

Hiago Santos da Gama

**Projeto e Prototipação de Placas de Circuito  
Impresso para Monitoramento Microssísmico  
em Ambientes de Mineração e Barragens**

Campos dos Goytacazes

2020

Hiago Santos da Gama

# **Projeto e Prototipação de Placas de Circuito Impresso para Monitoramento Microssísmico em Ambientes de Mineração e Barragens**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Embarcados.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense – IFF

Mestrado Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão

Programa de Pós-Graduação

Orientador: Prof. D.Sc. Rogerio Atem de Carvalho

Coorientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Martins Fernandes

Campos dos Goytacazes

2020

Biblioteca Anton Dakitsch  
CIP - Catalogação na Publicação

G184p Gama, Hiago Santos da  
Projeto e Prototipação de Placas de Circuito Impresso para  
Monitoramento Microsísmico em Ambientes de Mineração e Barragens /  
Hiago Santos da Gama - 2020.  
85 f.: il. color.

Orientador: Rogerio Atem de Carvalho  
Coorientador: Rodrigo Martins Fernandes

Dissertação (mestrado) -- Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia Fluminense, Campus Campos Centro, Curso de Mestrado  
Profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão, Campos dos  
Goytacazes, RJ, 2020.  
Referências: f. 77 a 81.

1. Dispositivo de análise microsísmica. 2. Circuitos embarcados. 3.  
Gerenciamento de barragens e minas. I. Carvalho, Rogerio Atem de ,  
orient. II. Fernandes, Rodrigo Martins, coorient. III. Título.

Hiago Santos da Gama

# **Projeto e Prototipação de Placas de Circuito Impresso para Monitoramento Microssísmico em Ambientes de Mineração e Barragens**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão do Instituto Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão. Área do Programa: Sistemas para Engenharia. Linha de Pesquisa: Sistemas Embarcados.

Trabalho aprovado. Campos dos Goytacazes, 16 de Janeiro de 2020:

---

**Prof. D.Sc. Rogerio Atem de Carvalho**  
Orientador  
Instituto Federal Fluminense – IFF

---

**Prof. D.Sc. Rodrigo Martins  
Fernandes**  
Coorientador  
Instituto Federal Fluminense – IFF

---

**Prof. D.Sc. William da Silva Vianna**  
Instituto Federal Fluminense – IFF

---

**Prof. M.Sc. Fabio Junio dos Santos  
Coelho**  
Instituto Federal Fluminense – IFF

Campos dos Goytacazes  
2020

*Este trabalho é dedicado à equipe de desenvolvimento do dispositivo de monitoramento microssísmico que, assim como eu, se empenharam para tornar este projeto realidade.*

# AGRADECIMENTOS

Gostaria de aproveitar esse espaço para agradecer a todos que me auxiliaram, de forma direta e indireta, no desenvolvimento deste ambicioso trabalho.

Agradeço primeiramente à Deus por toda orientação e força dadas em todos os momentos da minha vida, pela sua fidelidade e misericórdia.

Aos meus pais e irmão, Sidnei Bastos da Gama, Lúcia Cristina Manhães dos Santos da Gama e Bruno Santos da Gama, por todo amor, suporte e incentivo incondicionais.

Aos professores DSc. Rogerio Atem de Carvalho e MSc. Fabio Junio dos Santos Coelho, por seus ensinamentos, orientação, amizade e apoio.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Marcos José Rangel e professor DSc. Rodrigo Martins Fernandes, por toda a amizade e assistência, além das conversas sempre edificantes que tornaram meus dias mais agradáveis.

Aos meus amigos Otávio Pires, Bárbara Fábri, Lucas Rangel, Júlio Pessanha, Gustavo Schwartz e Jéssica Maria Gonçalves por me proporcionarem tantos momentos memoráveis ao longo desta trajetória.

À toda equipe do Polo de Inovação Campos dos Goytacazes e professores do curso, pelo suporte imprescindível ao projeto e à minha formação acadêmica.

Aos meus amigos da equipe de desenvolvimento do dispositivo de monitoramento microssísmico Frederico Fiuza, Lucas Rodrigues, Sara Monteiro e Thiago Pessanha, por toda assistência, comprometimento e pelas conversas que permitiram que eu mantivesse minha sanidade mental durante todo esse processo.

A todos que participaram de forma direta ou indireta na minha formação acadêmica e profissional.

Muito obrigado a todos!

*“Nunca se compare com  
ninguém neste mundo.  
Caso o faça,  
entenda que você estará  
insultando a si mesmo.”  
(Bill Gates)*

# RESUMO

Apesar dos ganhos provenientes da atividade mineradora, o crescimento desse setor vem acompanhado do aumento nos prejuízos ambientais pela extração desses recursos, além de trazer riscos de acidentes, como desmoronamento de minas e rompimento ou vazamento da lama de rejeitos de barragens. O presente trabalho objetiva o desenvolvimento do projeto e prototipação das placas de circuito impresso de um dispositivo de monitoramento microsísmico. Almeja-se utilizar tal dispositivo como instrumento de gestão de barragens e locais de mineração, permitindo monitorar esses ambientes em tempo real e prever possíveis acidentes, que poderão ser mitigados ou até mesmo evitados. O dispositivo conta com geolocalização, é configurável via *Bluetooth*, pode se conectar à uma central de análise sísmica via rede sem fio de longa distância, é capaz de armazenar eventos sísmicos localmente em um cartão de memória e pode operar com sensores tipo geofone e acelerômetro em três eixos cartesianos de medição. Após pesquisa patentária, o desenvolvimento do projeto seguiu as etapas do ciclo de vida do Processo de Projeto de Produtos Inovadores, metodologia utilizada nos projetos do Polo de Inovação Campos dos Goytacazes. Testes mostraram um desempenho satisfatório na detecção de eventos, além do correto funcionamento da rede sem fios, armazenamento local, geolocalização e parametrização via *bluetooth*. Os objetivos deste trabalho foram alcançados, resultando num dispositivo remoto e autônomo capaz de enviar continuamente as medições de eventos microsísmicos para uma central de análise sísmica.

**Palavras-chave:** Dispositivo de análise microsísmica. Circuitos embarcados. Gerenciamento de barragens e minas.

# ABSTRACT

Despite the benefits from the mining activity, the growth of this sector has been accompanied by an increase in environmental damage from the extraction of these resources, as well as risks of accidents such as collapsing mines and rupture or leakage of mud from tailings dams. The present work aims to develop the design of printed circuit boards for a micro-seismic monitoring device. It is intended to use it as a tool for the management of dams and mining sites, allowing monitoring these environments in real-time and predicting possible accidents, which may be mitigated or even avoided. The device has geo-location, it is configurable via Bluetooth, it can connect to a seismic analysis center via a long-distance wireless network, it is capable of storing seismic events locally in a memory card and can operate with geophone and accelerometer sensors in three Cartesian measuring axes. After patent research, the project development followed the life cycle stages of the Innovative Product Design Process, a methodology used in the Campos dos Goytacazes Innovation Hub projects. Tests showed satisfactory performance in micro-seismic event detection, as well as the correct functioning of the wireless network, local storage, geolocation, and parameterization via Bluetooth. The work achieved its objectives, resulting in a remote, standalone device capable of continuously sending micro-seismic event measurements to a seismic analysis center.

**Keywords:** Micro-seismic analysis device. Embedded systems. Management of dams and mines.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de Venn do resultado da busca dos conjuntos de palavras-chave	21
Figura 2 – Abstração do ciclo de vida proposto pelo P3I	33
Figura 3 – Iterações no ciclo de vida P3I	33
Figura 4 – Arquitetura da eletrônica do dispositivo de monitoramento micro sísmico	42
Figura 5 – Exemplo de geofones	44
Figura 6 – Conversão de um sinal analógico para digital através de um ADC	45
Figura 7 – Fluxograma dos componentes do módulo de aquisição de eventos micro sísmicos	45
Figura 8 – Microcontrolador do dispositivo de monitoramento micro sísmico	46
Figura 9 – Módulo GPS	47
Figura 10 – Módulo LoRa	47
Figura 11 – Módulo SD	47
Figura 12 – Exemplo de módulo com acelerômetro digital	48
Figura 13 – Fluxograma dos componentes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa	49
Figura 14 – Reguladores de tensão de 12V para +5V, 3,3V e -5V, respectivamente	50
Figura 15 – Fluxograma dos componentes do módulo de alimentação	50
Figura 16 – Plataforma de desenvolvimento do ADC	52
Figura 17 – Circuito de ligação do geofone, seu circuito de suporte e a placa de desenvolvimento do ADC	53
Figura 18 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo de cartão SD	53
Figura 19 – Fluxograma de ligação entre os módulos transmissor e receptor via rede LoRa	54
Figura 20 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo GPS	55
Figura 21 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo do acelerômetro	55
Figura 22 – Plataforma de desenvolvimento do MCU	56
Figura 23 – Aplicativo de parametrização do dispositivo de monitoramento micro sísmico via <i>Bluetooth</i>	56
Figura 24 – Plataformas de desenvolvimento dos reguladores de tensão de 12V para +5V, 3,3V e -5V, respectivamente	58
Figura 25 – <i>Layouts</i> das PCBs dos módulos do dispositivo de monitoramento micro sísmico	60
Figura 26 – PCBs dos módulos que compõem o dispositivo de monitoramento micro sísmico	61

Figura 27 – PCBs dos módulos que compõem o dispositivo de monitoramento micro-sísmico soldados . . . . .	62
Figura 28 – Módulos de aquisição e de tratamento, armazenamento e envio de medições sísmicas via LoRa integrados . . . . .	63
Figura 29 – Quadro de energia do dispositivo de monitoramento micro-sísmico . . . . .	64
Figura 30 – Dispositivo de monitoramento micro-sísmico fixado ao solo para a realização dos testes de aceitação . . . . .	66
Figura 31 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones do dispositivo . . . . .	67
Figura 32 – Torre onde o <i>gateway</i> da rede foi fixado e a equipe efetuando testes de comunicação via LoRa, respectivamente . . . . .	71
Figura 33 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones a uma distância de 10 metros da fonte sísmica. . . . .	72
Figura 34 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones a uma distância de 15 metros da fonte sísmica. . . . .	73

# LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – <i>Strings</i> de busca em português . . . . .	21
Quadro 2 – <i>Strings</i> de busca em inglês . . . . .	21
Quadro 3 – <i>Descrição das fases do ciclo de vida P3I</i> . . . . .	35

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANA	Agência Nacional de Águas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEPAL	Comissão Econômica Para a América Latina e o Caribe
CI	Circuito Integrado
CSS	<i>Chirp Spread Spectrum</i>
GERA	<i>Generalised Enterprise Reference Architecture</i>
GERAM	<i>Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IP	<i>Ingress Protection</i>
LPWAN	<i>Low-Power Wide Area Network</i>
MCU	<i>Microcontroller Unit</i>
P3I	Processo de Projeto de Produtos Inovadores
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PIB	Produto Interno Bruto
PICG	Polo de Inovação Campos dos Goytacazes
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	18
<b>1.2</b>	<b>Justificativa</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>BUSCA PATENTÁRIA</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>Bases Pesquisadas</b>	<b>20</b>
<b>2.2</b>	<b>Estratégia de Busca</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Critérios de Exclusão e Inclusão</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Revisão Patentária</b>	<b>22</b>
2.4.1	Patente nº US 9,465,126 B2	23
2.4.2	Patente nº EP 3 399 348 A1	23
2.4.3	Patente nº WO 2015/082010 A1	24
2.4.4	Patente nº US 0,039,149 A1	25
2.4.5	Patente nº US 2004/0237648 A1	26
2.4.6	Patente nº WO 2009/054724 A2	27
2.4.7	Patente nº WO 2010/002263 A2	27
2.4.8	Patente nº WO 2012/123760 A2	28
<b>2.5</b>	<b>Resultados e Discussão da Busca Patentária</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
<b>3.1</b>	<b>Processo de Projeto de Produtos Inovadores – P3I</b>	<b>31</b>
<b>3.2</b>	<b>Fases do Ciclo de Vida P3I</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DAS PCBS</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Exploração</b>	<b>36</b>
<b>4.2</b>	<b>Ideação</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Prototipação</b>	<b>39</b>
4.3.1	Requisitos	40
4.3.2	Arquitetura	41
4.3.3	Componentes	43
4.3.3.1	Módulo de aquisição de eventos microssísmicos	43
4.3.3.2	Módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa	46
4.3.3.3	Módulo de alimentação	48

4.3.4	Testes unitários . . . . .	51
4.3.4.1	Módulo de aquisição de eventos micro sísmicos . . . . .	51
4.3.4.2	Módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa . . . . .	52
4.3.4.3	Módulo de alimentação . . . . .	56
4.3.5	Testes de integração . . . . .	57
4.3.5.1	Elaboração das PCBs dos módulos do dispositivo . . . . .	58
4.3.5.2	Teste de integração individual dos módulos do dispositivo . . . . .	60
4.3.5.3	Teste de integração entre os módulos do dispositivo . . . . .	62
4.3.6	Testes de aceitação . . . . .	64
<b>4.4</b>	<b>Operação . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.5</b>	<b>Descomissionamento . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>77</b>
	<b>APÊNDICES . . . . .</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE A – CIRCUITO DO MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO . . . . .</b>	<b>83</b>
	<b>APÊNDICE B – CIRCUITO DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO DE MICROSSISMOS . . . . .</b>	<b>84</b>
	<b>APÊNDICE C – CIRCUITO DO MÓDULO DE TRATAMENTO, ARMAZENAMENTO E ENVIO DE MEDIÇÕES VIA LORA . . . . .</b>	<b>85</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A extração mineral é definida como a operação de coleta de minerais e outros materiais geológicos de valor econômico, através da exploração de recursos naturais provenientes do solo do planeta. Recursos minerais, tais como o petróleo, metais, carvão e rochas, são considerados não renováveis, uma vez que não podem ser reproduzidos por meio de processos industriais ou agrícolas (BRASIL, 2016).

Nas últimas décadas, a indústria de extração mineral tem crescido em um ritmo acelerado, especialmente impulsionada pelo crescimento econômico de países como a China. O aumento do consumo de *commodities* minerais fomentou a expansão dessa indústria pelo mundo, tanto em volumes extraídos quanto em abertura de novas minas, devido ao impacto dessa crescente demanda nos preços dos minérios (ARAÚJO et al., 2016; BRASIL, 2016).

A indústria mineral do Brasil não ficou de fora desse processo de crescimento acentuado. Entre os anos de 1990 e 1997, enquanto o investimento mundial em exploração mineral cresceu 90%, na América Latina o acréscimo foi de 400% (BEBBINGTON, 2007). As exportações advindas de minas e pedreiras de países do Mercosul (Argentina, Brasil, Bolívia, Chile, Paraguai e Uruguai) cresceram de US\$ 20 bilhões em 2004 para mais de US\$ 46 bilhões em 2007, segundo informações da Comissão Econômica Para a América Latina e o Caribe – CEPAL (SCOTTO, 2013).

Atualmente, a mineração representa um importante componente da balança comercial brasileira. Em 2017, a produção mineral obteve um faturamento de US\$ 32 bilhões (excluindo petróleo e gás), caracterizando 30% do saldo da balança comercial do Brasil e 16,7% do PIB (Produto Interno Bruto) industrial do país. Estima-se que este faturamento continue a aumentar nos próximos anos (IBRAM, 2018).

Apesar dos ganhos provenientes da atividade mineradora, o crescimento desse setor vem acompanhado do aumento nos prejuízos ambientais inerentes à extração desses recursos, como a erosão e a perda de biodiversidade. Além disso, as usinas de minério geram elevadas quantidades de resíduos, que podem ser tóxicos e contaminar o meio ambiente se não forem movidos e armazenados adequadamente (ARAÚJO et al., 2016; BRASIL, 2016). Estas atividades, portanto, também trazem riscos de acidentes como o rompimento de barragens com rejeitos da mineração ou desmoronamento de minas, causando prejuízos ao meio ambiente e à população dessas regiões.

Um claro exemplo dos riscos ambientais envolvidos na extração de minérios é o desastre ocorrido em 5 de novembro de 2015 na cidade de Mariana, localizada no estado de Minas Gerais. O rompimento de uma barragem pertencente à mineradora Samarco que

armazenava rejeitos de minérios liberou uma quantidade gigantesca de lama, destruindo totalmente a vila de Bento Rodrigues, que se situava a dois quilômetros da barragem, e parcialmente Paracatu de Baixo, ambas em Mariana. A cidade de Barra Longa (MG) também foi parcialmente atingida pela lama, capaz de encher 24 mil piscinas olímpicas (BRASIL; PIRES, 2017).

A onda de lama, que continha substâncias tóxicas como manganês, cromo, ferro, chumbo, alumínio, cobalto, arsênico, níquel, bário e zinco, também alcançou o Rio Doce, um dos maiores e mais importantes rios do Brasil, avançando 850 quilômetros pela sua calha e causando destruição por onde passava. Os ecossistemas de toda a região próxima ao rio, chamada de vale do Rio Doce, e do litoral do Espírito Santo e parte do litoral da Bahia e do Rio de Janeiro foram gravemente afetados pelo desastre (BRASIL; PIRES, 2017; ROCHA, 2016).

Um outro exemplo triste dos riscos descritos anteriormente é o desastre ocorrido no município de Brumadinho, também em Minas Gerais, pouco após o desastre em Mariana ter completado três anos. O rompimento da barragem da mineradora Vale na Mina Córrego do Feijão causou grande destruição ao meio ambiente e à população da região, com 249 mortes confirmadas e 21 pessoas desaparecidas ou sem identificação até o momento em que os ajustes finais deste documento foram efetuados (BBC, 2019; G1 Minas, 2019). Este acidente é considerado um dos maiores desastres socioambientais do país e reforça os riscos de acidentes gerados pela atividade mineradora.

Devido aos riscos envolvidos, bem como a crescente preocupação global com relação ao meio ambiente e à qualidade de vida das próximas gerações, foi observada nos últimos anos uma forte mobilização em prol de novas regulações e reformas legislativas que visassem intensificar a harmonia entre a indústria da mineração e os demais setores da economia, sociedade e do meio ambiente. Estes regulamentos objetivam minimizar o impacto sobre o meio ambiente e a saúde humana por meio da avaliação do impacto da atividade, planejamento da gestão ambiental e do fechamento da mina, além do monitoramento do espaço durante e após encerrada a mineração (BRASIL, 2016).

Neste contexto de mudança comportamental quanto à exploração de recursos minerais e do surgimento de regulamentações visando reduzir os impactos causados por tal prática, surgem oportunidades para o desenvolvimento de novas soluções que auxiliem no processo de gerenciamento de operações em minas e barragens, capazes de monitorar, armazenar e enviar as informações do ambiente para a análise do gestor, permitindo a prevenção de acidentes como desmoronamentos ou rompimentos de barragens e minas.

O presente trabalho visa desenvolver as placas de circuito impresso (PCB – *Printed Circuit Board*) de um dispositivo de monitoramento micro sísmico, uma ferramenta concebida com o intuito de auxiliar na gestão de barragens e locais de mineração. Tal dispositivo tem como características: fácil fixação ao solo, através de *spike*; monitoramento sísmico de

três eixos cartesianos com dois tipos de elementos sensores para garantir uma cobertura precisa tanto de frequências sísmicas mais próximas à zero quanto de frequências mais altas; rastreável através do Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*); configurável a partir do uso de *Bluetooth*; capacidade de armazenar os eventos sísmicos detectados em memória *flash* e enviá-los para uma central de análise de dados via comunicação sem fio de longa distância; invólucro resistente à água e poeira. Para tanto, as PCBs a serem desenvolvidas precisam conter todos os componentes necessários para fornecer as funcionalidades desejáveis ao dispositivo de monitoramento.

O desenvolvimento do projeto segue os conceitos de ciclo de vida da arquitetura de referência GERAM (*Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology*) integrado ao modelo de ciclo de vida de validação e verificação (BERNUS; NEMES, 1996; FORSBERG; MOOZ, 1991), que é baseado em engenharia simultânea, além de usar conceitos do agilismo. Dessa forma, todas as etapas do ciclo de vida do dispositivo de monitoramento são planejadas, desde a sua identificação até seu descomissionamento, e o processo de desenvolvimento de cada etapa do *hardware* é atrelada a um teste, seja este unitário, de integração ou de aceitação. Os testes garantem que a próxima etapa só ocorrerá caso a etapa anterior esteja correta.

O processo de elaboração do dispositivo envolve fazer uma busca patentária para verificar a existência de produtos semelhantes ao dispositivo proposto já registrados e fazer uma revisão das patentes com conteúdo mais próximo ao tema do projeto, definir o sistema de medição e os componentes a serem utilizados nas PCBs, produzir o esquemático dos seus circuitos, desenhar as placas e seus circuitos em *software* de Desenho Assistido por Computador (CAD – *Computer Aided Design*) e, finalmente, desenvolver protótipos para testar o funcionamento e validar o *design* produzido.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Projetar e prototipar as PCBs de um dispositivo de monitoramento microssísmico remoto e autônomo. Tal dispositivo tem por finalidade ser aplicado na gestão de ambientes de mineração e barragens, sendo responsável pela aquisição, tratamento, armazenamento e envio de medições da vibração do solo para uma central de análise sísmica, visando uma operação mais segura desses ambientes e a prevenção de acidentes, como desmoronamentos e rompimentos.

O dispositivo tem como características: fácil fixação ao solo; monitoramento sísmico nos três eixos cartesianos; localização rastreável através de GPS; configurável a partir do uso de *Bluetooth*; capacidade de armazenar os eventos sísmicos detectados em memória

*flash* e enviá-los para uma central de análise de dados via comunicação sem fio de longa distância; invólucro resistente à água e poeira.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Aplicar os conhecimentos adquiridos no Mestrado profissional em Sistemas Aplicados à Engenharia e Gestão por meio do desenvolvimento das PCBs do dispositivo de monitoramento microssísmico e montagem de seus protótipos. Este processo envolve:

- a) identificar os requisitos do sistema de monitoramento;
- b) especificar os elementos sensores, microcontrolador e periféricos necessários para conferir as características desejadas ao dispositivo de monitoramento microssísmico;
- c) elaborar um esquemático descrevendo todas as ligações entre os componentes nos circuitos da PCB;
- d) desenhar a PCB em *software* CAD;
- e) produzir protótipos da PCB;
- f) realizar testes de integração e aceitação.

## 1.2 Justificativa

No Brasil, o monitoramento de barragens normalmente é feito a partir de medidores de deslocamento, subpressão e vazões de percolação, além do nível de carga através de piezômetros (MACHADO, 2007). Tais medições são feitas pontualmente, podendo facilmente falhar em mostrar regiões de fraqueza na estrutura da barragem.

O dispositivo de monitoramento microssísmico proposto operará em rede, com vários medidores fornecendo em tempo real informações do ambiente a uma central de análise de dados, e cada medição estará associada à localização do dispositivo devido à sua rastreabilidade via GPS. Isso permite identificar quais são as regiões de fraqueza na estrutura da barragem e atuar de maneira mais rápida para evitar possíveis acidentes.

Sistemas semelhantes ao proposto só existem no exterior, tornando o seu uso custoso. Nesse sentido, o projeto proposto é inovador por ser um projeto nacional de baixo custo com relação aos sistemas disponíveis no exterior, que permitirá o domínio da tecnologia de monitoramento preditivo de barragens e áreas de mineração.

