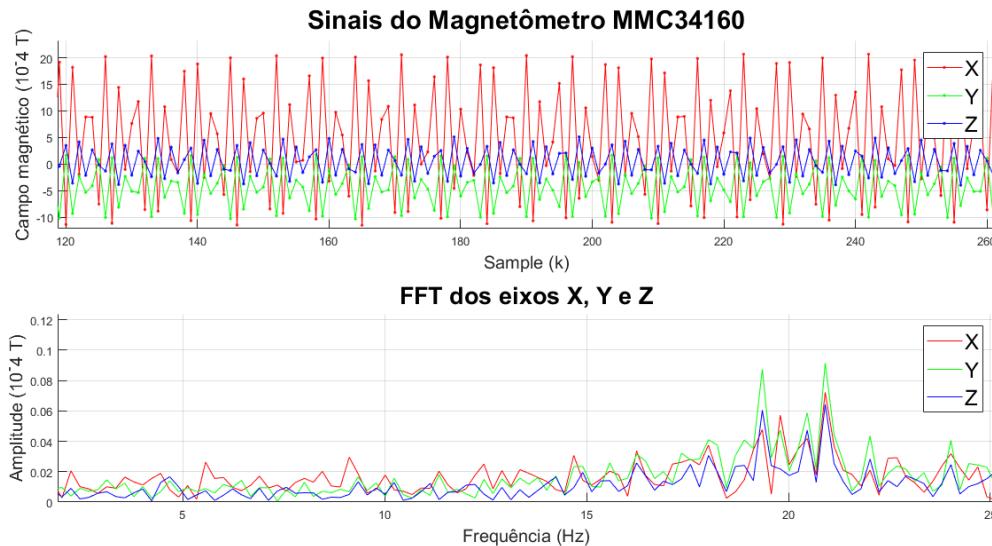


Figura 32 – Sinais amostrados pelo magnetômetro MMC14160 de um motor de 6 polos operando à vazio alimentado com uma tensão cuja frequência é 60Hz

4.1.4.4 Sensor de temperatura

Durante a criação do *driver* para o sensor de temperatura utilizando a plataforma de desenvolvimento os sinais obtidos pelo sensor de infravermelho foram comparados com a temperatura medida por um termopar, apresentando resultados satisfatórios, erro de aproximadamente 5%, validando a medição.

A Figura 33 apresenta dados referente à medição de temperatura em um motor na fábrica da Toyota.

