



UNIVERSIDADE  
FEDERAL  
DE PERNAMBUCO

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Eletrônica e Sistemas

Graduação em Engenharia Eletrônica

## **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados de telemetria para veículos aéreos não tripulados**

**Daniel Alves Mendes Barbosa**

Recife

Outubro 2022

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Tecnologia e Geociências  
Departamento de Eletrônica e Sistemas

**Daniel Alves Mendes Barbosa**

## **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados de telemetria para veículos aéreos não tripulados**

Trabalho apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Eletrônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Orientador: Guilherme Nunes Melo

Recife

Outubro 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Barbosa, Daniel Alves Mendes.

Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados de telemetria para veículos  
aéreos não tripulados / Daniel Alves Mendes Barbosa. - Recife, 2022.  
63 p. : il., tab.

Orientador(a): Guilherme Nunes Melo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Eletrônica -  
Bacharelado, 2022.

1. Telemetria. 2. Transmissão de dados. 3. Monitoramento. 4. Rádio  
frequência. 5. Aquisição de dados. I. Melo, Guilherme Nunes. (Orientação). II.  
Título.

620 CDD (22.ed.)

# Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados de telemetria para veículos aéreos não tripulados

**Daniel Alves Mendes Barbosa**

Trabalho apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Eletrônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Examinado por:

---

Prof. Dr. Guilherme Nunes Melo (Orientador), Dr.

---

Prof. Hermano Andrade Cabral (Examinador Interno), Ph.D.

Recife  
Outubro 2022

“Nada temos a temer quanto ao futuro, a menos que nos esqueçamos como Deus tem nos conduzido no passado.”

---

Ellen G. White

*À Deus.*  
*Aos meus Pais, Daniel Mendes e*  
*Maria Goreti.*

# Agradecimentos

À Deus, por me dar força e convicção, durante toda a minha vida, para concluir todos os objetivos, por me guiar, sem exitar, através de muitos obstáculos em meu caminho, por ser meu mantenedor, por me dar determinação, por ser meu porto seguro e que até aqui tem me ajudado, tomado conta e dirigido todos os meus passos.

À minha família que sempre estiveram comigo. Meus pais, Daniel Mendes e Maria Goreti, por sempre estarem ao meu lado, não medirem esforços pra cuidarem de mim, me guiarem no caminho certo e serem alicerce para as minhas realizações. À minha irmã, Danielly Alves, por ser meu exemplo, pela amizade e atenção dedicadas quando preciso.

À minha noiva, Vitoria Andrade, pelo companheirismo, incentivo e apoio durante todo o tempo, trajeto do curso e deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Guilherme Nunes, pela orientação, aprendizado, amizade e auxílio nas pesquisas e desenvolvimento do trabalho.

Aos meus amigos, Diogo Morais, Rubem Diego e Luís Filipe, em quem me espelho e me incentivam a ser um profissional cada vez melhor, e que contribuíram com a realização deste trabalho.

À Tomus, por enxergarem meu potencial e pelo crescimento profissional.

Aos meus colegas de curso, com quem convivi intensamente durante os últimos anos, pelo companheirismo e pela troca de experiências que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formando.

Ao Departamento de Eletrônica e Sistemas e a UFPE, essenciais no meu processo de formação profissional, pela dedicação, e por todos os ensinamentos ao longo dos anos do curso.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, a minha graduação e realização deste trabalho.

Resumo do Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao DES/UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Eletrônica (Eng.)

## DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TELEMETRIA PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

Daniel Alves Mendes Barbosa

Outubro/2022

Orientador(a): Guilherme Nunes Melo D.Sc.

Programa: Engenharia Eletrônica

Com o contínuo desenvolvimento e pesquisa de equipamentos eletrônicos para aquisição de dados e sistemas de controle de veículos aéreos não tripulados (VANTs), surge a necessidade de monitoramento remoto dessas máquinas e equipamentos. O presente trabalho apresenta a pesquisa e o desenvolvimento de um sistema de telemetria para aquisição e transmissão de dados e variáveis importantes, utilizando tecnologia de transmissão sem fio por rádio frequência, para serem utilizados em testes e ensaios, para validação da operação e desempenho das aeronaves (ou outro tipo de veículo). O sistema consiste em um mecanismo embarcado de aquisição de dados de um ponto móvel e transmissão para um módulo central fixo, que recebe as informações, as processa e as encaminha para uma interface de monitoramento, que apresenta e fornece as informações ao usuário, em tempo real, para fins analíticos de integração, análise e validação de dados. Os resultados obtidos foram satisfatórios, pois, o sistema garante transmissão de dados remotamente, de maneira eficiente, em tempo real, para distâncias bem significativas, com tolerância à falhas e reenvio de dados. O sistema auxilia no monitoramento de veículos remotamente, melhorando a validação de projetos, tomada de decisões e manutenções, apresentando uma solução acessível.

**Palavras-chave:** Telemetria; Transmissão de dados; Monitoramento; Rádio frequência; Aquisição de dados.

Abstract of Course Conclusion Work presented to DES/UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Electronic Engineering (Eng.)

## DEVELOPMENT OF A TELEMETRY DATA ACQUISITION SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Daniel Alves Mendes Barbosa

October/2022

Advisor: Guilherme Nunes Melo D.Sc.