Mesmo os medidores sísmicos inteligentes encontrados no exterior, como o SmartSolo (Dynamic Technologies (DTCC), 2017), distanciam-se do dispositivo a ser desenvolvido neste projeto devido ao fato de que suas medições são feitas em apenas um eixo cartesiano e os dados medidos não são enviados para uma central de análise de dados em tempo real,

diferentemente do medidor proposto, que conta com sensoriamento triaxial e envio dos dados em tempo real, permitindo uma análise mais completa do padrão sísmico da região monitorada e maior rapidez para identificar problemas que possam causar acidentes.

A instalação do sistema proposto neste projeto em ambientes de mineração, como em cavernas e túneis, permite o monitoramento sísmico da região para identificar possíveis tremores que possam causar desmoronamentos, tornando a operação mais segura para os trabalhadores, equipamentos e meio ambiente.

O dados adquiridos pelos dispositivos de monitoramento sísmico também podem servir para o acionamento de alarmes ou atuadores para procedimentos de segurança, formando malhas de monitoramento capazes de atuar nas regiões mais críticas, de acordo com a localização de cada medição.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi elaborado de modo a apresentar o tema abordado numa visão integrada, estando organizado da seguinte forma:

- a) **Capítulo 1** – Apresenta a introdução do trabalho, contextualizando o tema abordado e definindo os objetivos e justificativa do projeto;
- b) **Capítulo 2** – Compreende a busca patentária feita a partir dos principais termos que definem o dispositivo de monitoramento microssísmico, apresentando uma revisão das patentes mais semelhantes ao sistema proposto neste trabalho;
- c) **Capítulo 3** – Descreve a metodologia utilizada para o desenvolvimento do projeto, detalhando todas as etapas envolvidas;
- d) **Capítulo 4** – Trata do desenvolvimento das PCBs do dispositivo de monitoramento microssísmico, detalhando cada fase de sua concepção, construção e de testes unitários, de integração e de aceitação, de acordo com a metodologia proposta;
- e) **Capítulo 5** – Aborda os resultados obtidos das PCBs do dispositivo quanto ao desempenho na medição, armazenamento e envio de dados sísmicos via rede sem fio do dispositivo de monitoramento;
- f) **Capítulo 6** – Apresenta as conclusões do trabalho, verificando se os objetivos referidos foram alcançados.

## 2 BUSCA PATENTÁRIA

Este capítulo se dedica a apresentar a estratégia de busca utilizada para identificar produtos semelhantes ao proposto neste trabalho que estejam patenteados, bem como fazer uma revisão das patentes mais relevantes ao tema deste trabalho.

### 2.1 Bases Pesquisadas

Para efetuar a pesquisa foram utilizadas as bases de patentes do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) e da *Derwent Innovations Index*, da plataforma *Web Of Science*, com o intuito de identificar tanto patentes nacionais quanto internacionais que pudessem se assemelhar ao produto sugerido neste projeto. Tais plataformas são de acesso gratuito e contêm amplas bases de dados, favorecendo a identificação de potenciais produtos semelhantes ao proposto já registrados.

### 2.2 Estratégia de Busca

A busca foi definida pela elaboração de palavras-chave que melhor representassem o dispositivo de monitoramento microsísmico e sua área de aplicação. Dessa forma, foram identificados três conjuntos de palavras-chave que caracterizam o dispositivo a ser desenvolvido, tanto em português como em inglês. Estes conjuntos foram utilizados para efetuar as buscas nas bases de patentes do INPI e da *Derwent Innovations Index*, onde as patentes que possuísem termos dos três conjuntos em seus títulos ou resumos teriam seus resumos lidos e seriam filtrados através de critérios de exclusão e inclusão para definir as patentes que seriam revisadas.

O [Quadro 1](#) ilustra as *strings* de busca utilizadas na base de patentes do INPI com os três conjuntos de palavras e seus respectivos tesouros na língua portuguesa. O [Quadro 2](#), por sua vez, ilustra as *strings* de busca utilizadas na base de patentes da *Derwent Innovations Index* com os três conjuntos de palavras e seus respectivos tesouros na língua inglesa. É importante notar que o asterisco (\*) funciona como símbolo de truncagem nas ferramentas de busca utilizadas, podendo recuperar qualquer quantidade de caracteres, inclusive nenhum.

Quadro 1 – *Strings* de busca em português

Conjunto	Termos
A	medidor OU medição OU aferidor OU registrador OU monitoramento OU gravador*
B	*sísmico OU *sísmica OU vibração OU tremor
C	geofísic* OU sismológic*

Fonte – Autor.

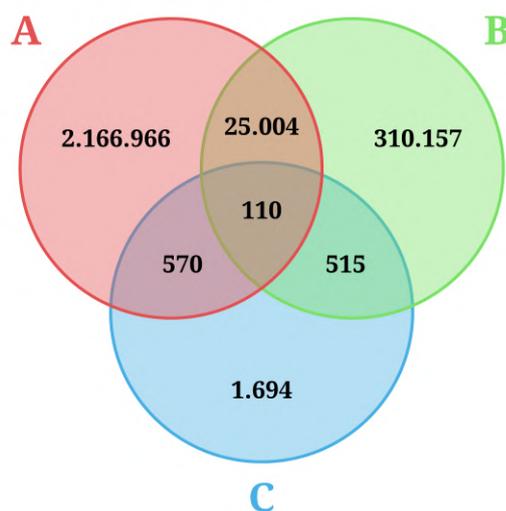
Quadro 2 – *Strings* de busca em inglês

Conjunto	Termos
A	<i>meter OR measure* OR monitoring OR record*</i>
B	<i>vibration* OR seismic OR tremor*</i>
C	<i>geophysic* OR seismolog*</i>

Fonte – Autor.

Uma vez que os termos utilizados em português e inglês são considerados equivalentes, os resultados das buscas dos conjuntos nas duas bases foram somados para facilitar a análise dos resultados. A [Figura 1](#) apresenta o diagrama de Venn com o resultado da busca de cada conjunto e suas interseções. De um total de 2.505.016 resultados, 110 patentes continham termos dos três conjuntos em seus títulos ou resumos.

Figura 1 – Diagrama de Venn do resultado da busca dos conjuntos de palavras-chave



Fonte: Autor.

## 2.3 Critérios de Exclusão e Inclusão

Os critérios de exclusão e inclusão foram definidos com o objetivo de selecionar dentre os 110 resultados da busca, as patentes mais relevantes para a pesquisa. Logo, os critérios de exclusão e inclusão foram idealizados de forma a eliminar as patentes não pertinentes ao tema estudado e manter apenas as que estivessem alinhadas com a proposta desta pesquisa. Para isso, os resumos das 110 patentes foram analisados de acordo com os critérios concebidos.

Os critérios de exclusão definidos foram:

- C1 - A patente foi arquivada ou extinta;
- C2 - A patente não está em inglês ou português;
- C3 - A patente não está disponível para leitura.

O critério de inclusão definido foi:

- C1 - A patente apresenta a descrição de um medidor sísmico para aplicações geofísicas.

Aplicando-se os critérios de exclusão e inclusão, oito patentes foram selecionadas para a composição da revisão patentária.

## 2.4 Revisão Patentária

A partir dos resultados obtidos pela busca de patentes, uma leitura completa dos relatórios descritivos das oito patentes selecionadas foi efetuada com o intuito de realizar uma revisão desses produtos. A revisão dessas patentes permite analisar o grau de proximidade dos produtos já patenteados com o dispositivo objeto deste trabalho, facilitando sua diferenciação com o que já se encontra registrado. Esta revisão também pode ser utilizada na documentação técnica do dispositivo a ser desenvolvido, uma vez que apesar da busca por patentes semelhantes ser um item não obrigatório na documentação técnica da patente, é desejável tê-la para a agilização do processo de obtenção da patente.

A revisão da documentação técnica das patentes de número US 9,465,126 B2 (LEWIS; RUSSELL, 2016), EP 3 399 348 A1 (TENGHAMN; BARR, 2018), WO 2015/082010 A1 (MELDAHL, 2015), US 0,039,149 A1 (TENGHAMN; BARR, 2013), US 2004/0237648 A1 (JONES; MACDOUGALL, 2004), WO 2009/054724 A2 (DAMS; BROEK, 2009), WO 2010/002263 A2 (JOHNSTAD, 2010) e WO 2012/123760 A2 (HILL; LEWIS, 2012) é apresentada a seguir. Também serão apontadas as diferenças entre as patentes revisadas e o dispositivo objeto deste trabalho.

### 2.4.1 Patente nº US 9,465,126 B2

Lewis e Russell (2016) descrevem um aparato de detecção distribuído por fibra óptica para uso em aplicações de pesquisa de levantamento geofísico. Este aparato possui uma fonte de radiação eletromagnética para lançá-la repetidamente em uma fibra óptica implantada na área de interesse, um detector de amostragem para amostrar a radiação retrodifundida da fibra e um processador utilizado para processar a radiação retrodifundida para proporcionar, para cada uma de uma pluralidade de porções de detecção longitudinais de fibra óptica, uma indicação de quaisquer sinais acústicos incidentes que afetem essa porção de detecção.

O detector de amostragem é usado para adquirir uma pluralidade de amostras de diversidade para cada porção de detecção longitudinal da fibra óptica. Já o processador é configurado para: processar as amostras de diversidade em canais de diversidade para determinar um sinal de medição indicativo de qualquer distúrbio acústico; correlacionar o sinal de medição de cada canal com um sinal indicativo do estímulo sísmico aplicado; combinar os sinais de medição correlacionados para fornecer um sinal de medição global para a porção de detecção longitudinal.

Em uso, o aparelho de detecção distribuído de fibra óptica interroga repetidamente a fibra óptica com interrogação de radiação e detecta qualquer radiação de interrogação que é retrodifundida de dentro da fibra. O sensor analisa a radiação retrodifundida da fibra óptica a partir de diferentes lançamentos de radiação de interrogação para determinar, por partes de interesse de detecção longitudinal, uma indicação de qualquer sinal acústico de interesse incidente como é convencional em sensores de fibra óptica distribuídos. Os sinais de medição de cada porção de fibra de detecção longitudinal podem então ser processados usando técnicas de processamento sísmico padrão, por exemplo, tratando o sinal de medição das porções longitudinais em geral da mesma maneira que os sinais de geofones individuais.

O aparato descrito por Lewis e Russell (2016) diferencia-se do dispositivo objeto deste trabalho por não enviar os dados medidos em tempo real para uma central de análise via comunicação *wireless* ou cabeada, não possuir armazenamento dos dados medidos em memória *flash*, não ser configurável via *Bluetooth* e por utilizar um sistema sensorial acústico para a medição sísmica. Portanto, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

### 2.4.2 Patente nº EP 3 399 348 A1

Tenghamn e Barr (2018) detalham um sistema sensorial sísmico para medição de aceleração e pressão durante levantamentos geofísicos marinhos, através da tensão diferencial gerada entre dois hidrofones.

O dispositivo consiste em dois sensores hidrofones, formados por materiais piezoelétricos e suas respectivas estruturas de alojamento. Utilizam-se dois pares de fios, cada par acoplado a um hidrofone, para fornecer a tensão diferencial gerada pelos sensores. O aparelho é configurado para determinar, com base nas tensões diferenciais dos dois hidrofones, a pressão e a aceleração experimentadas pelos hidrofones. Amplificadores diferenciais de sinal podem ser utilizados para produzir os sinais de saída. Os sinais dos hidrofones podem ser combinados para medição de pressão ou de aceleração.

O sistema sensorial é configurado para medir a pressão induzida pelos sinais emitidos por fontes de sinal depois de terem refletido a formação geológica do fundo do mar. Esta configuração também permite medir a aceleração de partículas induzida pelas fontes de sinal experimentada por serpentinas. O sistema pode ser acoplado a um equipamento eletrônico responsável por fazer a análise dos dados geofísicos para, por exemplo, identificar formações geológicas indicativas de depósitos de petróleo e/ou gás natural como parte de um levantamento sísmico. Além disso, pode-se acoplar um circuito de calibração que pode melhorar as medições de pressão e aceleração, considerando as discrepâncias que podem existir entre os materiais piezoelétricos presentes nos sensores.

O sistema apresentado por Tenganham e Barr (2018) diferencia-se do dispositivo proposto neste trabalho tanto pela área de aplicação, que se dá em ambientes marítimos, quanto pelo sistema sensorial aplicado para a medição sísmica. Ademais, o sistema não apresenta detalhes da forma como os dados são enviados para análise, e não oferece possibilidade de configuração via *Bluetooth* ou comunicação de rede via *wireless*. Logo, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

### 2.4.3 Patente nº WO 2015/082010 A1

Meldahl (2015) trata de um sistema de aquisição de dados geofísicos para medir a resposta do solo a uma fonte sísmica em ambiente oceânico, através do uso de câmeras. O sistema é formado por dois veículos: um submarino responsável por carregar uma fonte sísmica e um submarino autônomo com uma câmera acoplada. A câmera é posicionada de forma a tirar fotos do solo oceânico, permitindo medir a resposta do solo à perturbação causada pela fonte sísmica a partir do movimento de partículas no fundo do mar.

Neste sistema, a câmera contém pelo menos um interferômetro e também pode incluir um ou mais sensores de vibração. Dessa forma, o interferômetro mede a vibração do fundo oceânico em relação à câmera, enquanto que o sensor de vibração mede as vibrações da própria câmera, de modo que essas vibrações possam ser eliminadas das medições feitas pelo interferômetro.

Cada um dos submarinos podem conter, além de uma fonte sísmica, uma fonte eletromagnética, um *link* de navegação para o navio de superfície e um *link* de navegação

para os submarinos autônomos. Já os submarinos autônomos podem conter uma ou mais câmeras, um ou mais receptores eletromagnéticos e um *link* de navegação para um ou mais veículos submarinos. Os *links* de navegação podem ser acústicos, por exemplo.

O sistema pode utilizar uma ligação acústica para transferência de dados entre os veículos submarinos autônomos e os submarinos. Tais dados poderiam, por exemplo, ser usados para dados de controle de qualidade, instruções e/ou propósitos de navegação.

O sistema descrito por Meldahl (2015) diferencia-se do dispositivo proposto neste trabalho pela sua área de atuação, que se dá em ambiente aquático, o sistema sensorial aplicado, e pela ausência de configuração via *Bluetooth* e envio de dados para uma central de análise a partir de comunicação sem fio. Dessa forma, o documento não sugere nem antecede a presente invenção.

#### 2.4.4 Patente nº US 0,039,149 A1

Tenghamn e Barr (2013) descrevem um sistema de levantamento sísmico marítimo geofísico formado por serpentinas compreendendo múltiplos sensores espaçados, com um sistema de gravação e armazenamento dos dados provenientes dos sensores.

O sistema compreende uma ou mais serpentinas contendo múltiplas unidades de sensores espaçadas. Pelo menos uma das unidades sensoras possui um ou mais sensores digitais que emprega um *loop* de *feedback* quantificado para produzir um sinal de saída digital. Um sistema de gravação de dados coleta e armazena os dados provenientes das unidades de sensores.

Os sensores digitais podem incluir um elemento de detecção adaptado para se mover ou deformar em resposta a um estímulo de entrada. O *loop* de *feedback* quantizado pode ser adaptado para exercer uma força quantificada no elemento de detecção. O sistema de aquisição de dados inclui uma fonte sísmica e um conjunto de sensores rebocados pelo navio. Já o sistema de armazenamento de dados fica à bordo do navio. Os sensores detectam as reflexões sísmicas causadas pela fonte sísmica e geram um sinal de saída que é armazenado e depois pode ser processado para inferir a estrutura, conteúdo fluido e/ou composição de formações rochosas no subsolo.

As unidades sensoras do conjunto de sensores abrangem uma área bidimensional. O sistema de registro de dados controla a coleta e o armazenamento de dados de medição das unidades sensoras e, na maioria dos casos, também controla o disparo da fonte. O sistema de sensores é conectado a um barramento de distribuição de energia e um barramento de comunicação de dados.

O sistema detalhado por Tenghamn e Barr (2013) diferencia-se do dispositivo proposto neste projeto devido à sua área de aplicação, que se dá em meio marítimo, tipo de sensor utilizado para monitoramento sísmico e a ausência de configuração do medidor

através de *Bluetooth*. Além disso, o sistema não especifica a forma como o armazenamento de dados é feito e não possui meios para enviar os dados adquiridos para uma central de análise de dados via comunicação sem fio. Em vista disso, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

#### 2.4.5 Patente nº US 2004/0237648 A1

Jones e MacDougall (2004) descrevem um acelerômetro e/ou dispositivo de deslocamento que usa uma massa acoplada a uma flexão romboidal para fornecer compressão a um elemento sensor óptico, de preferência com uma grade de Bragg em fibra (*Fiber Bragg Grating* - FBG).

Os componentes básicos do sensor (acelerômetro e/ou dispositivo de deslocamento) incluem um elemento de flexão ou mola em forma de losango, um elemento sensor óptico contendo uma FBG sensível à força e uma massa. A parte inferior da flexão é afixada a um alojamento no pino de fixação.

O transdutor descrito inclui um sensor óptico pré-comprimido disposto ao longo de um primeiro eixo entre os lados da flexão. Quando a massa experimenta uma força devido à aceleração ou deslocamento, a flexão se expande ou contrai ao longo do segundo eixo (perpendicular ao primeiro eixo), que respectivamente comprime ou alivia a compressão da FBG no elemento óptico ao longo do primeiro eixo. Perturbar a força apresentada à FBG altera seu comprimento de onda de reflexão de Bragg, que é interrogado para quantificar a força dinâmica ou constante através da proporção entre a força aplicada e a alteração do comprimento de onda de reflexão de Bragg.

Uma vez que a temperatura pode causar uma mudança no comprimento de onda de reflexão Bragg de forma semelhante à aplicação de uma força sob a FBG, uma segunda FBG somente sensível à temperatura é utilizada, de forma que seja possível medir os efeitos da temperatura e descartá-los das medições feitas com a FBG sensível à força. Além disso, um esquema de isolamento da FBG sensível à força dos efeitos da temperatura é apresentado através de um compensador feito preferencialmente de aço inoxidável e com um coeficiente de expansão térmica alto, que se expande axialmente quando a temperatura sobe, compensando os efeitos causados pela temperatura na FBG sensível à força.

O dispositivo caracterizado por Jones e MacDougall (2004) diferencia-se do dispositivo proposto neste projeto por não armazenar os dados medidos, não operar em rede para envio das medições e não contar com configuração via *Bluetooth* e geolocalização. Portanto, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

### 2.4.6 Patente nº WO 2009/054724 A2

Dams e Broek (2009) retratam um sensor de velocidade que compreende uma primeira parte e uma segunda parte disposta concentricamente em torno da primeira, cujas partes são axialmente móveis uma em relação à outra, uma das partes sendo estática e a outra parte dinâmica e uma das partes compreendendo uma medição por uma bobina para medir a velocidade na qual as duas partes estão deslocadas uma em relação à outra e a primeira parte compreendendo uma primeira matriz de ímãs e a segunda parte uma segunda matriz de ímãs, cujas matrizes de ímãs exercem uma força magnética uma sobre a outra.

O sensor de velocidade compreende uma parte estática e uma parte dinâmica disposta concentricamente dentro dela. A parte estática possui dois ímãs permanentes (A e B) e a parte dinâmica possui mais dois ímãs permanentes (C e D). O ímã C é orientado inversamente aos ímãs A, B e D. Os ímãs são ajustados um ao outro para que a gravidade na parte dinâmica seja neutralizada pela força magnética na parte dinâmica. Como resultado, o peso da parte dinâmica não precisa ser carregado por molas e a parte dinâmica pode se mover livremente, de modo que o curso completo possa ser usado para medir acelerações e a frequência natural seja baixa. A parte estática inclui ainda uma bobina de medição para medir o deslocamento da parte dinâmica e para o posicionamento radial da parte dinâmica, esta parte é conectada à parte estática por meio de feixes de molas.

Sensores deste tipo são usados para medições sismológicas, para medir vibrações mecânicas, ondas acústicas ou ondas infra-sonoras, entre outros. Para esse fim, a parte estática do sensor deve estar conectada ao terra. No caso de vibrações na superfície da Terra, a parte estática será deslocada em relação à parte dinâmica, na qual o deslocamento relativo será medido.

O aparato especificado por Dams e Broek (2009) diferencia-se do dispositivo proposto neste trabalho por apenas tratar do transdutor capaz de identificar vibrações ou aceleração, não abrangendo nenhuma forma de armazenamento ou envio das medições. Portanto, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

### 2.4.7 Patente nº WO 2010/002263 A2

Johnstad (2010) descreve um cabo de serpentina eletromagnética e sísmica e um método para utilizá-lo em aplicações de prospecção geofísica marinha.

A invenção refere-se a uma serpentina geofísica marinha na forma de um cabo submersível com sensores sísmicos, isto é, componentes acústicos e sísmicos e sensores eletromagnéticos dispostos ao longo do cabo. O cabo é fabricado preferencialmente em seções de cabo sensoriais de construção geralmente idêntica. As seções de cabo sensoriais

podem ser conectadas a partir de uma primeira extremidade traseira da seção do cabo sensorial para forçar um fim a uma seção do cabo sensorial subsequente ou a uma série de seções do cabo sensorial subsequentes para formar um longo cabo sensorial para coletar dados sísmicos e eletromagnéticos no mar ou no fundo do mar.

Cada seção do cabo sensorial possui sensores eletromagnéticos (sensores de campo elétrico e de campo magnético) e sísmicos (hidrofonos e receptores de componentes sísmicos para medições de vetores sísmicos). Os sensores de campo elétrico consistem em pares de eletrodos dispostos em diferentes posições ao longo do cabo e conectados a um amplificador de tensão, e são usados para medir o campo elétrico na direção paralela à serpentina quando rebocada no mar. Já os sensores de campo magnético compreendem três sensores de componentes de campo magnético mutualmente ortogonais que fornecem uma imagem total dos campos magnéticos compostos pelo campo geomagnético local e o campo eletromagnético da fonte controlada variável.

A invenção detalhada por [Johnstad \(2010\)](#) distingue-se do projeto proposto neste documento quanto ao local de aplicação do sensoriamento sísmico, os tipos de transdutores utilizados e por não apresentar formas de armazenamento e envio das medições para posterior análise. Logo, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

#### 2.4.8 Patente nº WO 2012/123760 A2

[Hill e Lewis \(2012\)](#) descrevem um método de monitoramento de subsuperfície usando sensores acústicos distribuídos, mais especificamente para monitoramento geofísico de poços.

O método desenvolvido envolve interrogar uma fibra óptica implantada ao longo de substancialmente todo o comprimento de um poço para fornecer detecção acústica distribuída e detectar a resposta acústica de substancialmente todo o comprimento do poço em resposta a um estímulo sísmico conhecido.

Os retornos acústicos das porções individuais da fibra óptica podem ser processados para fornecer um perfil, como um perfil sísmico vertical, por exemplo. Uma resposta acústica de todo o comprimento do poço pode ser gravada usando um único disparo da fonte sísmica. Os dados podem, portanto, ser processados para fornecer informações relacionadas ao tempo de chegada das ondas sísmicas incidentes em várias porções sensoriais da fibra e também reflexos das ondas sísmicas.

A detecção acústica distribuída por fibra óptica é uma técnica conhecida pela qual um único comprimento da fibra óptica é interrogado, geralmente por um ou mais pulsos de entrada de luz, para fornecer detecção substancialmente contínua da atividade acústica ao longo de seu comprimento. Os pulsos ópticos são lançados na fibra e a radiação retroespalhada de dentro da fibra é detectada e analisada. Ao analisar a radiação do raio

retrodisperso na fibra, o efeito dos sinais acústicos incidentes na fibra pode ser detectado.

Os retornos de retroespalhamento são tipicamente analisados em vários intervalos de tempo, tipicamente vinculados à duração dos pulsos de interrogação e, portanto, os retornos de uma pluralidade de porções sensoriais discretas podem ser analisados separadamente. Assim, a fibra pode efetivamente ser dividida em uma pluralidade de porções sensoriais discretas de fibra.