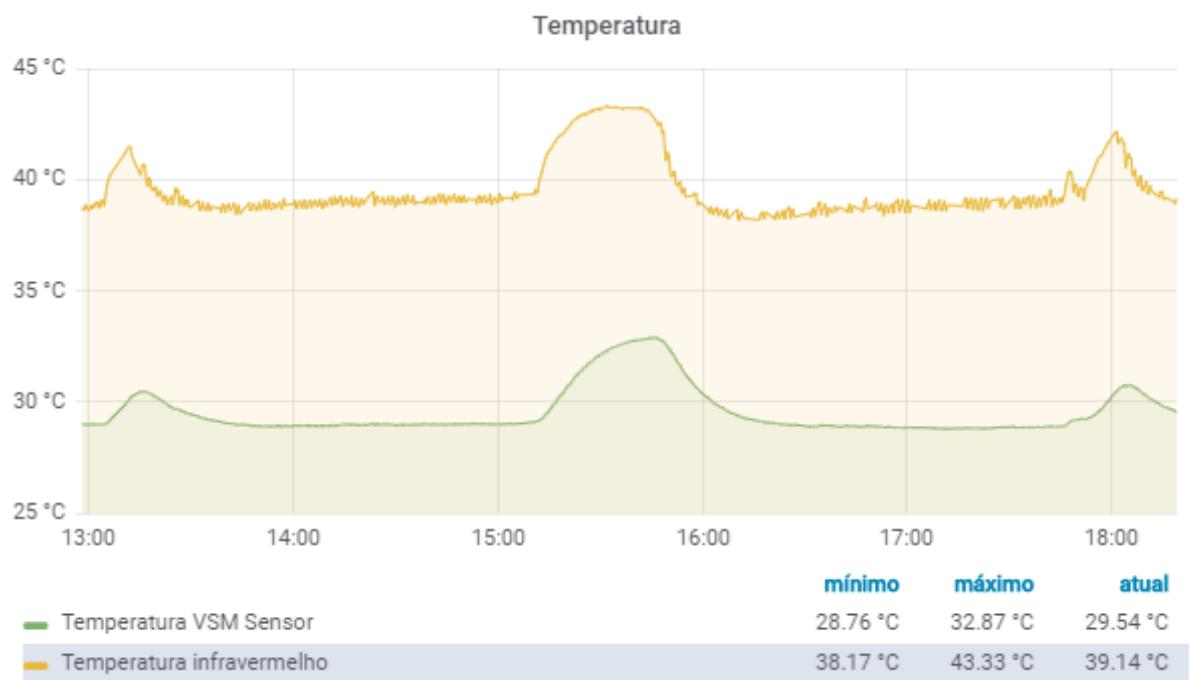


Figura 33 – Gráficos referente a medição de temperatura: VSM Sensor e Infravermelho

4.1.4.5 Acesso às Memórias Externas

De acordo com o *data sheet* da memória flash externa, enviando o byte 9Fh utilizando o protocolo SPI, o valor de retorno deve ser 1F440200h, valor correspondente à identificação do componente. De maneira análoga é possível acessar enviar o byte 05h a fim de se obter o byte 40h como resposta. Ambos acessos foram realizados com sucesso e permitiram validar o uso das duas memórias.

4.1.4.6 Medição da Tensão de Alimentação

Os dados obtidos pelos conversores A/D referentes à tensão regulada e tensão da bateria são exibidos na Figura 34. De acordo com esse gráfico pode ser observado que o regulador de tensão linear mantém uma saída de 3,3V, enquanto a tensão da bateria

apresentou uma queda de aproximadamente 2,7% nos primeiros dias, mas a tensão foi mantida aproximadamente constante após o quarto dia.

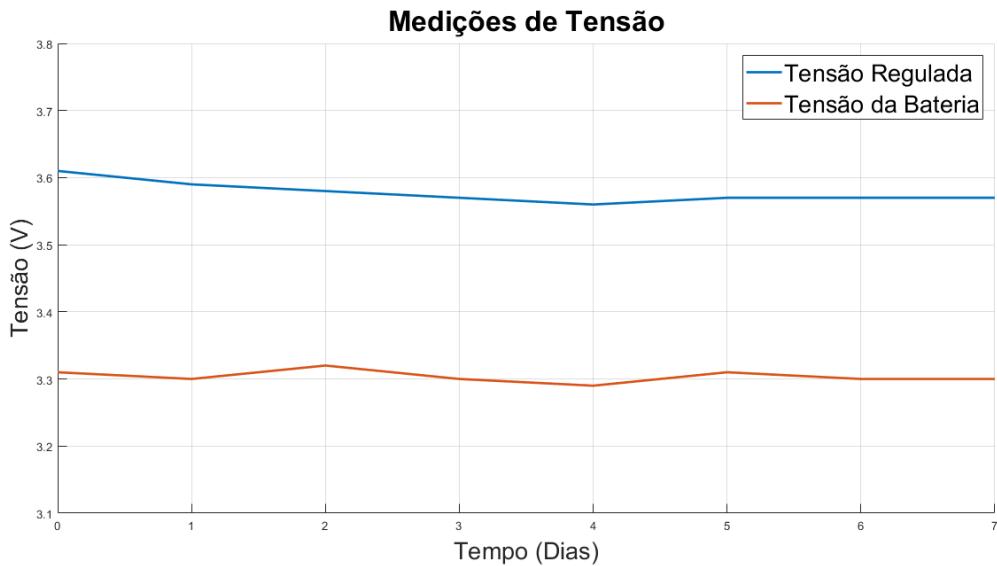


Figura 34 – Gráfico da medição de tensão da bateria durante 7 dias

4.2 Produção em Escala

Após validação do protótipo, foi realizada a produção em escala maior de dispositivos, esses com real aplicação em uma indústria. Decidiu-se pela produção do primeiro lote de 100 unidades e as compras foram realizadas nos mesmos fornecedores. Para essa etapa, realizou-se 2 furos na PCB para inserção de parafusos. A [Tabela 4](#) apresenta os valores dos itens necessários, considerando todos componentes passivos e ativos como uma das partes.