O método descrito por Hill e Lewis (2012) diferencia-se do dispositivo proposto neste projeto por utilizar um elemento sensor diferente para medir vibrações, além de não especificar formas de armazenamento das medições e o envio das mesmas para uma central de análise. Portanto, o documento não sugere nem antecipa a presente invenção.

## 2.5 Resultados e Discussão da Busca Patentária

Como pode-se observar na seção 2.4, não foram identificadas patentes que sugerissem ou antecipassem o dispositivo de análise microssísmica proposto neste trabalho. Dentre as 110 patentes resultantes da busca patentária, muitas tinham como área de aplicação o ambiente aquático, onde o monitoramento sísmico é utilizado para levantamento geográfico do local e permite indicar possíveis reservas de petróleo ou gás natural.

Por ser um dispositivo pensado para ser utilizado em terra, com o intuito de monitorar atividades sísmicas para identificar percolações em barragens ou tremores que possam afetar sua estrutura ou causar desmoronamentos em minas, o dispositivo sugerido neste projeto apresenta um sistema sensorial, envólucro e forma de envio de dados diferentes das patentes encontradas pela pesquisa.

O sistema sensorial do dispositivo de monitoramento sísmico proposto efetua a medição sísmica em três eixos cartesianos, utilizando um geofone para cada eixo e um acelerômetro triaxial digital. A medição nos três eixos cartesianos permite uma cobertura de medição mais precisa, tanto com frequências mais próximas a zero com os geofones quanto com frequências mais altas com o acelerômetro.

O envólucro do medidor precisa ser resistente à água e poeira, uma vez que poderá ser instalado em campo aberto. Portanto, o invólucro deve contar com grau de proteção (IP – *Ingress Protection*) 67, tornando-o totalmente protegido contra poeira e protegido contra efeitos de imersão temporária de 15 cm a 1 m por 30 minutos (BLOCH, 2009). O envólucro também deve possuir um *spike* para que seja possível fixá-lo ao solo.

As informações adquiridas pelo medidor precisam ser constantemente enviadas para uma central de análise de dados, de forma que o ambiente seja continuamente monitorado. Dessa forma é possível responder rapidamente a algum problema nas instalações, reduzindo o risco de acidentes. O medidor proposto pode utilizar uma rede sem fio de longo alcance

para efetuar a transmissão das medições.

Ademais, o medidor proposto pode ser configurado em campo, através de comunicação via *Bluetooth*, além de ser rastreável por GPS, permitindo associar as medições ao local onde as amostras foram adquiridas.

Todas essas características distinguem o medidor proposto neste trabalho dos dispositivos já existentes no mercado, como o SmartSolo ([Dynamic Technologies \(DTCC\), 2017](#)), ou dos produtos encontrados na busca patentária.

O resultado da revisão patentária atesta a originalidade do dispositivo proposto, que contribuirá no processo de monitoramento de barragens e minas com suas funcionalidades singulares.

## 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição da metodologia adotada no desenvolvimento do dispositivo de monitoramento microssísmico, incluindo o projeto e a prototipação das suas PCBs, que é o objeto deste trabalho. A metodologia proposta leva em conta todo o ciclo de vida do dispositivo de monitoramento microssísmico, desde sua concepção até o seu descomissionamento.

### 3.1 Processo de Projeto de Produtos Inovadores – P3I

A metodologia adotada no desenvolvimento deste trabalho segue o processo de gestão de desenvolvimento de produtos inovadores proposto por [Carvalho \(2019\)](#), chamado de Processo de Projeto de Produtos Inovadores (P3I). Este método é utilizado no gerenciamento de projetos do Polo de Inovação Campos dos Goytacazes (PICG) e tem por objetivo apoiar o desenvolvimento de produtos mecatrônicos, considerando aspectos de gestão da propriedade intelectual em todas as suas fases.

O P3I consiste em uma metodologia baseada na integração entre as técnicas de Engenharia Simultânea, Agilismo e *Design Thinking*, de forma que seja compatível com projetos de produtos de diferentes engenharias, seja ágil, de fácil compreensão e com baixo custo de implementação, além de ser alinhado com as melhores práticas de desenvolvimento de produtos inovadores. Este processo adota um ciclo de vida que leva em conta a facilidade de adaptação a mudanças, definida pelo grau de abstração tipicamente encontrado em cada engenharia ([CARVALHO, 2019](#)).

As técnicas de desenvolvimento empregadas pelo P3I possuem várias práticas convergentes, significando que elas podem não ser exatamente as mesmas nas três técnicas, porém, elas convergem para o mesmo ponto; e apenas uma prática divergente, no sentido de que difere em como é aplicada em cada técnica. Durante suas fases, o P3I busca reforçar as convergências das técnicas e propõe um método simples para resolver a única divergência ([CARVALHO, 2019](#)).

Dentre as práticas convergentes temos o trabalho em equipe, o compartilhamento do conhecimento e de decisões, a flexibilidade para mudanças, a independência de tarefas, a detecção precoce de erros e o *design* para a sustentabilidade. Portanto, O P3I se baseia na divisão da equipe em células, onde cada uma delas lida com uma determinada disciplina do projeto (mecânica, eletrônica, computação etc). As células devem trocar conhecimentos entre si, especialmente para tratar de assuntos interdisciplinares, além de tomarem decisões em conjunto. Testes automatizados de *software* e *hardware* e prototipagem de componentes

de *hardware* e mecânicos são utilizados intensamente para conferir maior flexibilidade caso haja mudanças no projeto, além de permitir a detecção de erros precocemente. As atividades das células devem ser tão independentes quanto possível umas das outras, conferindo um paralelismo nas atividades desenvolvidas e, conseqüentemente, reduzindo o tempo total de desdobramento do projeto. O P3I também procura estimular as partes interessadas a pensar sobre os problemas que envolvem o descomissionamento do produto desde a sua concepção (CARVALHO, 2019).

O tempo referente à tomada de decisão técnica é basicamente a única prática divergente entre as três técnicas aplicadas no P3I. Enquanto o Agilismo faz uso de tomada de decisões tardias, devido à sua origem na indústria de *software*, que possui maior facilidade em alterar seus produtos, a Engenharia Simultânea utiliza a tomada de decisões antecipada, devido à sua origem na indústria aeroespacial e sua demanda por evitar alterações tardias e caras. O *Design Thinking*, por sua vez, fundamenta-se na prototipagem e, embora use a tomada de decisão antecipada para os requisitos de alto nível, em teoria, adota a tomada de decisão tardia na arena técnica, enquanto desenvolve os protótipos em direção ao produto final. Para solucionar essa divergência entre as técnicas, o P3I utiliza uma lógica baseada no custo para determinar quando paralisar uma dada característica do produto: quanto maior o custo estimado da mudança, mais antecipada será a tomada de decisão, congelando a característica técnica e derivando as demais em função dela. Embora a utilização de protótipos geralmente demande tomadas de decisão antecipadas, as decisões relacionadas ao *software* costumam ser mais tardias, um tempo intermediário é aplicado ao *hardware* e decisões antecipadas são usadas para componentes mecânicos (CARVALHO, 2019).

O processo de projeto de um produto é melhor descrito em um ciclo de vida com fases definidas, a fim de facilitar o foco nas atividades mais importantes de acordo com o ponto em que o produto se encontra dentro do ciclo. Neste sentido, o P3I emprega uma adaptação do ciclo de vida GERAM na qual considera-se um *loop* iterativo e incremental para as fases de Requisitos, Projeto e Operação, e aglutinam-se as fases finais do *framework* para simplificar o seu uso, dando foco às fases de desenvolvimento do ciclo, além de sincronizá-lo com as atividades de gerenciamento de propriedade intelectual (CARVALHO, 2019).

O ciclo de vida proposto pelo P3I está representado na Figura 2. A partir desta figura é possível observar como o *Design Thinking* foi integrado à Engenharia Simultânea e ao *framework* GERAM adaptado para que o ciclo de vida proposto fosse gerado.

As fases do *Design Thinking* (exploração, ideação e prototipação) são integradas às fases do ciclo de vida GERAM (requisito, operação e descomissionamento), e o desenvolvimento do projeto ocorre nos “Vs”, conforme a Engenharia Simultânea. As etapas de projeto preliminar e detalhado do GERAM foram denominados como as fases de arquitetura e de componente do ciclo de vida P3I.

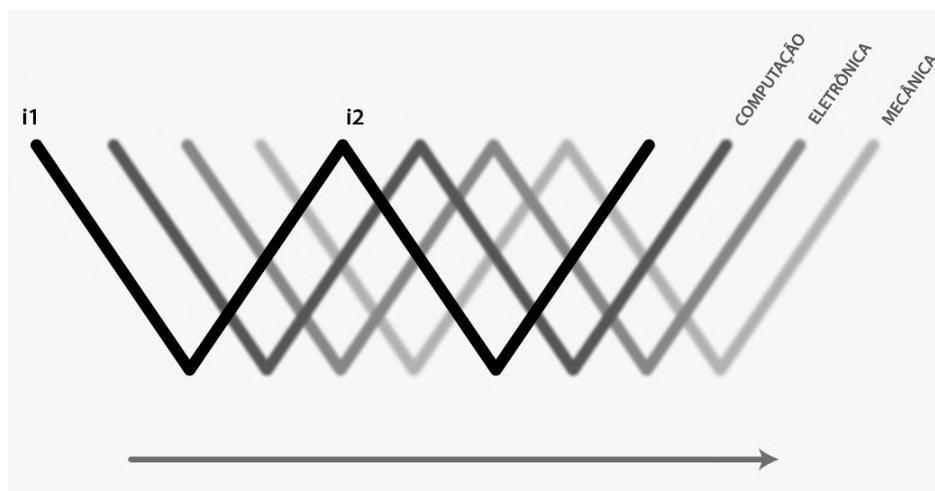
Figura 2 – Abstração do ciclo de vida proposto pelo P3I



Fonte: [Carvalho \(2019\)](#).

O *loop* iterativo e incremental no ciclo de vida proposto pelo P3I é ilustrado na [Figura 3](#). Ele ocorre nas etapa de Prototipação, onde cada um dos “Vs” do ciclo de vida acontecem no tempo e em paralelo para cada disciplina, ou seja, cada iteração (i1, i2 etc.) possui um “V” para cada disciplina ([CARVALHO, 2019](#)).

Figura 3 – Iterações no ciclo de vida P3I



Fonte: [Carvalho \(2019\)](#).

O ciclo de vida proposto por [Carvalho \(2019\)](#) agrega o desenvolvimento do produto a testes que deverão ser elaborados antes mesmo de iniciar as tarefas, de forma que a próxima fase só será iniciada se o teste especificado for satisfeito. Este desenvolvimento

orientado à testes é característico do Agilismo atrelado ao desenvolvimento do ciclo de vida P3I.

É importante salientar que a fase de Prototipação engloba as fases de Requisitos, Arquitetura e Componente, bem como os testes unitários, de integração e de aceitação. Caso os testes unitários falhem, deve-se voltar à fase de componente para revisar quais dispositivos devem ser usados no sistema. Se os testes de integração falharem, é preciso retornar à fase de arquitetura para rever a estrutura do sistema. Se os testes de aceitação falharem, deve-se voltar à fase de requisitos, pois estes não foram levantados corretamente. Logo, erros percebidos em fases mais avançadas do ciclo de vida causam maiores prejuízos ao projeto, sendo importante executar cada etapa do ciclo de vida com muito cuidado.

## 3.2 Fases do Ciclo de Vida P3I

As fases do ciclo de vida P3I são descritas no [Quadro 3](#). O conceito das fases referentes ao *Design Thinking* é baseado nas definições feitas por [Vianna et al. \(2012\)](#), enquanto que as fases referentes ao GERAM foram fundamentadas por [Bernus e Nemes \(1996\)](#). Os testes unitários, de integração e de validação foram conceituados de acordo com [Forsberg e Mooz \(1991\)](#).

O Projeto e prototipação das PCBs do dispositivo de monitoramento microcrossísmico segue o ciclo de vida P3I, de forma a considerar o dispositivo como um todo nas etapas de exploração, ideação, operação e descomissionamento, e focar na confecção das PCBs na etapa de prototipação. Em outras palavras, serão descritas detalhadamente neste trabalho apenas as iterações no ciclo de vida da disciplina de eletrônica do dispositivo durante a etapa de prototipação. As demais disciplinas que compõem o medidor, como a computação, mecânica e elétrica, não serão abordadas detalhadamente, visto que a proposta deste trabalho é de focar apenas nas particularidades do desenvolvimento das placas de circuito impresso.

Quadro 3 – Descrição das fases do ciclo de vida P3I

<b>Fase</b>	<b>Descrição</b>
Exploração	Consiste no entendimento do problema de pesquisa e seu contexto, de forma a entender o tema da pesquisa e definir o escopo do projeto.
Ideação	Fase que tem o intuito de gerar ideias inovadoras para solucionar o problema de pesquisa, de acordo com o contexto do assunto trabalhado.
Prototipação	Consiste em transformar as ideias geradas no projeto em algo tangível, mesmo que de forma simplificada, auxiliando na validação dessas ideias.
Requisitos	Descreve os processos operacionais da entidade estudada para apontar suas exigências, seus processos relevantes e necessidades funcionais.
Arquitetura	Projeto da arquitetura do produto a ser desenvolvido, levando em consideração as operações que devem ser realizadas.
Componentes	Consiste em definir os componentes a serem utilizados para composição do produto baseado nos requisitos do projeto.
Testes unitários	Testes que devem ser executados para verificar se os componentes definidos para o produto atendem às necessidades do projeto.
Testes de integração	Testes juntando os componentes do produto de forma a verificar o funcionamento do sistema com os componentes interligados.
Testes de aceitação	Testes feitos com o produto completo na sua área de interesse, visando verificar se o produto cumpre com os requisitos do projeto.
Operação	Consiste em empregar os processos necessários para fornecer um serviço ou gerar um produto.
Descomissionamento	Aborda a questão da reciclagem e descarte total ou parcial do produto no final de sua vida útil.

Fonte – Autor.

## 4 DESENVOLVIMENTO DAS PCBs

Este capítulo descreve o projeto e a prototipação das PCBs do dispositivo de monitoramento microsísmico a partir da metodologia proposta por [Carvalho \(2019\)](#), abrangendo todas as etapas do ciclo de vida P3I para o desenvolvimento do dispositivo e detalhando as iterações da disciplina de eletrônica nas etapas de testes de integração e aceitação, onde é explicitado o processo de projeto e confecção das PCBs do dispositivo, bem como os testes que demonstram o funcionamento dos mesmos.

As demais etapas são explicadas de forma abreviada, visto que o objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento das PCBs do dispositivo, e não detalhar o processo completo de criação do aparato de monitoramento microsísmico. Além da disciplina de eletrônica, as disciplinas de mecânica, elétrica e computação também fazem parte do desenvolvimento do dispositivo de monitoramento e não serão detalhados neste documento.

### 4.1 Exploração

A etapa de exploração consiste em compreender o problema de pesquisa e seu contexto, de forma que o tema da pesquisa seja entendido e o escopo do projeto possa ser definido ([VIANNA et al., 2012](#)). Portanto, nesta Seção será discutida a questão das minas e barragens de rejeitos de minérios e os riscos envolvidos nessas aplicações, bem como as dificuldades encontradas no monitoramento desses ambientes.

A exploração mineral traz consigo riscos socioambientais associados a possíveis rompimentos de barragens de rejeito ou desmoronamento de minas, situações que acarretam em perdas de vidas humanas e prejuízos incalculáveis às regiões impactadas, assim como para as empresas responsáveis pela operação de extração mineral ([ARAUJO et al., 2016](#); [BRASIL, 2016](#)). Acidentes como os rompimentos das barragens de Mariana, em 2015, e Brumadinho, em 2019, citados no [Capítulo 1](#) deste documento, são claros exemplos dos riscos provenientes da extração mineral e dos impactos gerados por acidentes neste setor.

De acordo com o último relatório de segurança de barragens da Agência Nacional de Águas - [ANA \(2018\)](#), o Brasil possui 24.092 barragens registradas, que servem a diversos tipos de uso. Dentre elas, 790 são utilizadas na contenção de rejeitos de mineração. Segundo o relatório, 204 dessas barragens de mineração apresentam dano potencial associado alto, ou seja, têm potencialidade de dano, seja ao meio ambiente ou à população, caso ocorra algum acidente.

Diante deste cenário, o monitoramento de barragens visando a identificação de problemas estruturais torna-se extremamente relevante, principalmente devido ao número

significativo de barragens com alto potencial de dano socioambiental identificado no país. Por meio de um monitoramento efetivo, acidentes em barragens de rejeito de mineração podem ser mitigados ou até mesmo evitados. Da mesma forma, o monitoramento de ambientes de mineração, como cavernas e túneis, torna-se imprescindível para garantir a segurança dos trabalhadores e do meio ambiente de possíveis desmoronamentos.

Muitas das falhas que ocorrem na estrutura de barragens são precedidas de sinais que podem ser percebidos através da utilização de um programa de monitoramento adequado (MARTIN; DAVIES, 2000). Os sinais podem ocorrer em diferentes intervalos de tempo, de forma que a exteriorização das alterações na barragem, como o aparecimento de trincas ou de descargas de águas com sedimento, pode demorar anos ou poucas horas antes da falha (MAC, 2011).

Dessa forma, o monitoramento desses ambientes deve ser feito não somente através de inspeção visual, mas também por meio da implementação de instrumentação. Assim, o comportamento das barragens é observado tanto qualitativamente quanto quantitativamente (MAC, 2011).

O deslocamento do talude, as atividades sísmicas, a qualidade da água, a poropressão, o nível da água e o clima são alguns dos parâmetros levados em consideração no monitoramento de barragens por instrumentação (MAC, 2011). Instrumentos que viabilizam a observação de deslocamentos, subpressões e vazões de percolação são os mais indicados para o monitoramento de barragens, uma vez que são de fácil interpretação. Piezômetros, inclinômetros, marcos superficiais, deformímetros e estações meteorológicas são exemplos de instrumentos comuns utilizados nesses ambientes (MACHADO, 2007).

Instrumentos que permitam a medição do comportamento sísmico são interessantes tanto para barragens quanto para minas, visto que podem identificar tremores que indiquem risco de desmoronamento dessas estruturas ou a percolação de água numa barragem.

A questão é que os instrumentos normalmente utilizados no monitoramento desses ambientes possuem natureza pontual, podendo facilmente falhar em mostrar regiões de fraqueza e fenômenos de erosão interna. Além disso, as medições precisam ser coletadas por operadores no local onde os instrumentos estão instalados, ocasionando uma baixa aquisição de medições provenientes dos elementos sensores. Mesmo os instrumentos capazes de armazenar suas medições necessitam que um operador vá ao campo para obter as informações registradas.

Sistemas de monitoramento com dispositivos ligados a uma rede, permitindo o envio das medições sem a necessidade de intervenção humana, configuram-se como soluções de alto custo, visto que só existem no exterior.

Tendo em vista as considerações anteriormente citadas, o problema de pesquisa deste projeto consiste na dificuldade em efetuar o monitoramento remoto e contínuo de

ambientes de mineração e barragens de rejeito utilizando-se a instrumentação existente atualmente no mercado brasileiro. Logo, o tema de pesquisa definido pelo projeto é o monitoramento remoto e contínuo de ambientes de mineração e barragens através da instrumentação.

## 4.2 Ideação

A etapa de ideação é definida como a fase de geração de ideias inovadoras visando solucionar o problema de pesquisa identificado na fase de exploração, levando-se em consideração o contexto do assunto trabalhado (VIANNA *et al.*, 2012). Dessa forma, esta Seção aborda as ideias que deram origem ao projeto do dispositivo de monitoramento microsísmico.

Uma vez constatada a dificuldade em efetuar o monitoramento contínuo de ambientes como barragens de rejeitos de minério e minas utilizando-se a instrumentação disponível atualmente no Brasil, a busca por soluções que possam sanar esse problema inevitavelmente sugere o desenvolvimento de um instrumento capaz de monitorar tais ambientes de forma a enviar as medições relevantes para o gestor em tempo integral, sem a necessidade de intervenção humana para esta tarefa.

Para que o dispositivo proposto possa ser implementado tanto em minas quanto barragens, o parâmetro a ser monitorado precisa estar presente em ambos os ambientes. A medição de atividade sísmica, dentre os parâmetros descritos na etapa de exploração, pode ser utilizada na identificação de percolação de água em barragens e tremores que possam afetar a estrutura de minas, numa faixa de frequência baixa. Por isso, decidiu-se que a solução a ser desenvolvida deve medir a atividade microsísmica desses ambientes para identificar problemas em suas estruturas.

Uma vez que o dispositivo a ser desenvolvido precisa enviar as medições para o gestor sem que haja a necessidade de algum operador ir ao campo para coletar essas informações, é necessário que este esteja conectado a uma rede, de forma a enviar os dados medidos para uma central de análise de dados via Internet. Isso permite o monitoramento remoto desses ambientes e o armazenamento das medições num servidor para que haja um histórico do comportamento dessas estruturas.

Ambientes de mineração e barragens normalmente encontram-se em locais isolados e normalmente possuem grandes extensões, o que dificulta a utilização de redes tradicionais. Além disso, esses ambientes também dificultam o uso de redes cabeadas, pois os cabos podem ser danificados e as longas distâncias tornam esses tipos de rede inviáveis devido ao alto custo de implementação.

Como estes dispositivos serão instalados em locais afastados da rede elétrica, é

importante que a rede e os periféricos implementados no projeto levem em consideração a sua autonomia, visto que sua energização se dará por meio de baterias recarregáveis a partir de energia fotovoltaica.

Dispositivos IoT (*Internet of Things*), assim como a aplicação proposta por este projeto, trazem limitações que restringem a aplicabilidade de redes tradicionais de telefonia móvel ou WiFi devido aos requisitos de escalabilidade e de consumo de energia. Isso levou à criação de novos protocolos e tecnologias que pudessem atender a este novo nicho: as redes de longo alcance e de baixo consumo, conhecidas pela sigla LPWAN (*Low-Power Wide Area Networks*). Dentre esses novos tipos de tecnologia, a rede LoRa apresenta-se como uma opção de LPWAN para a tecnologia de medidores inteligentes em infraestruturas civis e em aplicações industriais (AUGUSTIN et al., 2016).

LoRa, que significa "longa distância" (do inglês, *Long Range*), é um sistema de comunicação sem fio de longa distância que visa ser utilizável em dispositivos de bateria de longa duração, onde o consumo de energia é de suma importância (AUGUSTIN et al., 2016). Ela é baseada na técnica de modulação CSS (*Chirp Spread Spectrum*), que é utilizada em sistemas militares e de radar, por possibilitar longo alcance e boa imunidade à ruídos (AUGUSTIN et al., 2016; BOR; VIDLER; ROEDIG, 2016). Devido à evolução da tecnologia, a rede LoRa é a primeira aplicação de baixo custo dessa tecnologia.

Por possuir as características necessárias para o dispositivo proposto, além de contar com uma extensa comunidade de desenvolvedores, decidiu-se por utilizar a rede LoRa para conectar o dispositivo de monitoramento microssísmico à Internet. Os medidores enviam via rede LoRa os dados adquiridos para um *gateway*, que por sua vez envia as informações para um computador através de uma conexão cabeada ou sem fios à Internet.

Dessa forma, a partir da exploração do problema de pesquisa, concebeu-se um dispositivo de monitoramento microssísmico aplicável à minas e barragens, alimentado através de baterias recarregáveis e conectado a uma rede de longa distância e baixo consumo de energia, a rede LoRa, de forma a enviar eventos microssísmicos à um computador automaticamente. Tal dispositivo permitiria a análise contínua dos ambientes sem a necessidade de intervenção humana no campo, além de possibilitar a criação de um histórico de eventos dessas estruturas. Por ser um dispositivo criado em território nacional, seu custo seria reduzido com relação aos medidores semelhantes existentes no exterior, viabilizando sua implementação em larga escala no país.

### 4.3 Prototipação

A etapa de prototipação fundamenta-se na transformação das ideias geradas no projeto em algo concreto, mesmo que de forma simplificada, auxiliando na validação das ideias propostas (VIANNA et al., 2012). Esta etapa é subdividida em três fases: a fase

de requisitos, onde são estudadas as exigências do projeto, seus processos relevantes e necessidades funcionais; a fase de arquitetura, onde projeta-se a estrutura do produto, levando em consideração as operações que devem ser realizadas; e a fase de componentes, onde são definidos os elementos a serem utilizados para composição do produto, baseando-se nos requisitos do projeto (BERNUS; NEMES, 1996).

Para cada uma das três fases da prototipação, existe um teste correspondente. Os testes unitários verificam se os componentes escolhidos atendem às necessidades do projeto. Os testes de integração, por sua vez, apuram o funcionamento dos componentes quando estes estão interligados, checando assim a arquitetura do produto. Já os testes de aceitação consistem em analisar o produto completo, instalado em sua área de interesse, visando verificar se o produto cumpre com os requisitos do projeto. Caso algum desses testes falhe, é necessário retornar à etapa correspondente ao teste (FORSBERG; MOOZ, 1991).

Nesta Seção serão discutidas as etapas para o desenvolvimento das placas de circuito impresso do dispositivo de monitoramento microssísmico, bem como os testes desenvolvidos para verificar o funcionamento adequado dos mesmos. Em outras palavras, esta Seção abordará as iterações no ciclo de vida P3I da disciplina de eletrônica deste projeto. As demais disciplinas referentes ao projeto (mecânica, elétrica e computação) não serão abordados neste documento.

### 4.3.1 Requisitos

A partir da concepção do dispositivo de monitoramento microssísmico feita na fase de ideação, as suas funcionalidades foram elaboradas pela equipe de desenvolvimento do projeto de forma que este possa atender às necessidades identificadas pelo problema de pesquisa. Dentre os requisitos funcionais identificados, os principais são:

- O dispositivo deve efetuar a medição de eventos microssísmicos nos três eixos cartesianos, de forma a capturar o sentido do abalo sísmico e sua propagação, além de conferir maior precisão às medições;
- O dispositivo deve enviar as medições adquiridas para um computador através da rede LoRa numa distância de 2 quilômetros em campo aberto e plano;
- O dispositivo deve armazenar as medições em uma memória *flash* para permitir a aquisição de dados local, caso necessário, e permitir a armazenagem das medições caso ocorra uma falha na rede;
- O dispositivo deve contar com tecnologia de geolocalização para identificar sua localização no campo;
- O dispositivo deve enviar sua localização juntamente com os dados medidos para que seja possível identificar a origem e o sentido de propagação dos eventos sísmicos;

- O dispositivo deve ser parametrizável a partir de comunicação via *Bluetooth*, de forma que este possa ser configurado em campo sem a necessidade de uma infraestrutura complexa para tal;
- O dispositivo deve contar com alimentação através de baterias recarregáveis para que seja possível efetuar uma verdadeira operação remota de monitoramento sísmico;
- O dispositivo deve utilizar energia fotovoltaica para carregar suas baterias, de forma a aumentar sua autonomia e reduzir a necessidade de intervenções dos operadores no campo;
- O dispositivo deve ser conectado firmemente ao solo para que os elementos sensores possam captar os eventos microssísmicos.
- O dispositivo deve possuir proteção contra água e poeira, uma vez que este operará em ambientes abertos;
- O dispositivo deve operar em uma ampla faixa de temperatura;
- O dispositivo deve possuir alta resistência física.

Além dos requisitos funcionais, também foram identificados vários requisitos não-funcionais do dispositivo. Dentre eles, os principais são:

- O dispositivo deve ser facilmente parametrizável;
- O dispositivo deve ser altamente disponível;
- O dispositivo deve garantir a segurança dos dados armazenados e enviados via LoRa;
- O dispositivo deve ser facilmente calibrável.

Para garantir que os requisitos identificados sejam atendidos pelo dispositivo de monitoramento microssísmico a ser desenvolvido, o teste de aceitação deverá ser feito com o protótipo em estágio final de desenvolvimento em um local que permita a fixação do dispositivo no solo, de forma a verificar o seu funcionamento ao longo do tempo sob condições semelhantes aos locais onde os dispositivos serão instalados para operação.

### 4.3.2 Arquitetura

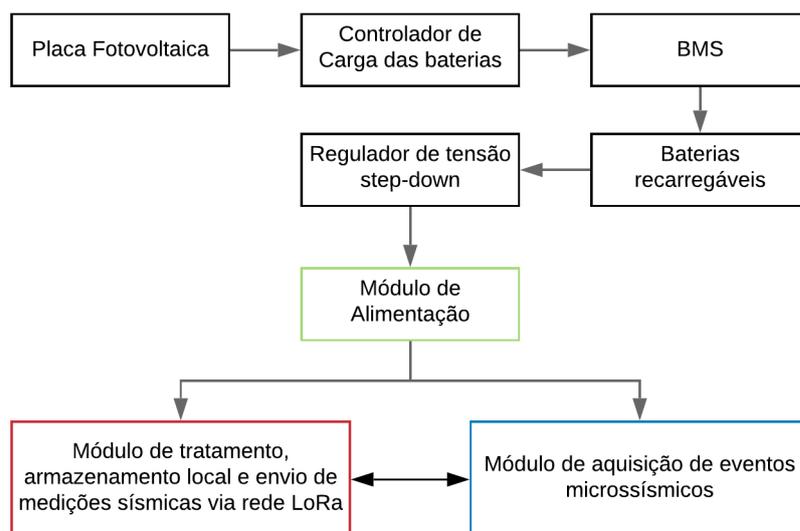
Com os requisitos do dispositivo devidamente elicitados, a equipe de desenvolvimento seguiu para a formulação do projeto de arquitetura da parte eletrônica do produto em questão. Este processo leva em conta todas as operações que o aparelho deve realizar, bem como as funcionalidades identificadas na etapa de requisitos.

Com a finalidade de conferir ao dispositivo de monitoramento micro sísmico uma arquitetura modularizada, três módulos principais foram idealizados: um módulo de alimentação, responsável pela conversão da tensão das baterias recarregáveis para níveis adequados aos CIs (Circuitos Integrados), elementos sensores e periféricos dos demais módulos; um módulo de aquisição de eventos micro sísmicos, responsável pela conversão das medições analógicas proveniente dos sensores fixados ao solo através do invólucro para valores digitais e envio das medições para o microcontrolador; e um módulo de tratamento, armazenamento local e envio de medições via rede LoRa, parametrizável via *Bluetooth* e munido de tecnologia GPS.

A modularização do dispositivo confere uma maior facilidade no desenvolvimento das PCBs, que têm suas complexidades reduzidas devido à diminuição do número de componentes por placa, além de permitir testar cada uma das funcionalidades almeçadas de forma independente. Caso um erro seja constatado em um dos módulos, os outros módulos não são comprometidos, evitando assim o retrabalho em toda a eletrônica do dispositivo.

A partir da arquitetura definida nesta etapa, cada módulo do dispositivo de monitoramento micro sísmico corresponde a uma placa de circuito impresso com os componentes necessários para implementar suas funcionalidades específicas. A [Figura 4](#) ilustra a arquitetura do dispositivo de monitoramento micro sísmico, demonstrando as ligações entre os módulos e o circuito de alimentação.

Figura 4 – Arquitetura da eletrônica do dispositivo de monitoramento micro sísmico



Fonte: Autor.

Os testes de integração correspondentes a esta etapa deverão consistir em testar primeiramente a comunicação e o funcionamento em conjunto entre os componentes de

cada módulo separadamente e, posteriormente, a comunicação e funcionamento entre os módulos. Para evitar que possíveis problemas de projeto das PCBs influenciem nos testes de integração entre os componentes, as ligações entre eles deverão ser testadas previamente através da utilização de placas de ensaio e plataformas de desenvolvimento que possuam os componentes em questão. Dessa forma, exclui-se a possibilidade de falha no projeto da PCB durante a análise de funcionamento conjunto dos componentes escolhidos.

### 4.3.3 Componentes

Uma vez elaborada a arquitetura da parte eletrônica, os componentes a serem empregados para compor cada um dos módulos do dispositivo foram definidos baseados nos requisitos do projeto.

Os componentes descritos nesta Subseção são tratados de forma genérica, uma vez que o objetivo deste trabalho é detalhar o desenvolvimento das PCBs do dispositivo de monitoramento microssísmico e não cada um dos CIs e componentes eletrônicos presentes em cada uma delas.

#### 4.3.3.1 Módulo de aquisição de eventos microssísmicos

O módulo de aquisição de eventos microssísmicos deve ser composto por componentes que identifiquem e meçam as vibrações do solo nos três eixos cartesianos, enviando as medições num formato que possa ser entendido pelo microcontrolador que fará o tratamento dessas informações. Dessa forma, o elemento sensor a ser utilizado pelo dispositivo deve ser definido para que os demais componentes deste módulo possam ser escolhidos para adequar o sinal do sensor.

Dentre os elementos sensores normalmente utilizados para detectar vibrações, decidiu-se utilizar geofones próprios para esse tipo de aplicação, com nível de sensibilidade adequado para identificação de atividades microssísmicas, que possuem frequências próximas a zero. Três geofones de alta sensibilidade dispostos nos três eixos cartesianos conseguem identificar a direção e o sentido de propagação dos eventos sísmicos com boa precisão. A [Figura 5](#) ilustra um exemplo de geofones disponíveis no mercado.

Os geofones são sensores analógicos tipicamente construídos a partir de uma massa magnética montada em mola que se move dentro de uma bobina de acordo com a vibração do local onde está instalado, gerando um sinal elétrico proporcional às vibrações do solo ([REYNOLDS, 2011](#)). Por ser um sensor analógico, faz-se necessário converter os valores de tensão gerados pelos geofones para valores digitais que possam ser compreendidos pelo microcontrolador do dispositivo de monitoramento microssísmico.

A PCB referente ao módulo de aquisição deve possuir, portanto, entradas para os sinais dos três geofones que estarão presos ao invólucro nos três eixos cartesianos (vertical,

Figura 5 – Exemplo de geofones



Fonte: [Theremino \(201-\)](#).

longitudinal e transversal), e três conversores de sinal analógico para digital, conhecidos como ADCs (*Analog-to-Digital Converters*), que farão a conversão dos sinais provenientes dos geofones e os enviarão para o microcontrolador do dispositivo a partir de uma porta de entrada/saída na PCB. A [Figura 6](#) ilustra a conversão de um sinal analógico para digital através de um ADC. Todos os componentes necessários para o funcionamento dos ADCs e para a adequação do sinal de tensão dos geofones para valores que não os danifiquem também foram definidos e adicionados à PCB.

Os ADCs definidos para o projeto são específicos para aplicações sísmicas, possuindo alta resolução (31 bits) e contando com módulos de desenvolvimento disponibilizados pelo fabricante, facilitando o teste unitário desses componentes, além de permitir a identificação dos componentes necessários na PCB para o seu correto funcionamento em conjunto com os geofones. Estes ADCs se comunicam com o microcontrolador através de uma interface SPI (*Serial Peripheral Interface* - Interface periférica serial), por isso definiu-se o canal de entrada/saída da PCB do módulo de aquisição de eventos microssísmicos como sendo um canal SPI.

A [Figura 7](#) apresenta o fluxograma dos componentes que constituem o módulo de aquisição de eventos microssísmicos. Os circuitos de suporte ao funcionamento dos ADCs compreendem os cristais osciladores, que fornecem o *clock* aos ADCs, os resistores e capacitores utilizados para filtrar os sinais de entrada e saída dos ADCs e os chips com tensões de referência para os ADCs. Os circuitos de condicionamento de sinal consistem em resistores e capacitores para filtragem dos sinais de saída dos geofones, além de diodos Schottky para proteção dos ADCs contra transientes de tensão e sobrecargas. As entradas dos geofones e o canal SPI consistem em conectores onde é possível ligar os fios dos geofones à PCB e efetuar a ligação entre o módulo de aquisição de eventos microssísmicos e o módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa. O módulo possui um conector de entrada para ligação com o módulo de alimentação, responsável pela energização do módulo.

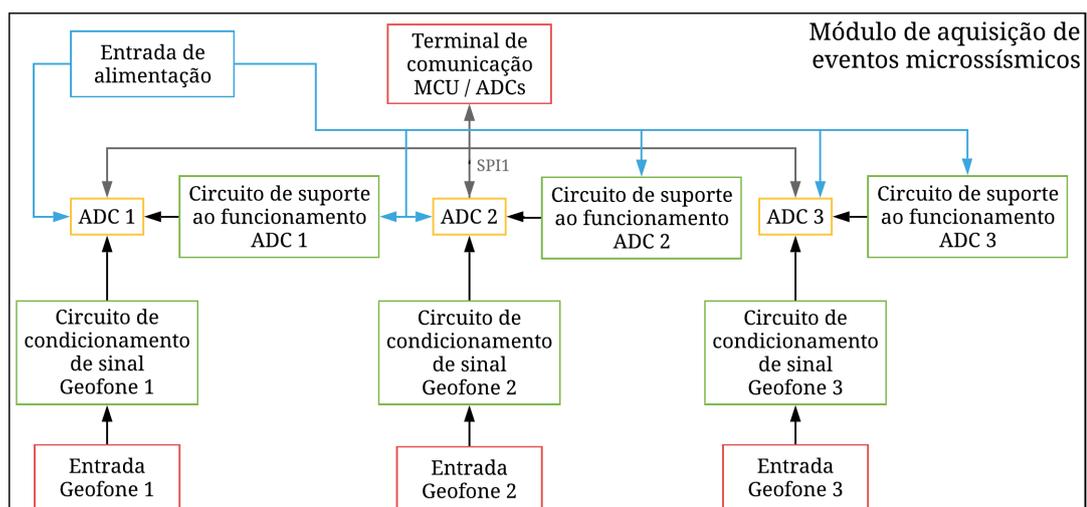
Figura 6 – Conversão de um sinal analógico para digital através de um ADC



Fonte: COMPONENTS 101 (2019).

No fluxograma da Figura 7, um esquema de cores foi adotado para identificar os tipos de componente do módulo: os canais de entrada e saída estão em vermelho; os circuitos de suporte e condicionamento estão em verde; os ADCs estão em amarelo; a entrada de alimentação está em azul. O canal de comunicação SPI entre os ADCs e o microcontrolador (MCU) está destacado em cinza.

Figura 7 – Fluxograma dos componentes do módulo de aquisição de eventos microssísmicos



Fonte: Autor.

#### 4.3.3.2 Módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa

O módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa deve operar como a central de processamento de dados do dispositivo de monitoramento micro sísmico, sendo responsável por comandar o funcionamento dos ADCs do módulo de aquisição de eventos micro sísmicos para receber as medições dos geofones, armazenar as medições localmente em uma memória não-volátil e enviá-las para um computador que fará a análise das medições através da rede LoRa.

Este módulo também deve possuir tecnologia GPS para que o local de instalação do dispositivo possa ser associado às medições, além de contar com tecnologia *Bluetooth* para permitir a parametrização do dispositivo sem a necessidade de plugar cabos ou de uma infraestrutura de laboratório. Exemplos de parametrização seriam o intervalo de envio das medições, a quantidade de amostras coletadas quando um evento for detectado e a sensibilidade do dispositivo.

Levando em consideração todas as funções citadas, o módulo deve possuir um microcontrolador capaz de executar todas as tarefas do dispositivo com um consumo de energia aceitável para a aplicação, um transceptor LoRa, um CI para integração do GPS e uma memória não-volátil.

O microcontrolador definido para o projeto possui tecnologia *Bluetooth*, permitindo a parametrização do dispositivo sem a necessidade de algum periférico extra na PCB, além de contar com dois núcleos de processamento e possuir um sistema operacional de tempo real *open source*, facilitando a programação do dispositivo e a organização das tarefas entre os núcleos de processamento para aumentar a velocidade de execução das aplicações. O microcontrolador é disponibilizado pelo fabricante como um sistema em um chip (do inglês, *System on a Chip* - SoC), facilitando ainda mais a sua aplicação na PCB, uma vez que não necessita de componentes de suporte para seu funcionamento, já que estes se encontram dentro do chip. A [Figura 8](#) apresenta o microcontrolador empregado no dispositivo de monitoramento micro sísmico.

Figura 8 – Microcontrolador do dispositivo de monitoramento micro sísmico



Fonte: [Curvello \(2018\)](#).

Figura 9 – Módulo GPS



Fonte: Lima (2018).

Figura 10 – Módulo LoRa



Fonte: Bauermeister (2018).

Figura 11 – Módulo SD



Fonte: Thomsen (2015).

Quanto aos CIs responsáveis pela comunicação LoRa e GPS, decidiu-se por utilizar módulos prontos desses dispositivos, visto que os módulos disponíveis são de baixo custo e confiáveis. Cada módulo tem sua própria PCB soldada à PCB do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa. Como GPS e LoRa utilizam bandas de alta frequência para se comunicarem, tê-los separados fisicamente da PCB do módulo evita problemas ocasionados por radiofrequência em placas de circuito impresso, diminuindo a complexidade do projeto e mantendo as funcionalidades desejadas. Visto que os módulos já vêm prontos para o uso, não se faz necessário pensar nos componentes de suporte ao funcionamento desses CIs.

A memória não-volátil definida pelo projeto foi o cartão SD, devido a facilidade de leitura deste dispositivo por computadores e sua capacidade de armazenamento elevada. Da mesma forma que os CIs de GPS e LoRa, um módulo pronto de leitura e escrita de cartão SD é utilizado, sendo soldado à PCB do módulo de tratamento. Dessa forma, não se faz necessário adicionar os componentes de suporte ao funcionamento do cartão SD na PCB.

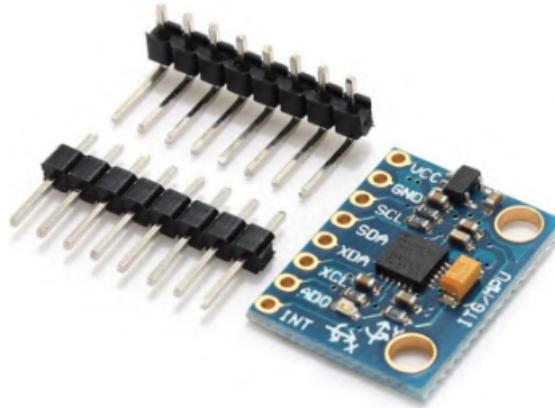
A Figura 9 ilustra um exemplo de módulo GPS disponível no mercado. A Figura 10 mostra um dos diversos tipos de módulos tranceptores LoRa à disposição no comércio. A Figura 11 apresenta um exemplo de módulo pronto de leitura e escrita de cartão SD.

Além da utilização de geofones, julgou-se interessante utilizar um segundo tipo de sensor com características diferentes para dar mais opções de sensibilidade na identificação de eventos microsísmicos ao dispositivo. Por isso, um módulo acelerômetro triaxial digital foi adicionado à PCB do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa, permitindo uma cobertura de frequências mais ampla na análise de vibrações do solo. Por ser um componente digital e vir num módulo pronto, preferiu-se mantê-lo neste módulo ao invés do módulo de aquisição de eventos microsísmicos, já que ele não necessita de ADC ou estar fixado ao invólucro para ser utilizado. Basta soldar o módulo à PCB de forma que ele fique paralelo ao solo para que este funcione corretamente.

No geral, os acelerômetros apresentam uma maior precisão para frequências mais

altas, enquanto que os geofones apresentam maior precisão em frequências mais próximas a zero. Fornecer os dois tipos de sensor ao dispositivo de monitoramento microsísmico confere uma maior flexibilidade na medição de vibrações do solo, permitindo analisar com precisão tanto frequências mais baixas quanto frequências mais elevadas. A [Figura 12](#) ilustra um exemplo de um módulo com acelerômetro digital.

Figura 12 – Exemplo de módulo com acelerômetro digital



Fonte: [Thomsen \(2014\)](#).

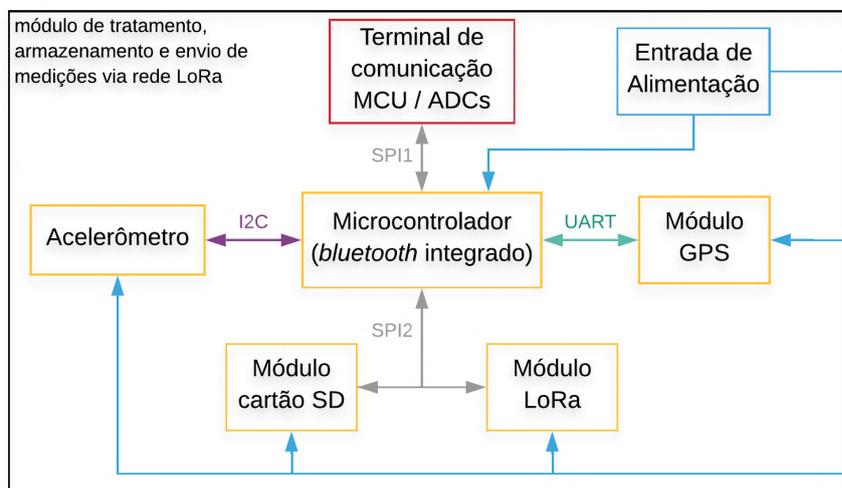
A utilização de módulos prontos facilita os testes unitários, pois o funcionamento de cada um deles pode ser feito separadamente sem a necessidade de montar circuitos inteiros em placas de ensaio. Comprovado o funcionamento de cada módulo, ainda é possível fazer os testes de integração sem que a PCB do projeto seja usada, evitando que alguma falha no projeto da placa influencie nos testes. Se bem sucedidos, os testes de integração devem ser repetidos na PCB pronta, com o intuito de verificar se o projeto da placa não possui nenhum erro.

A [Figura 13](#) ilustra o fluxograma dos componentes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa. Um esquema de cores foi adotado para ilustrar os diferentes componentes desse módulo: o microcontrolador e os periféricos estão em amarelo; o terminal de comunicação entre o microcontrolador e os ADCs está em vermelho; a entrada de alimentação está em azul. As conexões entre os periféricos, o microcontrolador e a alimentação também estão ilustradas num esquema de cores: os canais de comunicação SPI estão em cinza; os canais de comunicação UART em verde; os canais de comunicação I2C em roxo; os canais de alimentação dos componentes em azul.

#### 4.3.3.3 Módulo de alimentação

O módulo de alimentação deve possuir os componentes necessários para converter a tensão das baterias recarregáveis em tensões que possam ser utilizadas na alimentação e

Figura 13 – Fluxograma dos componentes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa



Fonte: Autor.