Tabela 4 – Custo da produção para 100 unidades

Item	Fornecedor	Preço Total	Preço Unitário
PCB	Lauquen	R\$4264,00	R\$42,64
Componentes	Digikey		
	Mouser		
	Texas Instruments	US\$2848,39	US\$28,48
Montagem	AGTe	R\$1332,00	R\$13,00
Bateria	Strema	R\$4900,00	R\$49,00

A montagem dos 100 dispositivos VSM Sensors pela AGTechnologies foi acompanhada de maneira presencial pelo autor visando garantir o sucesso completo da etapa de produção em escala. Foi desenvolvido para essa etapa um *firmware* específico que permitiu o teste rápido de todo o circuito de 100% das placas. O *firmware* consistia em testes

rápidos de acesso aos periféricos e sensores. Esse teste é contempla o uso das bibliotecas apresentadas na [seção 3.3](#). Foram realizados testes de acesso aos periféricos, leitura de sensores e conectividade com o *gateway*.

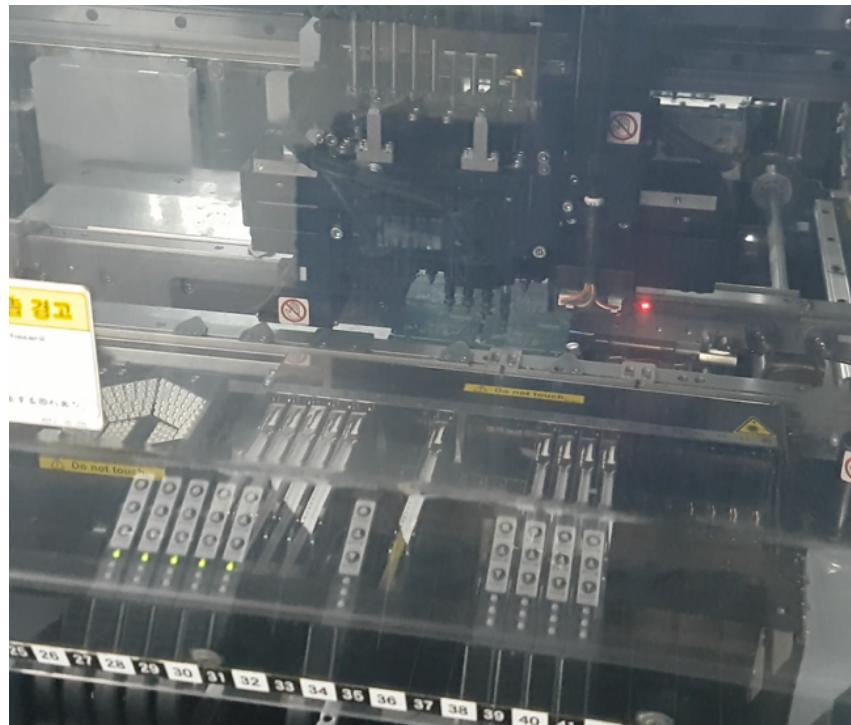


Figura 35 – Inserção de componentes pela Pick and Place automática.



Figura 36 – PCB entre Pick and Place e forno

A [Figura 38](#) exibe a bancada de testes na fábrica, e a [Figura 37](#) é o resultado após a montagem.



Figura 37 – Montagem concluída

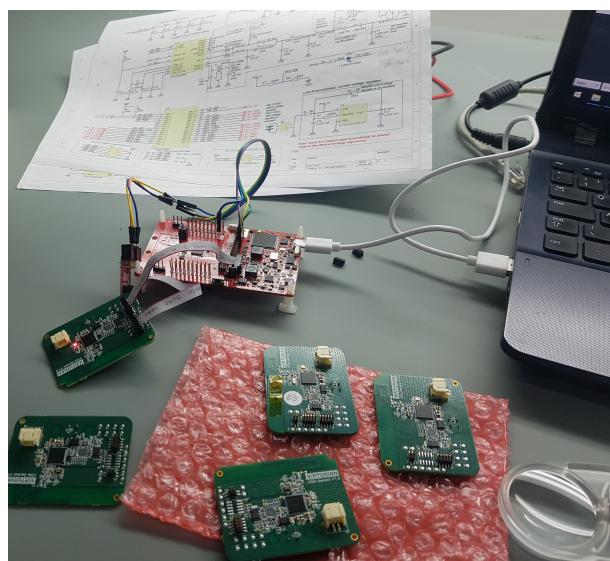


Figura 38 – Bancada de teste na fábrica.

4.3 Aplicação na Indústria

Após realizados todos os testes com sucesso, o produto pode ser devidamente embalado para ser entregue ao cliente final. A Figura 39 representa essa etapa. O *QR Code* identifica o dispositivo e assim temos acesso ao *MAC Address*, único para cada um. Com o *MAC Address* é possível registrar o dispositivo na rede sem fio e associá-lo a um equipamento elétrico.