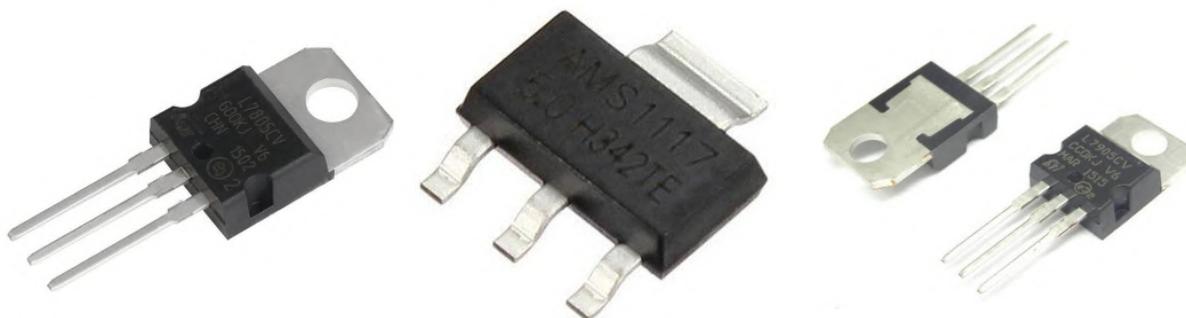
como referências para os componentes dos módulos discutidos nas Subseções anteriores.

Para o sistema de alimentação do dispositivo, a equipe da área de elétrica do projeto definiu o uso de três baterias recarregáveis de 4 V em série para a alimentação dos módulos a serem desenvolvidos. Essas baterias, quando associadas a uma placa fotovoltaica, são capazes de manter o dispositivo funcionando por longos períodos de tempo sem a necessidade de intervenção humana, que só se faz necessária para efetuar a troca de baterias quando estas perderem a capacidade de reter cargas.

Definidos os componentes dos módulos de aquisição de eventos micro sísmicos e de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa, constatou-se que as tensões necessárias para o funcionamento do dispositivo de monitoramento micro sísmico são de +5V, -5V e +3,3V. Dessa forma, a tensão de +12V da bateria deve ser convertida para essas três tensões para que sejam distribuídas entre os módulos do dispositivo.

Três CIs foram definidos para o módulo de alimentação: um conversor de +12V para +5 V, um conversor de +5V para +3,3V e um conversor de +12V para -5V. Além dos CIs, resistores, capacitores e indutores foram definidos para formar os circuitos de suporte dos CIs de acordo com as suas folhas de dados. Um terminal de entrada da tensão da bateria e terminais de saída das tensões convertidas também são aplicados ao módulo para permitir o fluxo de energia das baterias até os módulos de aquisição de eventos micro sísmicos e de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa. A Figura 14 ilustra exemplos de reguladores de tensão com saída em +5V, 3,3V e -5V,

Figura 14 – Reguladores de tensão de 12V para +5V, 3,3V e -5V, respectivamente

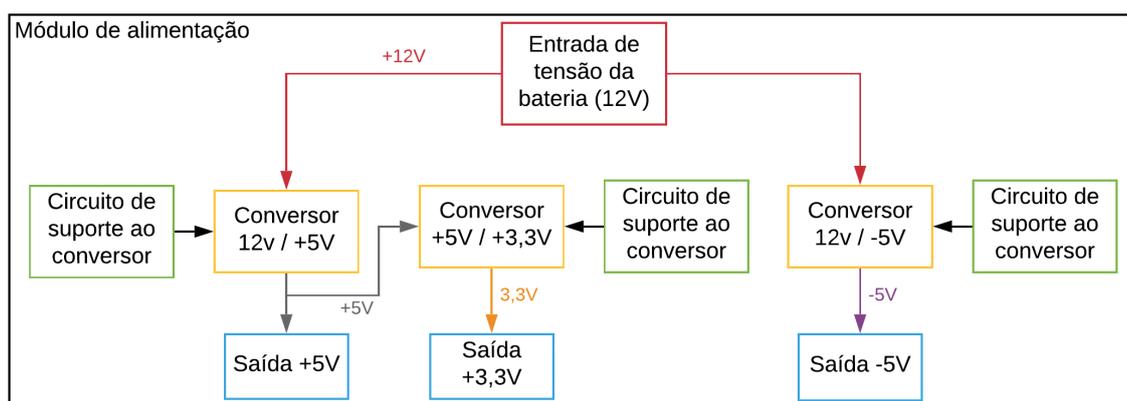


Fontes: [Curto Circuito \(2018b\)](#), [Eletrogate \(2019\)](#), [Curto Circuito \(2018a\)](#).

respectivamente.

A [Figura 15](#) apresenta o fluxograma dos componentes do módulo de alimentação. Assim como nos outros fluxogramas, um padrão de cores foi adotado para denotar os componentes, bem como as tensões de entrada e saída dos CIs. O terminal de entrada da tensão das baterias está em vermelho, os CIs conversores de tensão estão em amarelo, os circuitos de suporte aos conversores em verde e os terminais das tensões convertidas em azul. A tensão de +12V está representada em vermelho, a tensão de +5V em cinza, +3,3V em laranja e -5V em roxo.

Figura 15 – Fluxograma dos componentes do módulo de alimentação



Fonte: Autor.

#### 4.3.4 Testes unitários

Escolhidos os componentes de cada um dos módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico, estes tiveram que passar por testes para verificar o funcionamento individual de cada componente. A intenção dos testes unitários é verificar se os componentes definidos para o produto atendem as suas necessidades (FORSBERG; MOOZ, 1991). Caso atendam, as placas de circuito impresso podem ser construídas baseadas nesses componentes.

A estratégia adotada para os testes unitários foi utilizar plataformas de desenvolvimento prontas que contivessem esses componentes para verificar o funcionamento individual de cada um deles. O uso das plataformas de desenvolvimento diminui o risco de ocorrerem problemas devido à montagem dos circuitos, garantindo uma maior confiabilidade aos testes. Serão descritos a seguir os procedimentos utilizados para testar os componentes de cada um dos módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico.

##### 4.3.4.1 Módulo de aquisição de eventos microssísmicos

Os componentes a serem testados no módulo de aquisição de eventos microssísmicos são os geofones e os ADCs, juntamente com os seus circuitos de suporte. Os testes unitários consistiram em utilizar uma plataforma de desenvolvimento com o ADC definido pelo projeto para verificar a funcionalidade do ADC e do seu circuito de suporte. O geofone foi testado através da aquisição dos seus sinais de saída pelo ADC, de forma que fosse possível averiguar a sua sensibilidade a uma fonte sísmica.

A Figura 16 apresenta a plataforma de desenvolvimento com o ADC escolhido para projeto. O fabricante desta plataforma disponibiliza um *software* que permite configurar e acessar as leituras do ADC sem a necessidade de fazer qualquer tipo de programação. Portanto, o teste do ADC consistiu em ligar as entradas da placa de desenvolvimento em valores de tensão conhecidos e verificar se as leituras do ADC correspondiam aos valores de entrada a partir do *software* disponibilizado pelo fabricante. Uma fonte de tensão de bancada foi utilizada para controlar a tensão nas entradas do ADC.

A partir dos testes efetuados verificou-se que tanto o ADC quanto seu circuito de suporte funcionam como esperado e atendem aos critérios do projeto. Dessa maneira, os componentes citados podem ser utilizados para o projeto da PCB do módulo de aquisição de eventos microssísmicos.

O teste do geofone foi feito através da sua ligação com a plataforma de desenvolvimento do ADC e a verificação das medições coletadas através do *software* disponibilizado pelo fabricante da plataforma. Para efetuar a ligação, o circuito de suporte do geofone foi montado em uma placa de ensaio, de forma que a saída do circuito de suporte foi conectada à entrada do ADC. Tal circuito de suporte impede que uma sobretensão que

Figura 16 – Plataforma de desenvolvimento do ADC



Fonte: [Farnell \(2019\)](#)

possa danificar o ADC chegue até a plataforma de desenvolvimento.

A [Figura 17](#) mostra a ligação entre o geofone, inserido dentro de um invólucro vermelho, seu circuito suporte alocado na placa de ensaio e a placa de desenvolvimento do ADC, na parte superior da foto.

A partir do teste unitário foi possível verificar o funcionamento do geofone. Os geofones adquiridos são calibrados pelo fabricante antes de serem enviados e possuem alta sensibilidade, por isso os testes efetuados não avaliaram a questão de precisão do elemento sensor, apenas o seu funcionamento perante a uma fonte de vibração. Concluiu-se que os geofones escolhidos na etapa de componentes são viáveis para o desenvolvimento do dispositivo de monitoramento microsísmico, por apresentarem boa resposta à vibrações e correto funcionamento com o ADC escolhido para o produto.

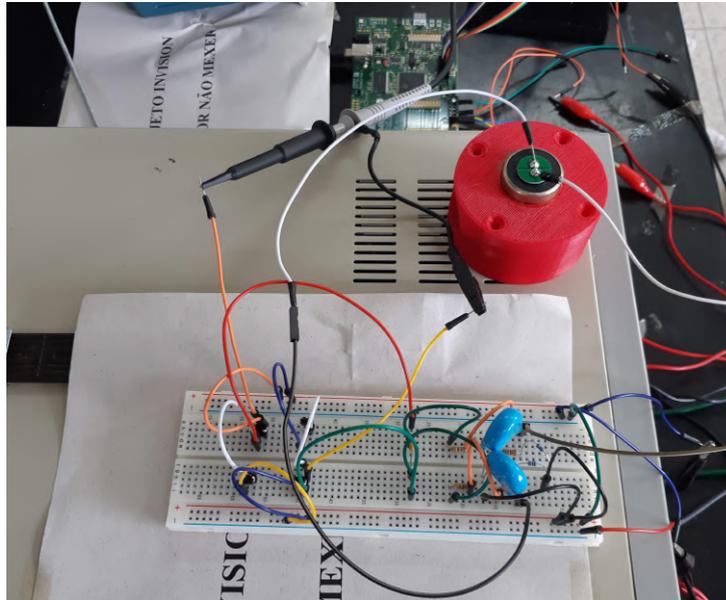
#### 4.3.4.2 Módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa

Os testes unitários dos componentes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa consistiram em utilizar cada um dos periféricos prontos individualmente para verificar o funcionamento de cada um.

Como todos os periféricos precisam ser comandados via código para funcionarem, um microcontrolador foi utilizado para enviar os comandos e receber informações dos periféricos. Algoritmos baseados em exemplos de códigos para os periféricos foram utilizados pela equipe de computação para estabelecer a comunicação entre os dispositivos, de forma a minimizar problemas de software durante os testes.

O teste do módulo de cartão SD consistiu em estabelecer uma comunicação SPI com o microcontrolador e testar a criação de um diretório, a criação de um arquivo, a escrita em um arquivo, a eliminação de um arquivo e a eliminação de um diretório. A partir

Figura 17 – Circuito de ligação do geofone, seu circuito de suporte e a placa de desenvolvimento do ADC



Fonte: Autor.

deste teste foi possível atestar o funcionamento do módulo de cartão SD escolhido pelo projeto para a escrita e eliminação de dados dentro do tempo estipulado para a execução dessas funções.

A [Figura 18](#) apresenta o esquema de ligação entre o MCU e o módulo do cartão SD. O canal de saída de dados do MCU e de entrada no módulo é chamado de MOSI (*Master Output Slave Input*), o canal de entrada de dados no MCU e saída do módulo é denominado MISO (*Master Input Slave Output*). O canal de envio de clock serial do MCU para o módulo é chamado de SCLK (*Serial Clock*) e o canal de seleção do módulo no barramento SPI pelo MCU é chamado de CS (*Chip Select*).

Figura 18 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo de cartão SD



Fonte: Autor.

O teste aplicado ao módulo transceptor LoRa também consistiu em estabelecer

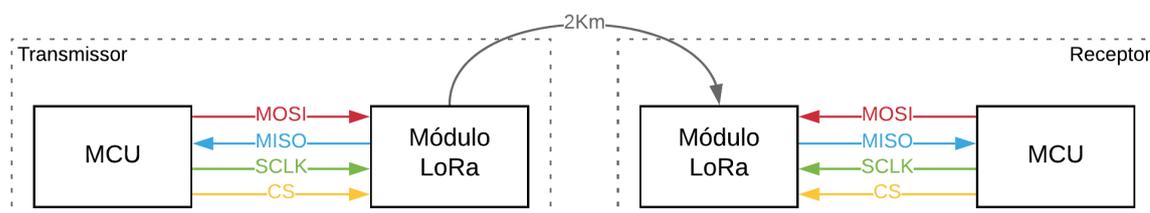
uma comunicação SPI com o MCU, além de fazer a transmissão e o recebimento de pacotes de dados via rede LoRa com o tamanho específico a ser utilizado pelo dispositivo de monitoramento microssísmico. Para isso, dois microcontroladores ligados a dois módulos LoRa foram utilizados, de forma que um módulo trabalhasse como transmissor e o outro operasse como receptor.

Uma distância de 2 quilômetros foi aplicada entre os módulos transmissor e receptor para verificar se a comunicação seria feita sem comprometer a integridade dos pacotes de dados e sem perdas de pacotes. O teste foi feito em campo aberto e plano, sem obstáculos que pudessem bloquear o sinal entre os dois dispositivos.

A partir desse teste, verificou-se que o módulo LoRa escolhido na etapa de componentes é adequado para o dispositivo de monitoramento microssísmico, podendo enviar e receber pacotes via rede LoRa sem comprometer os dados transmitidos dentro da área de cobertura especificada pelo projeto.

A Figura 19 mostra o fluxograma de ligação entre os módulos transmissor e receptor utilizados nos testes, bem como as ligações entre os MCUs e os módulos transceptores LoRa.

Figura 19 – Fluxograma de ligação entre os módulos transmissor e receptor via rede LoRa



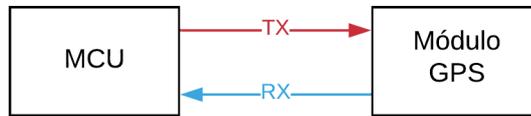
Fonte: Autor.

O módulo GPS definido na etapa de componentes foi testado fazendo-se uma comunicação UART com o MCU e verificando a precisão das coordenadas geográficas recebidas. A Figura 20 ilustra o fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo GPS. O canal de transmissão de dados do MCU para o módulo GPS é chamado de TX, enquanto que o canal de recepção de dados do módulo GPS pelo MCU é denominado RX.

Os testes indicaram uma precisão do módulo GPS adequada para o projeto e o seu funcionamento ocorreu como esperado, sendo necessário aguardar o módulo obter as informações do satélite para começar a enviar as coordenadas ao microcontrolador. Logo, a utilização do módulo GPS definido pelo projeto é viável.

O teste do módulo do acelerômetro consistiu em estabelecer uma comunicação I2C

Figura 20 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo GPS



Fonte: Autor.

(*Inter-Integrated Circuit* - Circuito Integrado) entre este e o MCU, bem como coletar as medições do acelerômetro para verificar seu funcionamento.

A [Figura 21](#) mostra o fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo do acelerômetro. O canal SCL é responsável pelo envio do clock do MCU para o acelerômetro, enquanto que o canal SDA é responsável pela transmissão de dados entre os dois dispositivos.

Figura 21 – Fluxograma de ligação entre o MCU e o módulo do acelerômetro



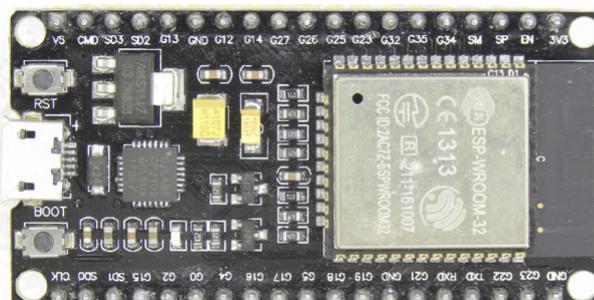
Fonte: Autor.

A partir dos testes foi constatado que o módulo do acelerômetro definido pelo projeto atende às necessidades do produto a ser desenvolvido. Apesar de sua precisão ser inferior a do geofone, o módulo confere maior versatilidade na medição dos eventos microsísmicos e possui uma taxa de amostragem compatível com a aplicação. Maiores detalhes quanto ao desempenho dos sensores serão abordados no [Capítulo 5](#).

Uma vez que todos os periféricos necessitaram de um microcontrolador para que pudessem ser testados, os testes unitários do microcontrolador definido pelo projeto consistiram em utilizá-lo para controlar cada um dos componentes individualmente, validando assim o seu uso pelo projeto como uma central de controle dos demais periféricos. Assim como os demais periféricos, o MCU também foi utilizado em uma plataforma de desenvolvimento pronta, como ilustra a [Figura 22](#).

Além disso, a função de *Bluetooth* do MCU foi testada para verificar se a conexão entre o dispositivo e um celular, por exemplo, ocorreria de forma correta. Para isso, um código exemplo do microcontrolador foi utilizado para acessar essa funcionalidade. A

Figura 22 – Plataforma de desenvolvimento do MCU



Fonte: Murta (2018)

equipe de computação desenvolveu um aplicativo para acessar o MCU via *Bluetooth* e fazer a sua parametrização. Os testes comprovaram o funcionamento adequado dessa função. A Figura 23 demonstra uma versão inicial do aplicativo desenvolvido pela equipe de computação do projeto.

Figura 23 – Aplicativo de parametrização do dispositivo de monitoramento micro sísmico via *Bluetooth*



Fonte: Autor.

Os testes unitários comprovaram a viabilidade de todos os componentes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa. Logo, a arquitetura da PCB desse módulo utilizará tais componentes como referência para sua confecção.

#### 4.3.4.3 Módulo de alimentação

Com o intuito de verificar o funcionamento de cada um dos reguladores de tensão designados pelo projeto, três plataformas de desenvolvimento foram adquiridas, cada uma

delas contendo um dos reguladores a serem testados.

Os testes consistiram em energizar as plataformas de desenvolvimento e ligá-las a uma carga de valor conhecido para observar por meio de um osciloscópio a tensão de saída dos reguladores, além de verificar a corrente fornecida por eles através de um multímetro. A partir desses testes, verificou-se que os três reguladores possuem uma saída de tensão estável e fornecem corrente suficiente para alimentar os circuitos dos demais módulos do dispositivo. Portanto, os testes unitários dos reguladores de tensão de 12V para -5V, 3,3V e +5V foram bem sucedidos.

Uma vez que tanto os reguladores de tensão escolhidos quanto seus circuitos de suporte, também presentes nas plataformas de desenvolvimento, foram verificados através dos testes unitários, a arquitetura da PCB referente ao módulo de alimentação leva em conta todos esses componentes na sua confecção.

A [Figura 24](#) apresenta exemplos de plataformas de desenvolvimento com reguladores de tensão de 12V para +5V, 3,3V e -5V, respectivamente.

### 4.3.5 Testes de integração

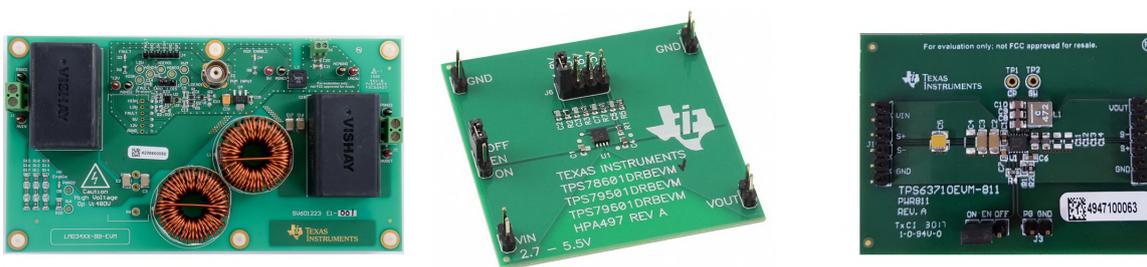
Durante os testes unitários, todos os componentes escolhidos para compor o dispositivo de monitoramento microssísmico tiveram o funcionamento devidamente testado, comprovando o desempenho individual de cada um. A etapa de testes de integração, por sua vez, visa testar os componentes operando em conjunto para verificar se os sistemas funcionam de acordo com o esperado. Dessa forma, a arquitetura do projeto é validada caso os sistemas atuem conforme planejado.

Para testar o funcionamento dos componentes operando em conjunto, as placas de circuito impresso dos três módulos do dispositivo foram elaboradas e construídas, permitindo que os componentes fossem integrados a partir da soldagem dos mesmos às PCBs. Caso os testes de integração falhem, é necessário retornar à etapa de arquitetura para repensar o *design* do dispositivo.

Devido ao fato do dispositivo de monitoramento microssísmico possuir uma arquitetura modularizada, os testes de integração são divididos em duas partes: os testes de integração de cada módulo e o teste de integração entre os três módulos. Assim, verifica-se tanto a arquitetura de cada módulo quanto a arquitetura do dispositivo como um todo.

Nesta Subseção será descrita a elaboração de cada uma das PCBs dos módulos do dispositivo, bem como os testes de integração feitos em cada módulo e entre os módulos.

Figura 24 – Plataformas de desenvolvimento dos reguladores de tensão de 12V para +5V, 3,3V e -5V, respectivamente



Fontes: [Texas Instruments \(2017a\)](#), [Texas Instruments \(2016\)](#), [Texas Instruments \(2017b\)](#).

#### 4.3.5.1 Elaboração das PCBs dos módulos do dispositivo

Uma placa de circuito impresso nada mais é que uma placa ou cartão que conecta eletricamente e suporta mecanicamente componentes elétricos. Tais conexões são feitas através de uma série de faixas ou traços condutores, normalmente de cobre, laminados sobre ou entre folhas de um material não condutor, como fibra de vidro ou resina epóxi curada, por exemplo. Esta tecnologia ganhou popularidade na década de 80, devido à maior velocidade de produção e menor custo de fabricação de circuitos eletrônicos confeccionados a partir desta técnica, quando comparado à técnica de fiação a partir da enrolação de fios sem o uso de solda ([HYMEL, 2018a](#)).

Atualmente, a maioria das PCBs são elaboradas a partir de algum programa CAD que possua ferramentas que auxiliem no processo de *design* das placas. Dentre os diversos programas CAD disponíveis para a confecção de PCBs, o KiCAD é uma plataforma gratuita que contém uma coleção de programas que trabalham em conjunto para ajudar no desenvolvimento do projeto de PCBs. Por ser uma ferramenta gratuita e de grande popularidade, com muitas informações sobre seu funcionamento disponíveis em fóruns e vídeos na Internet, decidiu-se por adotar esta plataforma para a elaboração das PCBs do dispositivo a ser desenvolvido.

A primeira etapa para a confecção de uma PCB consiste no projeto do circuito. Em outras palavras, é necessário inserir no programa todos os componentes da placa, além de evidenciar as ligações entre os componentes. Uma vez que a arquitetura dos módulos já havia sido decidida na etapa de arquitetura, esta foi desenhada no *software* de captura de esquemáticos do KiCAD, conhecido como eeschema.

Caso algum símbolo de componente não esteja disponível na biblioteca do eeschema, pode-se criá-lo a partir da ferramenta de edição de bibliotecas do KiCAD ou procurar um símbolo pronto na Internet, como na [Ultra Librarian \(2017\)](#). Os apêndices A, B e C ilustram os esquemáticos dos módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico.

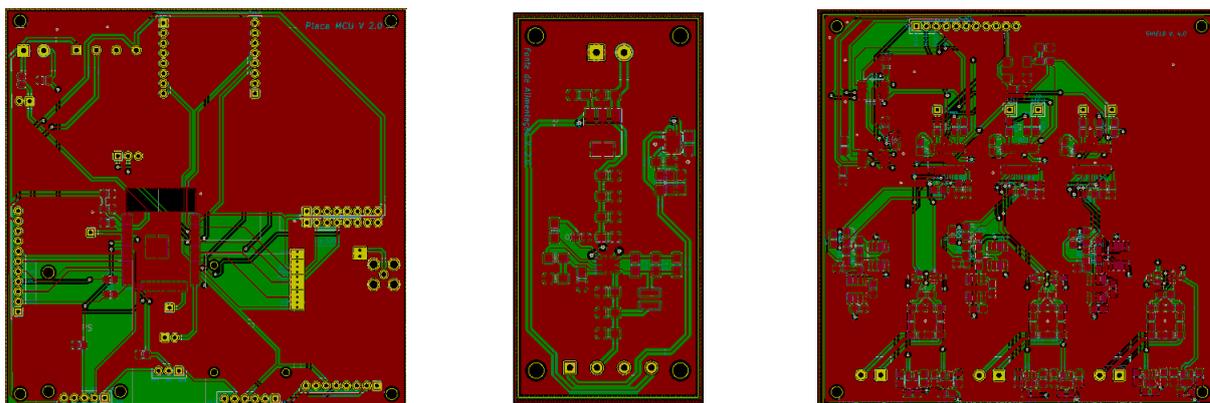
A segunda etapa do processo de confecção da PCB baseia-se na associação de *footprints* aos símbolos dos componentes desenhados. *Footprint* é o termo utilizado para descrever a configuração dos furos e das áreas da placa onde a solda é necessária para integrar mecânica e eletricamente o componente à placa. Essas áreas de solda são chamadas de *pads* (HYMEL, 2018a). A partir da associação dos *footprints* aos símbolos dos componentes, o *software* CAD consegue reproduzir os formatos dos furos e *pads* de cada componente e estabelecer as ligações entre os *pads* e furos da PCB.

Novamente, caso um *footprint* não esteja disponível na biblioteca nativa do eeschema, pode-se desenhá-lo no editor de *footprints* do KiCAD ou procurá-lo na Internet. Assim que todos os componentes estejam associados aos seus *footprints*, cria-se a *netlist*, que é um documento de texto que informa quais pinos estão conectados eletricamente a outros pinos no circuito (HYMEL, 2018a).

A terceira etapa para a criação da PCB consiste em utilizar o programa pcbnew do KiCAD para desenhar a placa. Primeiramente, deve-se estabelecer as regras de desenho da PCB de forma que seja possível a sua fabricação, já que as máquinas utilizadas na confecção das placas possuem requisitos de distância mínima entre furos e *pads*, espessura mínima das trilhas de cobre e dos furos e vias da placa etc. Portanto, deve-se procurar no site do fabricante da placa os requisitos mínimos necessários para que as PCBs possam ser produzidas corretamente e inserir esses requisitos nas regras de *design* do pcbnew (HYMEL, 2018b).

Com as regras de *design* estabelecidas, importa-se a *netlist* criada no eeschema para o pcbnew. Dessa maneira, todos os *footprints* dos componentes, bem como as suas ligações elétricas, aparecerão no programa. A partir daí, o desenvolvedor deverá organizar o local de cada componente na placa, observando as distâncias entre os componentes e a posição deles na placa. O desenvolvedor também especifica o tamanho da placa, desenhando as linhas de contorno que deverão estabelecer as bordas da PCB. Com os componentes devidamente posicionados, as trilhas de cobre devem ser desenhadas para efetuar as ligações elétricas entre os componentes (HYMEL, 2018b).

É importante destacar que existem algumas boas práticas que devem ser observadas durante o desenho das trilhas de cobre. Por exemplo, deve-se evitar fazer ângulos de 90° numa trilha que carrega sinais de alta frequência, pois a sua largura aumenta em ângulos retos, alterando a capacitância e indutância distribuídas na trilha e, conseqüentemente, causando reflexão de sinal. Também é aconselhável manter uma distância entre as trilhas para evitar ruídos. Quanto mais curtas forem as trilhas, menor o risco da PCB sofrer com problemas de ruídos que possam distorcer os sinais que transitam nessas vias. Como duas trilhas distintas não podem se cruzar, normalmente são feitas vias em placas de duas faces, de forma que a trilha possa percorrer a parte de baixo da PCB, evitando o cruzamento de trilhas. Nesses casos, é desejável que as trilhas da parte de baixo e de cima da PCB

Figura 25 – *Layouts* das PCBs dos módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico

Fonte: Autor.

estejam perpendiculares entre si, de forma que os campos eletromagnéticos gerados pelas trilhas se anulem (HYMEL, 2018b).

Com as trilhas entre os componentes desenhadas, delimita-se as áreas da placa que servirão como o terra da PCB. Essas áreas são cobertas por cobre e devem possuir a maior extensão possível, sem que muitas obstruções recortem essa área. Isto é importante para que o terra consiga reduzir ao máximo os efeitos de ruídos eletromagnéticos na PCB. A Figura 25 mostra os *layouts* dos módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico.

Com o layout da PCB finalizado, geram-se os arquivos necessários para que o fabricante possa produzir as placas na aba *plot* do pcbnew (HYMEL, 2018c). Os arquivos gerados podem ser visualizados por uma ferramenta do KiCAD, de forma que é possível checar se não há erros no desenho da PCB antes de enviá-los ao fabricante.

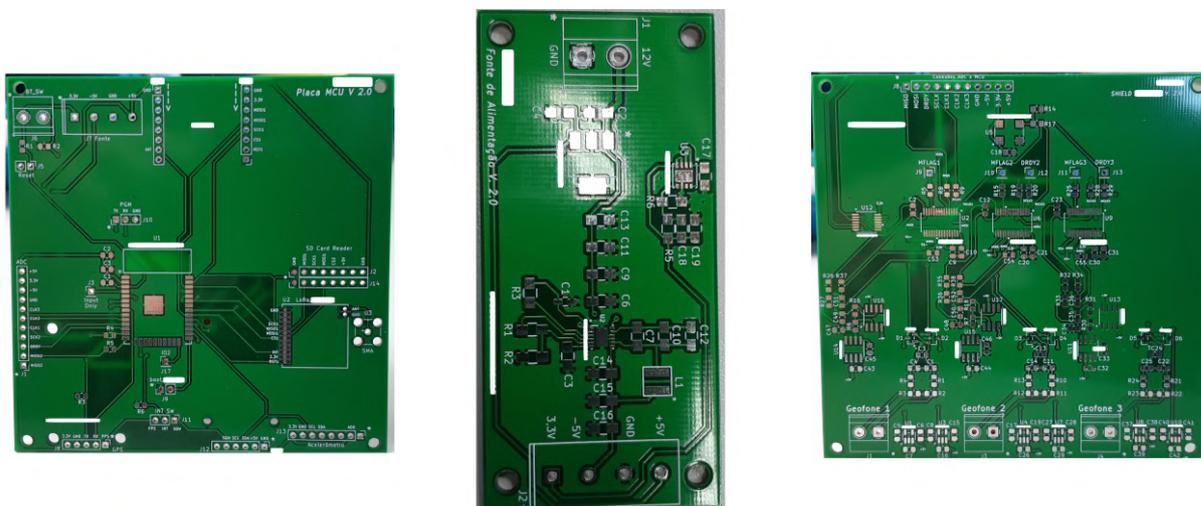
A Figura 26 mostra as PCBs dos três módulos do dispositivo de monitoramento microssísmico fabricadas. Boa parte das empresas dá a opção de efetuar a soldagem dos componentes para que a PCB já chegue pronta para o uso, porém, devido a questões orçamentárias, optou-se por fazer a soldagem dos componentes no PICG.

Os componentes foram soldados nas PCBs utilizando-se um forno elétrico de soldagem. A Figura 27 ilustra as PCBs dos três módulos devidamente soldados. Após efetuar a soldagem, testes de continuidade foram executados através de um multímetro para verificar se as conexões elétricas entre os componentes estavam corretas. Constatada a correta soldagem dos componentes, as PCBs estão prontas para serem utilizadas nos testes de integração.

#### 4.3.5.2 Teste de integração individual dos módulos do dispositivo

Após a soldagem dos componentes, cada módulo foi testado individualmente para verificar o correto funcionamento dos circuito das PCBs. Através desses testes foi possível

Figura 26 – PCBs dos módulos que compõem o dispositivo de monitoramento microssísmico



Fonte: Autor.

verificar se os componentes de cada módulo interagem corretamente entre si e se o *design* das placas estava correto, com todas as trilhas e vias devidamente posicionadas.

No módulo de alimentação, o teste de integração individual deu-se a partir da ligação da entrada da PCB a uma fonte de bancada ajustada em 12V e a medição de tensão dos terminais de saída da placa a partir de um multímetro. Nenhuma carga foi acoplada na saída do módulo, pois os testes com carga já haviam sido feitos com cada CI nos testes unitários, comprovando a capacidades dos CIs em alimentar todos os componentes do dispositivo de monitoramento. A partir deste teste, verificou-se que todos os CIs estavam funcionando corretamente, gerando as tensões de +5V, 3,3v e -5V. Dessa forma, validou-se a arquitetura do módulo de alimentação.

O teste de integração individual do módulo de aquisição de eventos microssísmicos consistiu em ligar os geofones nas entradas da PCB e as suas saídas numa placa de desenvolvimento com o MCU a ser utilizado pelo projeto. Um algoritmo foi desenvolvido pela equipe de computação do projeto para estabelecer uma comunicação SPI entre o MCU e os ADCs e coletar as medições dos geofones. Assim, seria possível verificar se os três ADCs funcionariam corretamente em conjunto na PCB.

Um erro no canal de comunicação SPI da PCB dos ADCs foi constatado durante os testes de integração, sendo necessário fazer uma adaptação na placa para que esta funcionasse corretamente, como é possível ver na [Figura 27](#). Os sinais de MOSI estavam chegando aos três ADCs ao mesmo tempo, confundindo os dispositivos, que tentavam enviar as informações ao mesmo tempo para o MCU. Através de um CI comutador analógico bidirecional, foi possível chavear os sinais do MCU para os ADCs de forma que apenas um dispositivo recebesse o sinal por vez.

Figura 27 – PCBs dos módulos que compõem o dispositivo de monitoramento microssísmico soldados



Fonte: Autor.

Devido aos custos envolvidos na fabricação de PCBs, decidiu-se por seguir o desenvolvimento do projeto utilizando-se a placa adaptada. Porém, o módulo de aquisição de eventos microssísmicos foi remodelado de forma a corrigir os problemas detectados, podendo ser fabricado quando necessário. Já que o circuito do módulo remodelado é exatamente igual ao módulo junto com a placa adaptadora, não se faz necessário refazer o teste de integração individual, uma vez que é um circuito já validado.

Após a adaptação do módulo de aquisição de eventos microssísmicos, os circuitos dos ADCs funcionaram corretamente, estabelecendo uma comunicação SPI com o MCU, sendo devidamente configurados e enviando as medições dos geofones de acordo com as requisições do microcontrolador. Portanto, a arquitetura do módulo remodelado foi validada.

O módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa foi testado a partir de um algoritmo desenvolvido pela equipe de computação do projeto, de forma que o MCU estabelecesse comunicação com cada um dos periféricos e executasse suas funções básicas. Dessa forma, tanto o MCU quanto os periféricos da PCB seriam testados, validando a integração entre os componentes.

Os testes do módulo foram bem sucedidos, com todos os componentes trabalhando em conjunto de forma esperada. Logo, a arquitetura do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via rede LoRa foi validada.

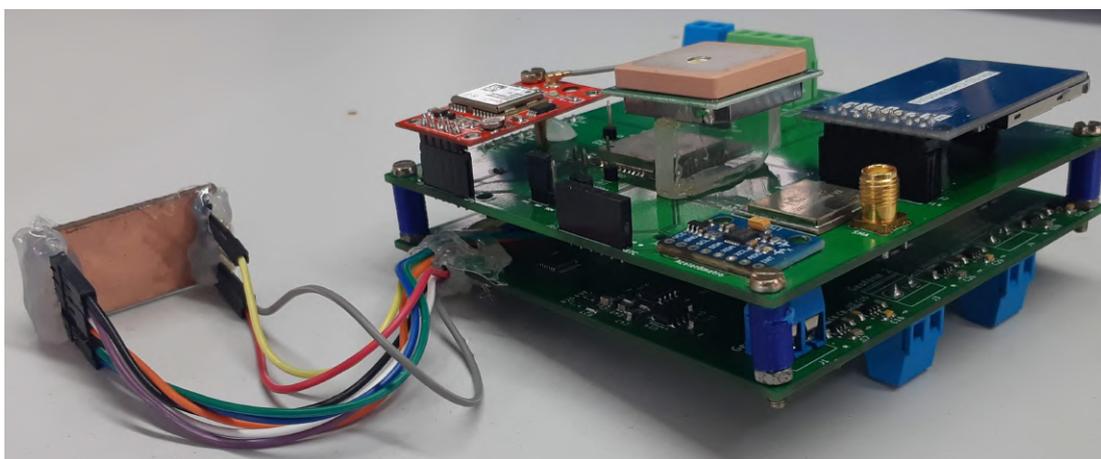
#### 4.3.5.3 Teste de integração entre os módulos do dispositivo

Validadas as arquiteturas de cada módulo individualmente, um teste envolvendo todos os módulos trabalhando em conjunto foi executado com a intenção de validar a arquitetura do dispositivo de monitoramento microssísmico como um todo. Apesar de utilizar o dispositivo completo, o teste de integração se diferencia do teste de aceitação por não considerar o funcionamento do produto na sua área de interesse, focando apenas em checar o funcionamento dos componentes quando integrados.

O teste de integração entre os módulos consistiu em juntar o algoritmo desenvolvido para os testes do módulo de tratamento, armazenamento e envio de medições via LoRa com o algoritmo do módulo de aquisição de eventos micro sísmicos, permitindo ao MCU acessar todos os periféricos do dispositivo, além de utilizar o módulo de alimentação para fornecer energia aos módulos do dispositivo. A entrada do módulo de alimentação foi conectada a uma fonte de bancada ajustada para 12V, ao invés de utilizar as baterias recarregáveis, visto que a intenção do teste era verificar apenas o funcionamento da parte eletrônica do projeto.

Os testes basearam-se no acesso do MCU a cada um dos periféricos do dispositivo e a execução das suas funções básicas para verificar se todos os componentes funcionariam em conjunto. A Figura 28 ilustra os módulos de aquisição de eventos micro sísmicos e de tratamento, armazenamento e envio de medições via LoRa integrados. Os dois módulos se encaixam, de forma que a conexão entre as PCBs seja segura e o volume ocupado no envólucro do dispositivo seja reduzido.

Figura 28 – Módulos de aquisição e de tratamento, armazenamento e envio de medições sísmicas via LoRa integrados

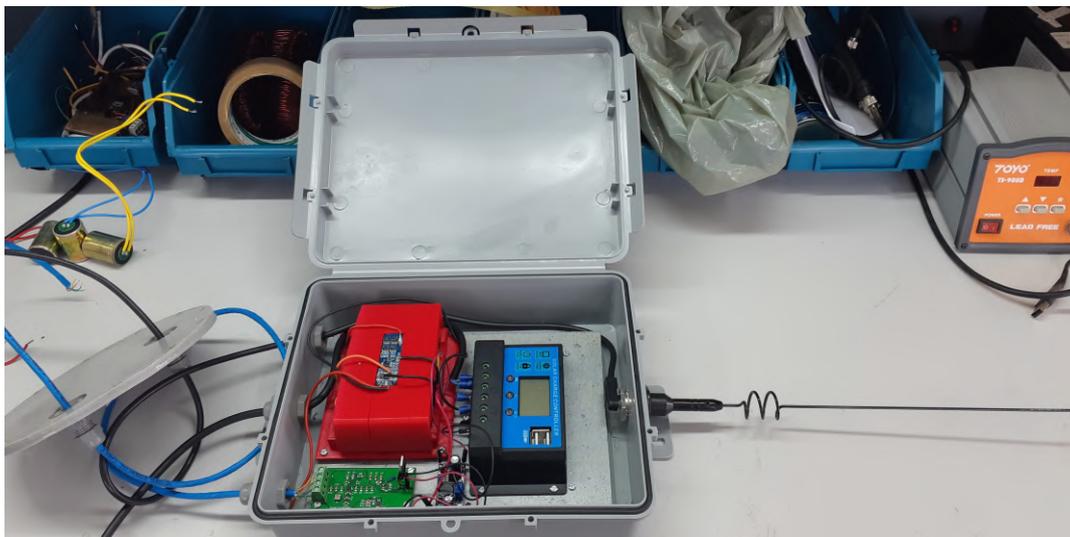


Fonte: Autor.

O módulo de alimentação é conectado aos outros módulos através de fios, pois este se localiza no quadro de energia do dispositivo, onde ficam as baterias recarregáveis e o controlador de carga. A Figura 29 mostra o quadro de energia com o módulo de alimentação, as baterias recarregáveis e o controlador de cargas das baterias. É no quadro de energia que fica posicionada a antena para a comunicação via LoRa entre os dispositivos e o *gateway* responsável por enviar as medições para um computador via Internet.

A partir dos testes executados, constatou-se que a arquitetura definida para o dispositivo de monitoramento micro sísmico atende às necessidades do projeto, com todos os componentes funcionando em conjunto conforme planejado. Concluídos os testes

Figura 29 – Quadro de energia do dispositivo de monitoramento microssísmico



Fonte: Autor.

unitários e de integração, resta verificar se todos os requisitos do projeto elicitados na fase de requisitos são atendidos pela configuração do dispositivo criado. Tal verificação é feita através dos testes de aceitação, onde o dispositivo é testado em sua área de interesse a fim de checar o funcionamento do mesmo.

#### 4.3.6 Testes de aceitação

Com a arquitetura do dispositivo de monitoramento microssísmico validada, testes de aceitação foram preparados para apurar se todos os requisitos do projeto referentes à eletrônica do dispositivo foram atendidos pelo protótipo desenvolvido. Tais testes devem ser feitos com o dispositivo fixado ao solo, em um local onde seja possível gerar vibrações que sejam detectadas e coletadas pelo dispositivo, de forma que posteriormente essas medições sejam analisadas para averiguar se o comportamento dos sinais adquiridos pelos sensores está de acordo com a fonte de vibrações empregada.

O teste de aceitação consistiu em gerar ondas sísmicas no solo, cuja origem foi aplicada a diferentes distâncias do dispositivo de monitoramento microssísmico, de modo que essas vibrações fossem coletadas pelos sensores do dispositivo, armazenadas num cartão SD e enviadas para um *gateway* via rede LoRa, juntamente com a geolocalização do dispositivo obtida através do módulo GPS.

O dispositivo foi fixado ao solo a partir de um *spike* metálico localizado na base do seu invólucro, permitindo sua fixação e a transmissão das vibrações do solo para os sensores que se localizam dentro do invólucro. As ondas sísmicas foram geradas a partir de

uma marreta em queda livre a uma altura de 1,80 metros do solo, gerando um sinal sísmico com um pico referente ao impacto da marreta no solo e um conseqüente amortecimento pelo solo. Esta técnica é comumente utilizada para efetuar a calibração de dispositivos de monitoramento sísmico. Quanto mais distante do dispositivo estiver a origem do evento sísmico, menor será a amplitude da onda percebida pelo dispositivo de monitoramento, devido ao amortecimento da onda sísmica pelo solo.

Antes de iniciar os testes, o dispositivo de monitoramento microssísmico foi parametrizado a partir de um aplicativo de *smartphone* que se comunica utilizando o protocolo *Bluetooth*. Assim, a sensibilidade dos sensores e os intervalos de aquisição foram ajustados. Pode-se perceber, portanto, que o teste de aceitação aplicado envolveu todas as funcionalidades do dispositivo, o que permitiu checar se os requisitos do projeto foram alcançados. Além das funcionalidades da eletrônica, as funcionalidades das áreas de mecânica, elétrica e computação do dispositivo também foram verificadas, porém não serão tratadas neste trabalho.

A [Figura 30](#) ilustra o dispositivo de monitoramento microssísmico fixado ao solo no local onde foram efetuados os testes de aceitação. As instalações do PICG foram utilizadas para executar tais testes, uma vez que existe uma ampla área disponível para os ensaios com vibrações, além de contar com as ferramentas necessárias para efetuar a análise das medições após a conclusão dos testes.

É importante destacar que nesse tipo de teste, a constituição do solo e possíveis obstruções como bolsões de ar, pedras, água etc, podem influenciar na propagação da onda sísmica pelo solo e, conseqüentemente, afetar o formato de onda sísmica detectado pelo medidor. Porém, nos testes efetuados procurou-se apenas verificar se o medidor era capaz de detectar o evento sísmico e coletar o seu perfil corretamente, adquirindo uma onda sísmica com um pico de amplitude e um amortecimento ao longo do tempo.

Os testes de aceitação também serviram para verificar o funcionamento das configurações de sensibilidade dos geofones e acelerômetro, além de atestar se o dispositivo não estaria sofrendo com falsas detecções de eventos sísmicos. Por meio das vibrações geradas a diferentes distâncias, foi possível ajustar a sensibilidade do dispositivo para que este não ficasse suscetível à falsas detecções de eventos microssísmicos.

Os testes foram feitos com a fonte geradora do evento sísmico afastada a uma distância de 5, 10 e 15 metros de distância do dispositivo de monitoramento microssísmico. A [Figura 31](#) mostra os gráficos de quatro mil amostras adquiridas pelos geofones do dispositivo de monitoramento microssísmico, em unidade de engenharia, com a fonte do evento sísmico a uma distância de 5 metros do dispositivo. Maiores detalhes sobre o desempenho do dispositivo serão abordados no [Capítulo 5](#).

Uma vez que as medições adquiridas pelo dispositivo só são processadas num

Figura 30 – Dispositivo de monitoramento microssísmico fixado ao solo para a realização dos testes de aceitação



Fonte: Autor.

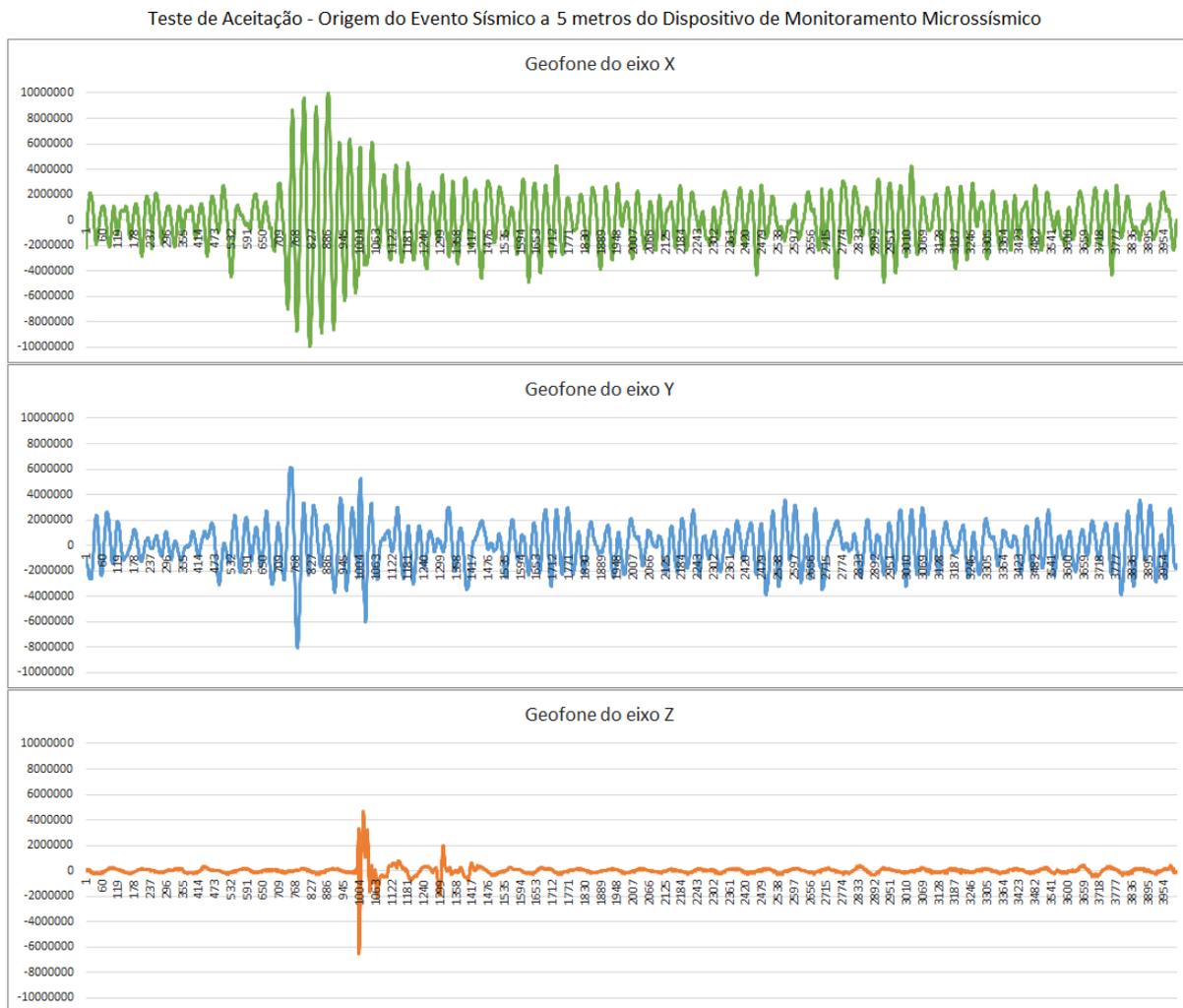
computador, que recebe as informações via Internet, não foi necessário que a equipe de computação fizesse as conversões dos valores dos ADCs para alguma grandeza utilizada para a medição de vibrações no *software* do dispositivo. Porém, o perfil das medições adquiridas condiz com a fonte de vibração empregada, o que atesta o funcionamento do dispositivo na aquisição de eventos microssísmicos.