Figura 39 – Imagens do produto final

Instalado com sucesso, os sinais são enviados para a nuvem e podem ser visualizados no *dashboard* juntamente com as análises de saúde. A Figura 40 mostra os dados brutos referente a um sensor instalado em um motor na fábrica da Toyota.

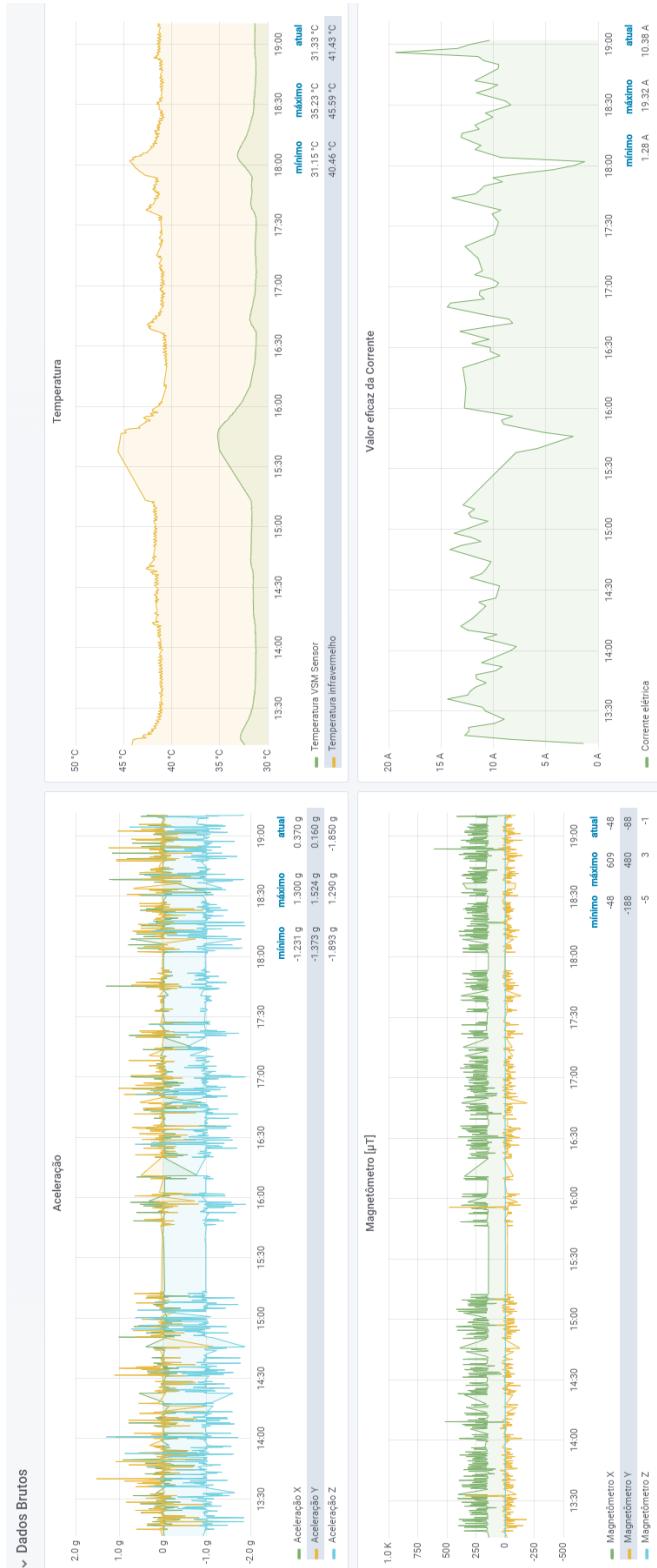


Figura 40 – Sinais visualizados no *dashboard*

5 Conclusões

5.1 Conclusão

Apresentou-se nessa monografia todas as etapas de desenvolvimento de um *hardware* de aquisição de dados e transmissão sem fio utilizando rede OpenThread, uma *stack* ainda pouco explorada no mercado.

O *firmware* desenvolvido para o VSM Sensor se mostrou eficiente e funcional. Os dados de vibração, temperatura e campo magnético se mostraram confiáveis e geram análises que tornam a predição de saúde de um equipamento industrial possível.

O objetivo foi cumprido e o protótipo permitiu que o VSM Sensor fosse produzido em larga escala e aplicado, com confiabilidade, em uma indústria automobilística de grande porte. A produção em escala se mostrou satisfatória e a aplicação da Virturian está disponível para atender clientes de maneira imediata.

O custo de produção unitário do protótipo foi de aproximadamente R\$1420,00, considerado elevado, mas necessário para que a produção em escala ocorra com sucesso. Essa, por sua vez, teve um custo de, aproximadamente R\$220,00 por unidade.

5.2 Propostas de Continuidade

Com o objetivo de reduzir custos será estudada a opção de produção em larga escala na China. O desenvolvimento tecnológico implica em melhorias contínuas, estudos e aplicação de novas tecnologias de rede sem fio, miniaturização de *hardware* e otimização do consumo de bateria, o que inclui *energy harvesting*.

Referências

- BORMANN, C. *CoAP — Constrained Application Protocol / Overview*. 2016. Disponível em: <<https://coap.technology/>>. Citado na página 37.
- Ceban, A.; Pusca, R.; Romary, R. Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 5, p. 2082–2093, May 2012. ISSN 0278-0046. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 54.
- EX-POWER. *ER14505*. [S.l.]: Ex-power, 2018. Citado na página 43.
- INSTRUMENTS, T. *SimpleLink Bluetooth low energy/Multi-standard SensorTag*. 2016. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/CC2650STK>>. Citado na página 20.
- INSTRUMENTS, T. *CC2652R SimpleLink Multiprotocol 2.4-GHz Wireless MCU*. [S.l.]: Texas Instruments, 2018. Citado na página 38.
- INSTRUMENTS, T. *TI-RTOS Downloads*. 2019. Disponível em: <http://downloads.ti.com/dsps/dsps_public_sw/sdo_sb/targetcontent/tirtos/index.html>. Citado na página 38.
- INTEL. *Intel MAX 10 FPGA Device Datasheet*. [S.l.]: Intel, 2014. Citado na página 40.
- KIONIX. *KX122-1037 - 2g/4g/8g Tri-axis Digital Accelerometer Specifications*. [S.l.]: Kionix, 2018. Citado na página 41.
- MELEXIS. *MLX90614 family - Datasheet Single and Dual Zone Infra Red Thermometer in TO-39*. [S.l.]: Melexis, 2018. Citado na página 40.
- MELO, P. *Padrão IEEE 802.15.4 - A base para as especificações Zigbee, WirelessHart e MiWi - Embarcados*. 2017. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/padrao-ieee-802-15-4/>>. Citado na página 23.
- MEMSIC. *MMC34160PJ - 16 Gauss, Ultra Small, Low Noise 3-axis Magnetic Senso*. [S.l.]: Memsic, 2013. Citado na página 42.
- MICROCHIP. *20005142C - SPI Serial Flash Memory with Dual-I/O Support*. [S.l.]: Microchip, 2014. Citado na página 40.
- MQTT. 2014. Disponível em: <<http://mqtt.org/>>. Citado na página 37.
- nRF Connect for Desktop. 2019. Disponível em: <<https://www.nordicsemi.com/en/Software%20and%20Tools/Development%20Tools/nRF%20Connect%20for%20desktop>>. Citado na página 35.
- NXP. Wireless coexistence in the 2.4 GHz band. p. 40, 2015. Citado na página 35.
- OpenThread. 2019. Disponível em: <<https://openthread.io/>>. Citado 3 vezes nas páginas 30, 35 e 38.
- OpenThread. 2019. Disponível em: <<https://github.com/openthread>>. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 35.

REIS, A. J. S. Reconhecimento de padrões de falhas em motores trifásicos utilizando redes neurais. p. 88, 2010. Citado na página 24.

SILVEIRA, C. B. *O Que é Indústria 4.0 e Como Ela Vai Impactar o Mundo*. 2019. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/industria-4-0/>>. Citado na página 24.

TECHNOLOGIES, A. *AT25XV041B - SPI Serial Flash Memory with Dual-I/O Support*. [S.l.]: Adesto Technologies, 2017. Citado na página 40.

WIFI Analyzer – Apps no Google Play. 2018. Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.farproc.wifi.analyzer&hl=pt_BR>. Citado na página 36.

Wildermuth, S. et al. Condition monitoring of electric motors based on magnetometer measurements. In: *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies Factory Automation (ETFA)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–4. ISSN 1946-0740. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 54.

XIA, F. et al. Internet of things. *International Journal of Communication Systems*, v. 25, n. 9, p. 1101, 2012. Citado na página 24.