O dispositivo funcionou conforme esperado durante os testes, detectando os eventos microssísmicos, armazenando-os no cartão de memória e enviando as medições via rede LoRa, juntamente com a sua geolocalização. As medições adquiridas pelo dispositivo são compatíveis com o perfil do evento sísmico gerado, e a alteração dos parâmetros via comunicação *Bluetooth* funcionou corretamente.

Como esperado, as medições obtidas pelos geofones foram muito mais precisas do que as do acelerômetro, tendo em vista que o acelerômetro escolhido possui especificações inferiores aos dos geofones. Entretanto, o desempenho do acelerômetro não foi levado em consideração nos testes, visto que este componente foi incluído apenas como uma segunda opção de transdutor para o dispositivo, podendo ser eliminado do projeto sem afetar o funcionamento do mesmo, ou trocado por um acelerômetro de maior qualidade, caso seja desejado utilizá-lo para efetuar as medições no lugar dos geofones.

Os testes de aceitação foram bem sucedidos, com todos os requisitos referidos na

Figura 31 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones do dispositivo



Fonte: Autor.

Subseção 4.3.1 sendo atendidos pelo protótipo do dispositivo de monitoramento microsísmico. Dessa forma, o protótipo foi validado, sendo compatível com a proposta do projeto de criar uma solução para o monitoramento remoto de barragens e minas.

## 4.4 Operação

A etapa de operação visa detalhar os processos necessários para fornecer o serviço ou para gerar um produto (BERNUS; NEMES, 1996). No caso do dispositivo de monitoramento microsísmico, faz-se necessário detalhar os processos necessários para que este esteja pronto para uso.

Além de confeccionar as PCBs do dispositivo e interligá-las, o módulo de alimentação deve ser conectado a baterias recarregáveis, cuja função é manter o sistema funcionando

remotamente sem a imposição de estar próximo à rede elétrica. As baterias são recarregadas a partir de uma placa fotovoltaica que fica instalada numa torre próxima ao dispositivo. Assim, além de dar suporte à placa fotovoltaica, a torre permite fixar um quadro de energia onde ficam situadas as baterias recarregáveis, o controlador de carga das baterias e o módulo de alimentação. As Figuras 29 e 30 ilustram o quadro de energia e a torre de suporte à placa fotovoltaica.

O módulo de alimentação é ligado as outras PCBs, que ficam dentro do invólucro do dispositivo, através de fios que partem do quadro de energia. Visto que uma rede sem fio de longa distância é utilizada, a antena empregada para tal comunicação é fixada no topo da torre, já que esta se encontra numa altura superior a do invólucro, sendo ligada ao módulo de tratamento, armazenamento e envio de dados por um outro fio.

Antes de efetuar a montagem das PCBs dentro do invólucro, é necessário fazer a programação do MCU. Isto pode ser feito a partir de um terminal de acesso localizado no módulo de tratamento, armazenamento e envio de dados via LoRa. Para que o MCU possa ser programado é preciso que ele seja iniciado em modo de programação. Isso é feito ligando-se um *jumper* ao terminal de *boot* situado na PCB. Após a programação, deve-se reiniciar o módulo com o *jumper* removido do terminal de *boot* para que o MCU inicie em modo de operação.

Para fins de economia de energia e segurança, o acesso ao dispositivo via *Bluetooth* só ocorre após o acionamento de um *reed switch* localizado no interior do invólucro do dispositivo. Assim, o *Bluetooth* fica normalmente desligado, economizando energia até o momento em que alguém o acione através de um ímã capaz de fechar o contato do *reed switch*. Essa medida evita que pessoas nas proximidades do dispositivo tenham acesso indevido aos seus parâmetros.

Por fim, é importante observar se o invólucro foi devidamente lacrado para evitar a entrada de água no interior do dispositivo. Os parafusos da tampa devem ser apertados de forma homogênea e os prensa cabos utilizados devem conter grau de proteção IP 67.

Após programar o MCU, efetuar as ligações entre as PCBs, o quadro de energia e a antena, montar as PCBs dentro do invólucro e lacrá-la, o dispositivo precisa ser configurado na sua primeira inicialização a partir do aplicativo para *smartphones* desenvolvido pela equipe de computação do projeto.

O dispositivo pode operar com duas formas de detecção de eventos: a partir de um valor limiar a partir do qual um evento é constatado e registrado, ou a partir de um algoritmo *anti-triggering* STA/LTA (*Short Time Average over Long Time Average*), o qual é projetado para rejeitar transientes energéticos dos registros de vibração ambiente, baseando-se na comparação da amplitude média de curto prazo (STA) e da média de longo prazo (LTA) dos sinais de vibração (WITHERS et al., 1998). O modo de detecção,

bem como o limiar aplicado ou o tamanho das janelas LTA e STA são configurados via comunicação *Bluetooth* a partir do aplicativo de *smartphone*. Após a configuração, basta fixar o dispositivo ao solo a partir do *spike* localizado na base do invólucro e ele estará pronto para efetuar as medições de eventos microssísmicos.

A primeira rotina do dispositivo consiste em estabelecer a comunicação entre o receptor GPS e o satélite para receber a sua geolocalização. Assim que este processo é concluído, o dispositivo passa a monitorar continuamente os eventos microssísmicos, alocando-os em um cartão SD e enviando-os via rede LoRa, juntamente com as informações referentes ao horário da medição e a geolocalização do dispositivo.

## 4.5 Descomissionamento

A fase de descomissionamento contempla a questão da reciclagem e descarte total ou parcial do produto criado no final de sua vida útil (BERNUS; NEMES, 1996). No caso do dispositivo de monitoramento microssísmico, é importante ponderar sobre o descarte consciente das PCBs do circuito, assim como do invólucro e a torre de alimentação.

Atualmente, a reciclagem de lixo eletrônico vem se tornando uma atividade em expansão, pois permite a recuperação de matérias-primas como o ouro, a prata e o paládio, que são materiais que podem ser reutilizados em outros produtos. Além disso, muitos dos metais encontrados em circuitos eletrônicos são tóxicos, como o mercúrio, níquel, cromo e chumbo, o que torna ainda mais importante a reciclagem desses componentes para que tais materiais não contaminem o meio ambiente (RODRIGUES, 2016).

Neste sentido, todos os componentes eletrônicos do dispositivo de monitoramento microssísmico devem ser enviados à empresas especializadas na reciclagem de lixo eletrônico, de forma que os materiais constituintes desses componentes sejam separados e reaproveitados. Tal atitude evita a contaminação do meio ambiente, além de evitar o desperdício de recursos.

Quanto ao invólucro do dispositivo, este teve que ser feito a partir de poliuretano, pois a utilização de materiais metálicos comprometeriam o funcionamento da comunicação *Bluetooth* entre o *smartphone* e os módulos internos do dispositivo. Por ser um material plástico termofixo, este possui uma reciclagem mais complexa, porém, viável. Pode-se reciclar o poliuretano de forma química, levando o material de volta para os seus componentes químicos, ou de forma mecânica, incorporando-o em outros materiais (CANDIDO, 2016).

Por ser um material prejudicial ao meio ambiente, o invólucro do medidor deve ser reciclado, assim como os componentes eletrônicos do dispositivo. Tanto a torre quanto o *spike* na base do dispositivo são de materiais metálicos e também podem ser reciclados. Desse modo, o dispositivo de monitoramento pode ser descomissionado gerando o mínimo

de impacto ambiental possível.

O descarte das baterias recarregáveis também deve ser feito em local adequado. Os fabricantes que comercializam baterias no Brasil são obrigados a receberem as baterias que foram energeticamente esgotadas, fazendo a destinação ambientalmente adequada destes componentes, enviando-os para uma usina especializada em reciclagem de baterias. Da mesma forma, também é possível efetuar a reciclagem da placa fotovoltaica, recuperando-se os materiais utilizados na sua construção.

Com a reciclagem dos materiais que compõem o dispositivo de monitoramento microssísmico, reduzem-se os problemas ambientais gerados pelo descarte inadequado dos mesmos, além de evitar o desperdício de recursos.

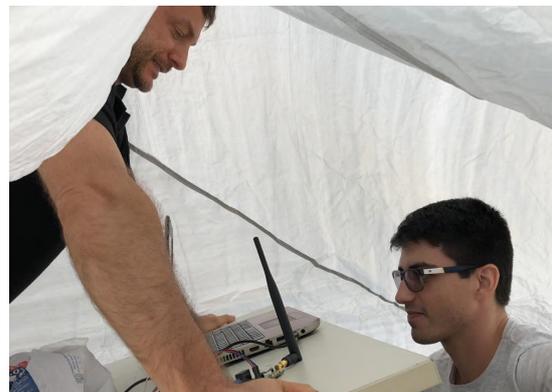
Concluída a etapa de descomissionamento, todas as fases do ciclo de vida P3I foram aplicadas para o desenvolvimento do dispositivo de monitoramento microssísmico, detalhando dessa forma todo o processo de criação deste produto.

## 5 RESULTADOS

Durante a etapa de prototipação, os testes unitários, de integração e de aceitação permitiram verificar o funcionamento de cada componente do dispositivo criado, bem como a interação entre eles e o funcionamento dos protótipos das PCBs como um todo. Os resultados desses testes comprovam a eficácia do dispositivo de monitoramento microsísmico ao que se propõe, servindo como uma solução de monitoramento remoto de áreas de mineração e barragem sem a necessidade de redes cabeadas ou de proximidade com a rede elétrica.

O dispositivo é capaz de se comunicar com o *gateway* a uma distância de pelo menos 2 Km através da rede LoRa sem ter perdas de dados ou distorções nos pacotes recebidos. Os testes de alcance da rede foram feitos à beira mar, na praia de Grussaí, utilizando-se uma torre para manter o *gateway* em um local fixo e movendo o dispositivo de monitoramento de 500 em 500 metros, até chegar aos 2 Km, que é a distância de operação desejada. A [Figura 32](#) ilustra a torre utilizada para fixar o *gateway* e a equipe de desenvolvimento do dispositivo efetuando os testes de comunicação via LoRa na caçamba de uma caminhonete, respectivamente.

Figura 32 – Torre onde o *gateway* da rede foi fixado e a equipe efetuando testes de comunicação via LoRa, respectivamente



Fonte: Autor.

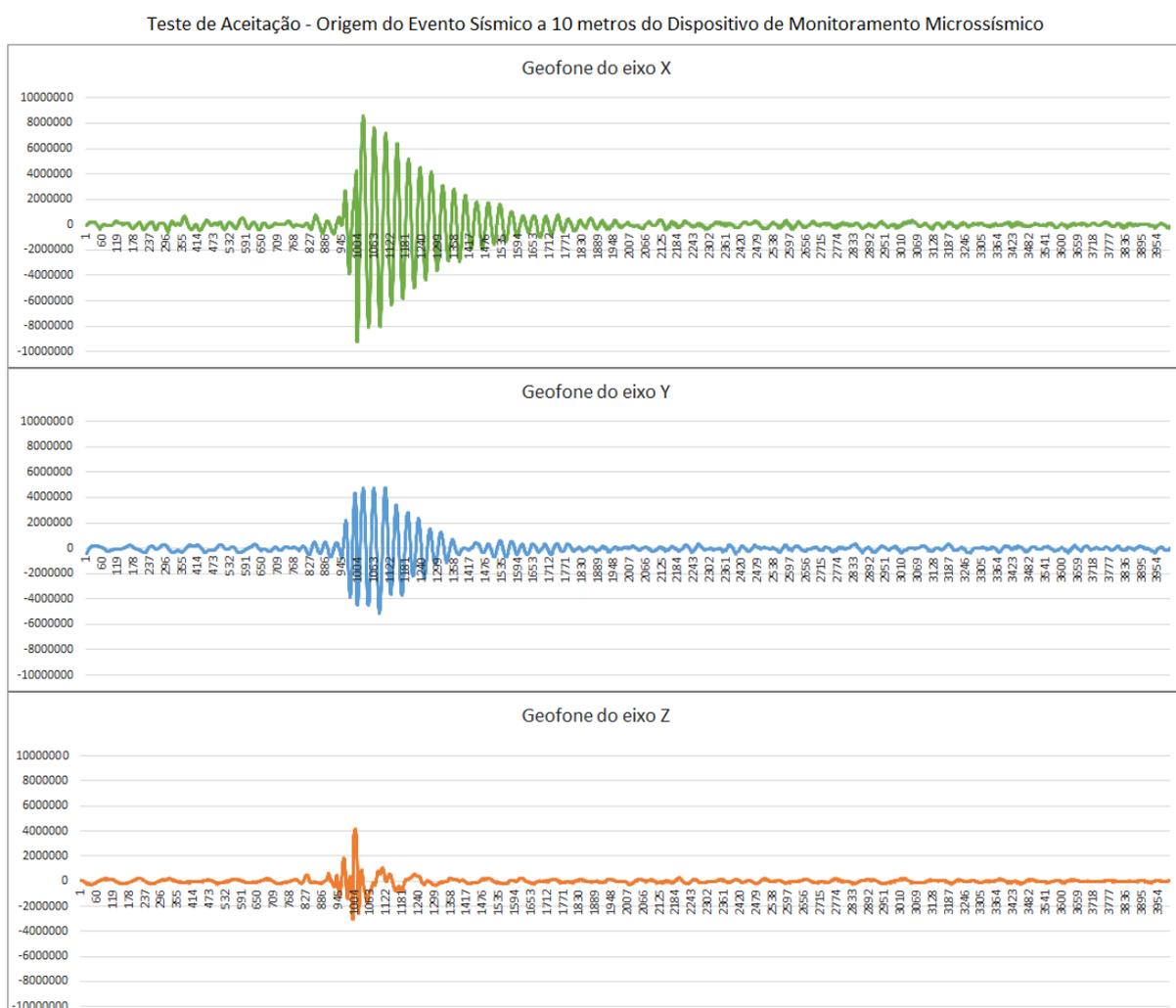
A funcionalidade de armazenamento das medições no cartão SD também opera corretamente, de forma que o dispositivo cria um arquivo e adiciona as medições dos eventos microsísmicos detectados, além do horário em que as medições foram feitas e a geolocalização do dispositivo. Assim, mesmo que a rede apresente algum problema, as medições continuam sendo registradas e podem ser posteriormente obtidas e analisadas.

As [Figuras 33](#) e [34](#) ilustram os gráficos das medições feitas pelo dispositivo de monitoramento microsísmico a partir dos seus três geofones, cada um posicionado em um

eixo cartesiano, com uma fonte sísmica afastada a 10 metros e 15 metros, respectivamente. Esses testes foram aplicados na etapa de testes de aceitação para verificar o funcionamento do dispositivo em sua área de interesse. A fonte sísmica utilizada foi uma marreta lançada em queda livre a uma altura de 1,8 metros, como detalhado na [subseção 4.3.6](#).

Assim como na [Figura 31](#), as Figuras 33 e 34 também descrevem o comportamento da fonte sísmica empregada corretamente, apresentando um pico de amplitude devido ao impacto da marreta no solo e um posterior amortecimento da onda sísmica devido à absorção do impacto pelo solo. Como esperado, o pico de amplitude teve seu tamanho reduzido conforme a fonte sísmica se distanciava do dispositivo.

Figura 33 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones a uma distância de 10 metros da fonte sísmica.

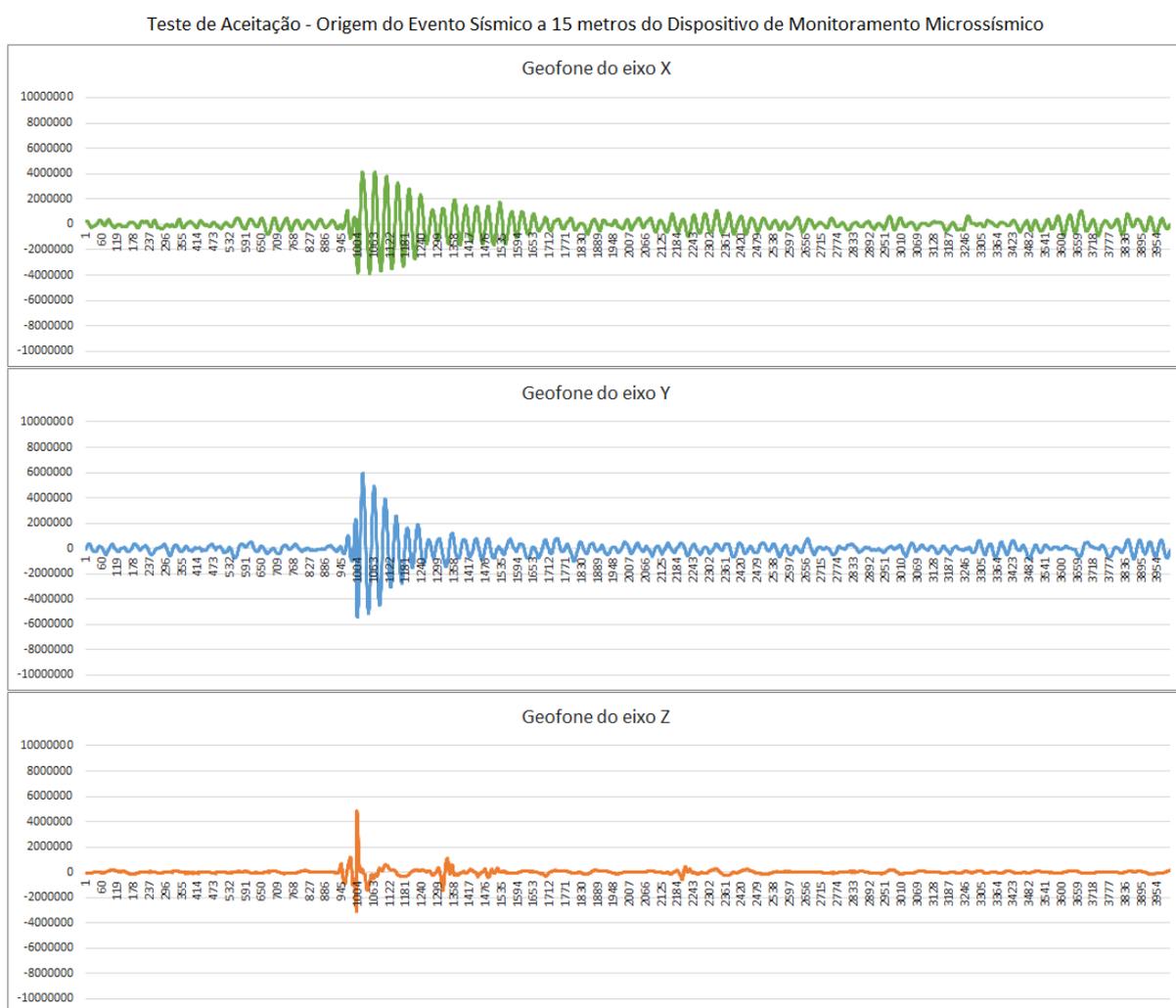


Fonte: Autor.

Quanto ao acelerômetro digital triaxial empregado no protótipo, o seu desempenho ficou abaixo do esperado para o projeto. As medições adquiridas não condiziam com o sinal

sísmico emitido, sendo notada uma grande quantidade de ruído nos sinais medidos. Por ser um sensor secundário, que serviria como uma opção extra para a medição de eventos sísmicos, o projeto continuou descartando-se o uso do acelerômetro, porém, acredita-se que a utilização de um acelerômetro de maior resolução, com características mais adequadas à medição de eventos micro sísmicos, pode tornar esta opção viável. Uma vez que o módulo do acelerômetro é comprado pronto e soldado ao módulo de tratamento, armazenamento e envio de dados via LoRa, tal substituição pode ser feita sem necessidade de reprojetar a PCB.

Figura 34 – Gráficos das medições adquiridas pelos geofones a uma distância de 15 metros da fonte sísmica.



Fonte: Autor.

A parametrização do método de detecção de eventos microsísmicos e ajuste das janelas LTA / STA ou do limiar do evento via *Bluetooth* funciona adequadamente, basta que o usuário utilize um ímã próximo do invólucro do dispositivo para que o *reed switch* feche

contato, fazendo com que o MCU ative a comunicação *Bluetooth*, permitindo o pareamento do dispositivo com o aplicativo de parametrização desenvolvido para *smartphones*.

Com relação à alimentação do dispositivo, a placa fotovoltaica em conjunto com as baterias recarregáveis empregadas conseguiram mantê-lo em operação por todo o período de testes na área externa do PICG, que foi de aproximadamente um mês. Portanto, os testes demonstram que a parte elétrica do dispositivo foi corretamente dimensionada, podendo manter o sistema em funcionamento sem a necessidade de ligá-lo a rede elétrica.

O invólucro desenvolvido pela equipe de mecânica também passou por testes para verificar se o grau de proteção IP 67 havia sido alcançado. O primeiro teste consistiu em submergir o invólucro em um metro de coluna d'água por 30 minutos. Ao retirá-lo da água constatou-se que o interior do invólucro permaneceu estanque, demonstrando que o grau de proteção contra água foi atingido. Quanto à proteção contra poeira, após manter o dispositivo instalado no solo por aproximadamente um mês, o interior do mesmo permaneceu livre de detritos. Logo, o invólucro atingiu os requisitos necessários para obter o grau de proteção IP 67, que era um dos requisitos do projeto.

Como pode ser observado, os requisitos especificados para o projeto foram alcançados, resultando no desenvolvimento de um produto capaz de servir como uma ferramenta para o monitoramento remoto e contínuo de barragens e minas a fim de mitigar ou até mesmo evitar acidentes nessas estruturas, solucionando os diversos problemas identificados nas soluções de instrumentação desses ambientes. Logo, o projeto e prototipação das PCBs do dispositivo de monitoramento microssísmico foram bem sucedidos, resultando em plataformas capazes de realizar todas as funcionalidades previstas para o dispositivo objeto deste trabalho.

## 6 CONCLUSÕES

O presente trabalho denotou o projeto e a prototipação das PCBs de um dispositivo de monitoramento micro sísmico para ser utilizado em ambientes de mineração e barragens de rejeitos, contando com operação e parametrização remotas, envio de dados via rede sem fio de longo alcance, armazenamento local das medições e alimentação via sistema fotovoltaico e baterias recarregáveis. Tal dispositivo visa solucionar os problemas identificados no monitoramento dessas estruturas, servindo como uma ferramenta na gestão desses ambientes.

A utilização da metodologia P3I foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho, conferindo uma maior organização no planejamento e execução de cada etapa da criação do dispositivo de monitoramento, desde a exploração do problema de pesquisa, idealização do produto e elicitação de requisitos, até a prototipação das PCBs do dispositivo e a execução de testes para verificar o funcionamento de cada parte do projeto.

A modularização da eletrônica do dispositivo mostrou-se proveitosa, uma vez que além de diminuir o tamanho do dispositivo, evitou o retrabalho nos módulos que tiveram os seus projetos bem sucedidos na primeira tentativa de confecção. Encaixar pequenos módulos um sobre os outros diminuiu a área no invólucro que seria necessária caso todos os componentes tivessem que ser alocados numa única PCB.

A parametrização do dispositivo via *Bluetooth* permitiu a sua completa configuração sem a necessidade de uma infraestrutura complexa, bastando apenas utilizar um aplicativo de *smartphone* para decidir o método de detecção de evento micro sísmico a ser empregado, bem como os parâmetros necessários para tal.

O dispositivo apresentou boa precisão na detecção de eventos micro sísmicos, adquirindo medições compatíveis com a fonte de vibração empregada nos testes de aceitação através dos geofones. Porém, o acelerômetro empregado mostrou-se pouco preciso, apresentando muito ruído em suas medições. Apesar disso, o dispositivo pode ser operado normalmente, visto que o acelerômetro seria utilizado apenas como uma segunda opção de transdutor para a detecção de eventos, não influenciando no funcionamento do mesmo com os geofones.

Os objetivos definidos foram alcançados com sucesso, resultando na prototipação de um dispositivo de monitoramento micro sísmico remoto e autônomo a partir das PCBs desenvolvidas neste trabalho. Tal dispositivo é capaz de se comunicar com um *gateway* há 2 Km de distância sem o uso de fios, permitindo o envio contínuo das medições dos eventos micro sísmicos para uma central de análise sísmica, servindo como uma ferramenta para a gestão de barragens e minas. O dispositivo criado é de grande importância, tendo em

vista que não existem dispositivos com as mesmas funcionalidades no mercado brasileiro.

Para o aperfeiçoamento do projeto, propõe-se como trabalho futuro a substituição do módulo acelerômetro por um modelo de maior resolução, adequado às aplicações de monitoramento microssísmico, e a repetição dos testes de aceitação para verificar a viabilidade do uso de um acelerômetro para a detecção de eventos microssísmicos.

# REFERÊNCIAS

- ANA. *Relatório de segurança de barragens 2017*. Brasília, 2018. 81 p. Citado na página 36.
- ARAUJO, E. R. et al. *Conflitos Ambientais na Indústria Mineira e Metalúrgica: o passado e o presente*. Évora e Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016. ISBN 978-85-8261-047-3. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 36.
- AUGUSTIN, A. et al. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, v. 16, n. 9, p. 1466, set. 2016. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>>. Citado na página 39.
- BAUERMEISTER, G. *Primeiros passos comunicação LoRa com Arduino*. 2018. Disponível em: <<https://www.flipeflop.com/blog/primeiros-passos-lora-com-arduino/>>. Acesso em: 12 nov. 2019. Citado na página 47.
- BBC. *O que se sabe até agora sobre o rompimento de barragem que matou ao menos 115 pessoas em MG*. 2019. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-47002609>>. Acesso em: 01 fev. 2019. Citado na página 16.
- BEBBINGTON, A. *Minería, movimientos sociales y respuestas campesinas: una ecología política de transformaciones territoriales*. Lima: IEP, Instituto de Estudios Peruanos, 2007. v. 2. (Minería y sociedad, v. 2). ISBN 978-9972-51-172-1. Citado na página 15.
- BERNUS, P.; NEMES, L. A framework to define a generic enterprise reference architecture and methodology. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, v. 9, n. 3, p. 179–191, jul. 1996. ISSN 09515240. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951524096000018>>. Citado 5 vezes nas páginas 17, 34, 40, 67 e 69.
- BLOCH, H. P. Ingress Protection code explained. *World Pumps*, v. 2009, n. 11, p. 26, nov. 2009. ISSN 02621762. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0262176209704183>>. Citado na página 29.
- BOR, M. C.; VIDLER, J.; ROEDIG, U. Lora for the internet of things. In: *EWSN*. [S.l.: s.n.], 2016. v. 16, p. 361–366. Citado na página 39.
- BRASIL, E. U. R. *O novo código de mineração no Brasil: uma análise econômica da compensação financeira sobre a exploração dos recursos*. Tese (Doutorado em Teoria Econômica) — Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 36.
- BRASIL, L. M.; PIRES, V. O que a lama nos deixou : reflexões sobre a tragédia de Mariana, a mídia e a mineração no Brasil. *Chroniques des Amériques*, v. 17, n. 3a, 2017. ISSN 2292-227X. Disponível em: <<https://archipel.uqam.ca/10143/>>. Citado na página 16.
- CANDIDO. *Reciclagem de Poliuretano é viável*. 2016. Disponível em: <<http://abripur.org/473-2/>>. Acesso em: 13 dez. 2019. Citado na página 69.

CARVALHO, R. A. d. *A Process for Managing the Development of Innovative Products*. Monografia (MBA em Innovation Management Professional) — School of International Business and Entrepreneurship, Steinbeis University Berlin, Berlin, jan. 2019. Citado 4 vezes nas páginas 31, 32, 33 e 36.

COMPONENTS 101. *Introduction to Analog to Digital Converters (ADC Converters)*. 2019. Disponível em: <<https://components101.com/articles/analog-to-digital-adc-converters>>. Acesso em: 08 nov. 2019. Citado na página 45.

Curto Circuito. *Regulador de Tensão Linear -5V - L7905CV*. 2018. Disponível em: <<https://www.curtocircuito.com.br/regulador-de-tens-o-linear-5v-l7905cv.html>>. Acesso em: 18 nov. 2019. Citado na página 50.

Curto Circuito. *Regulador de Tensão Linear 5V - L7805CV*. 2018. Disponível em: <<https://www.curtocircuito.com.br/regulador-de-tens-o-linear-5v-l7805cv.html>>. Acesso em: 20 nov. 2019. Citado na página 50.

CURVELLO, A. *ESP32 - Um grande aliado para o Maker IoT*. 2018. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/esp32-um-grande-aliado-para-o-maker-iot/>>. Acesso em: 20 nov. 2019. Citado na página 46.

DAMS, J. A. A. T.; BROEK, L. G. C. V. D. *Speed sensor*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2009. Patente Internacional n.º WO 2009/054724 A2. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 27.

Dynamic Technologies (DTCC). *SmartSolo – the World’s First Smart Seismic Sensor*. 2017. Disponível em: <<https://smartsolo.com/>>. Acesso em: 10 jan. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 30.

Eletrogate. *Regulador de Tensão AMS1117 3.3V 1A*. 2019. Disponível em: <<https://www.eletrogate.com/regulador-de-tensao-ams1117-3.3v-1a>>. Acesso em: 18 nov. 2019. Citado na página 50.

Farnell. *ADS1282EVM-PDK - Development Kit, ADS1282 Ultra High Resolution Delta Sigma Analog to Digital Converter*. 2019. Disponível em: <<https://sg.element14.com/texas-instruments/ads1282evm-pdk/demo-kit-data-converter/dp/3125740>>. Acesso em: 26 nov. 2019. Citado na página 52.

FORSBERG, K.; MOOZ, H. The Relationship of System Engineering to the Project Cycle. *INCOSE International Symposium*, v. 1, n. 1, p. 57–65, out. 1991. ISSN 2334-5837. Disponível em: <<https://onlinelibrary-wiley.ez135.periodicos.capes.gov.br/doi/10.1002/j.2334-5837.1991.tb01484.x>>. Citado 4 vezes nas páginas 17, 34, 40 e 51.

G1 Minas. *Brumadinho: Sobe para 249 o número de mortos no rompimento de barragem*. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/08/31/brumadinho-sobe-para-249-o-numero-de-mortos-no-rompimento-de-barragem.ghtml>>. Acesso em: 15 set. 2019. Citado na página 16.

HILL, D.; LEWIS, A. *Subsurface monitoring using distributed acoustic sensors*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2012. Patente Internacional n.º WO 2012/123760 A2. Citado 3 vezes nas páginas 22, 28 e 29.

HYMEL, S. *An Intro to KiCad – Part 1: How PCBs Are Made* / DigiKey. 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=vaCVh2SAZY4>>. Acesso em: 29 nov. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

HYMEL, S. *An Intro to KiCad – Part 6: Place Parts and Define Outline* / DigiKey. 2018. Disponível em: <[https://www.youtube.com/watch?v=dM5b\\_s2ysVk](https://www.youtube.com/watch?v=dM5b_s2ysVk)>. Acesso em: 30 nov. 2019. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

HYMEL, S. *An Intro to KiCad – Part 8: Generate Gerbers and Order Boards* / DigiKey. 2018. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=ENmDnoKs2hM>>. Acesso em: 30 nov. 2019. Citado na página 60.

IBRAM. *Economia Mineral do Brasil: Março/2018*. 2018. Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <<https://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2018/02/economia-mineral-brasil-mar2018-1.pdf?x73853>>. Citado na página 15.

JOHNSTAD, S. E. *Electromagnetic and seismic streamer cable and method for using such a streamer cable*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2010. Patente Internacional n.º WO 2010/002263 A2. Citado 3 vezes nas páginas 22, 27 e 28.

JONES, R. T.; MACDOUGALL, T. *Optical accelerometer or displacement device using a flexure system*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2004. Patente dos Estados Unidos n.º US 2004/0237648 A1. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 26.

LEWIS, A.; RUSSELL, S. *Seismic geophysical surveying*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2016. Patente dos Estados Unidos n.º US 9,465,126 B2. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

LIMA, I. *Aprenda a utilizar o módulo GPS com Arduino*. 2018. Disponível em: <<https://autocorerobotica.blog.br/aprenda-utilizar-o-modulo-gps-com-arduino/>>. Acesso em: 12 nov. 2019. Citado na página 47.

MAC. *A Guide to the Management of Tailings Facilities*. 2ª. ed. Ottawa, Ontario: Mining Association of Canada, 2011. Disponível em: <<https://www.oma.on.ca/en/ontariomining/resources/MACtailingsguide2011.pdf>>. Citado na página 37.

MACHADO, W. G. d. F. *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 37.

MARTIN, T.; DAVIES, M. Development and review of surveillance programs for tailings dams. *Tailings Dams 2000 Proceedings. Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas. March*, 2000. Citado na página 37.

MELDAHL, P. *Geophysical data acquisition systems*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2015. Patente Internacional n.º WO 2015/082010 A1. Citado 3 vezes nas páginas 22, 24 e 25.

MURTA, G. *Conhecendo o ESP32 - Introdução (1)*. 2018. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/conhecendo-o-esp32-introducao-1/>>. Acesso em: 26 nov. 2019. Citado na página 56.

REYNOLDS, J. M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. 2ª. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-471-48535-3. Citado na página 43.

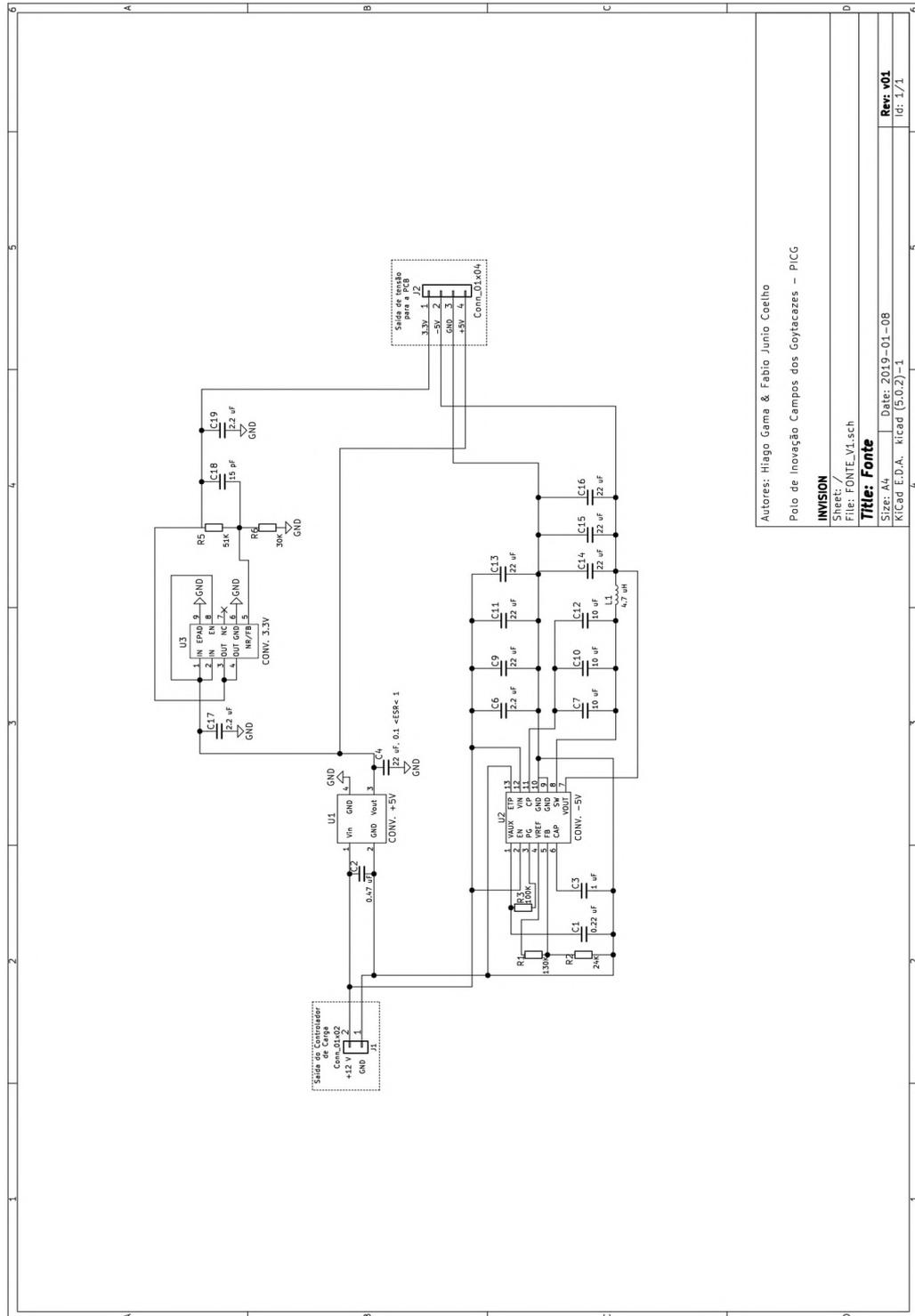
- ROCHA, R. L. Os negócios da mídia e a comunicação da saúde. *Cadernos de Saúde Pública*, v. 32, n. 2, 2016. ISSN 0102-311X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-311X2016000200301&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-311X2016000200301&lng=pt&tlng=pt)>. Citado na página 16.
- RODRIGUES, A. *O negócio bilionário do lixo eletrônico*. 2016. Disponível em: <[https://istoe.com.br/422443\\_O+NEGOCIO+BILIONARIO+DO+LIXO+ELETRONICO/](https://istoe.com.br/422443_O+NEGOCIO+BILIONARIO+DO+LIXO+ELETRONICO/)>. Acesso em: 13 dez. 2019. Citado na página 69.
- SCOTTO, G. Estados Nacionais, Conflitos Ambientais e Mineração na América Latina. *Letras verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, n. 14, p. 95–116, 2013. ISSN 1390-6631. Disponível em: <<https://biblat.unam.mx/es/revista/letras-verdes-quito/articulo/estados-nacionales-conflitos-ambientais-e-mineracao-na-america-latina>>. Citado na página 15.
- TENGHAMN, S. R. L.; BARR, F. J. *Digital sensor streamers and applications thereof*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2013. Patente dos Estados Unidos n.º US 0,039,149 A1. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 25.
- TENGHAMN, S. R. L.; BARR, F. J. *Sensor system for measuring acceleration and pressure*. [S.l.]: Derwent Innovations Index, 2018. Patente Europeia n.º EP 3 399 348 A1. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.
- Texas Instruments. *Evaluation Module for TPS79601 Single Output LDO*. 2016. Disponível em: <[http://www.ti.com/tool/TPS79601DRBEVM?jktype=tools\\_software](http://www.ti.com/tool/TPS79601DRBEVM?jktype=tools_software)>. Acesso em: 13 nov. 2019. Citado na página 58.
- Texas Instruments. *LMG34xx GaN system-level evaluation mother board*. 2017. Disponível em: <<http://www.ti.com/tool/LMG34XX-BB-EVM>>. Acesso em: 13 nov. 2019. Citado na página 58.
- Texas Instruments. *TPS63710 Low Noise, Synchronous Inverting Buck Converter Evaluation Module*. 2017. Disponível em: <[http://www.ti.com/tool/TPS63710EVM-811?jktype=tools\\_software](http://www.ti.com/tool/TPS63710EVM-811?jktype=tools_software)>. Acesso em: 13 nov. 2019. Citado na página 58.
- Theremino. *Sensores geológicos*. 201–. Disponível em: <<https://www.theremino.com/pt/hardware/inputs/geology-sensors>>. Acesso em: 07 nov. 2019. Citado na página 44.
- THOMSEN, A. *Tutorial: Acelerômetro MPU6050 com Arduino*. 2014. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-acelerometro-mpu6050-arduino/>>. Acesso em: 20 nov. 2019. Citado na página 48.
- THOMSEN, A. *Como gravar dados no Cartão SD com Arduino*. 2015. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/cartao-sd-com-arduino/>>. Acesso em: 12 nov. 2019. Citado na página 47.
- Ultra Librarian. *Ultra Librarian*. 2017. Disponível em: <<https://www.ultralibrarian.com/home>>. Acesso em: 30 nov. 2019. Citado na página 58.
- VIANNA, M. et al. *Design Thinking: Inovação em Negócios*. 2ª. ed. Rio de Janeiro: MJV Press, 2012. ISBN 978-85-65424-03-5. Citado 4 vezes nas páginas 34, 36, 38 e 39.

---

WITHERS, M. et al. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, The Seismological Society of America, v. 88, n. 1, p. 95–106, 1998. Citado na página [68](#).

# Apêndices

# APÊNDICE A – CIRCUITO DO MÓDULO DE ALIMENTAÇÃO

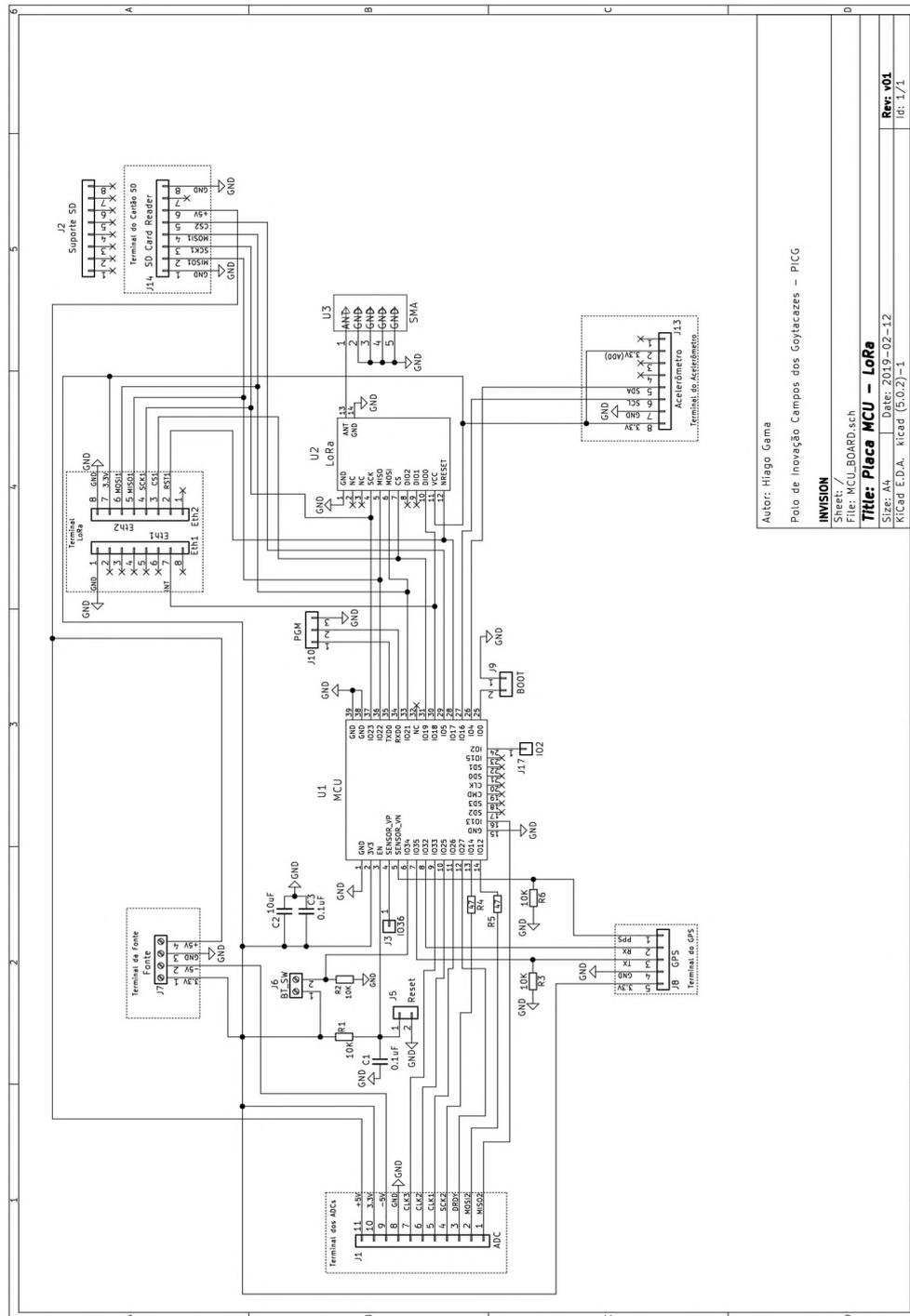


Autores: Higo Gama & Fabio Junio Coelho  
 Polo de Inovação Campos dos Goytacazes – PICG  
**INVISION**  
 Sheet: /  
 File: FONTE\_V1.sch  
**Title: Fonte**  
 Size: A4 | Date: 2019-01-08  
 Kicad E.D.A. | Kicad (5.0.2)-1

Rev: v01  
 Id: 1/1



# APÊNDICE C – CIRCUITO DO MÓDULO DE TRATAMENTO, ARMAZENAMENTO E ENVIO DE MEDIÇÕES VIA LORA



Autor: Hiago Gama  
 Polo de Inovação Campos dos Goytacazes – PICG  
**INVISION**  
 Sheet: /  
 File: MCU\_BOARD.sch  
**Title: Placa MCU – LoRa**  
 Size: A4 Date: 2019-02-12  
 KIGad E.D.A. kicad (5.0.2)-1  
**Rev: v01**  
 Id: 1/1