Course: Electronic Engineering

With the continuous development and research of electronic equipment for data acquisition and control systems for unmanned aerial vehicles (UAVs), the need for remote monitoring of these machines and equipment arises. The present work presents the research and development of a telemetry system for the acquisition and transmission of data and important variables, using wireless radio frequency transmission technology, to be used in tests and trials, for validation of the operation and performance of aircraft. (or other type of vehicle). The system consists of an embedded data acquisition mechanism from a mobile point and transmission to a fixed central module, which receives the information, processes it and forwards it to a monitoring interface, which presents and provides the information to the user, in time. real world, for analytical purposes of data integration, analysis and validation. The results obtained were satisfactory, since the system guarantees data transmission remotely, efficiently, in real time, for very significant distances, with fault tolerance and data re-sending. The system assists in monitoring vehicles remotely, improving project validation, decision making and maintenance, presenting an affordable solution.

**Keywords:** Telemetry; Data Transmission; Monitoring; Radio Frequency; Data acquisition

# Sumário

|                                           |             |
|-------------------------------------------|-------------|
| <b>Lista de Figuras</b>                   | <b>viii</b> |
| <b>Lista de Tabelas</b>                   | <b>x</b>    |
| <b>Lista de Símbolos</b>                  | <b>xi</b>   |
| <b>Lista de Abreviações</b>               | <b>xii</b>  |
| <b>1 Introdução</b>                       | <b>1</b>    |
| 1.1 Justificativa . . . . .               | 2           |
| 1.2 Objetivo Geral . . . . .              | 3           |
| 1.2.1 Objetivos específicos . . . . .     | 3           |
| 1.3 Organização do TCC . . . . .          | 4           |
| <b>2 Fundamentação Teórica</b>            | <b>5</b>    |
| 2.1 Telemetria . . . . .                  | 5           |
| 2.1.1 Métodos de telemetria . . . . .     | 5           |
| 2.1.2 Sistemas de telemetria . . . . .    | 6           |
| 2.2 Transmissão de dados . . . . .        | 7           |
| 2.3 Meios de transmissão . . . . .        | 7           |
| 2.3.1 Banda de frequência ISM . . . . .   | 9           |
| 2.4 Comunicação wireless . . . . .        | 11          |
| 2.4.1 Sistema de transmissão RF . . . . . | 11          |
| 2.5 Módulo wireless . . . . .             | 12          |
| 2.5.1 Transceptor nRF24L01+ . . . . .     | 13          |
| 2.6 Microcontrolador . . . . .            | 14          |
| 2.6.1 Sistema embarcado . . . . .         | 15          |
| 2.6.2 Arduino . . . . .                   | 15          |
| 2.7 Sensores . . . . .                    | 18          |
| 2.7.1 Sensor analógico . . . . .          | 18          |
| 2.7.2 Sensor digital . . . . .            | 18          |
| 2.7.3 Tipos de sensores . . . . .         | 18          |

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| <b>3 Metodologia</b>                          | <b>20</b> |
| 3.1 Sistema Proposto                          | 21        |
| 3.2 Variáveis monitoradas                     | 21        |
| 3.2.1 Temperatura                             | 21        |
| 3.2.2 Pressão                                 | 21        |
| 3.2.3 Altitude                                | 22        |
| 3.3 Componentes utilizados                    | 22        |
| 3.3.1 Arduino UNO                             | 22        |
| 3.3.2 Arduino Nano                            | 23        |
| 3.3.3 Transceptor nRF24L01                    | 24        |
| 3.3.4 BMP180: Sensor de temperatura e pressão | 26        |
| 3.3.5 Módulo bluetooth HC-05                  | 27        |
| 3.3.6 Custos                                  | 28        |
| 3.4 Sistema supervisorio                      | 29        |
| 3.4.1 Softwares utilizados                    | 29        |
| <b>4 Desenvolvimento</b>                      | <b>33</b> |
| 4.1 Módulo sensor                             | 34        |
| 4.1.1 Hardware                                | 34        |
| 4.1.2 Firmware                                | 36        |
| 4.2 Módulo servidor                           | 39        |
| 4.2.1 Hardware                                | 39        |
| 4.2.2 Firmware                                | 42        |
| 4.3 Sistema supervisorio                      | 44        |
| 4.3.1 Versão desktop                          | 44        |
| 4.3.2 Versão mobile                           | 46        |
| <b>5 Resultados</b>                           | <b>48</b> |
| 5.1 Resultados de Síntese                     | 48        |
| 5.2 Validação do sistema                      | 52        |
| <b>6 Conclusão</b>                            | <b>56</b> |
| 6.1 Trabalhos futuros                         | 57        |
| <b>Referências Bibliográficas</b>             | <b>58</b> |

# Lista de Figuras

|      |                                                                                               |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Esquema básico do sistema de telemetria (Fonte: GOMES, 2016).                                 | 6  |
| 2.2  | Exemplo de um sinal digital e analógico (Fonte: ROCHA, 2013).                                 | 7  |
| 2.3  | Padronização IEEE para redes wireless (Fonte: Adaptado de IEEE, 2022).                        | 9  |
| 2.4  | Esquema padrão de uma comunicação sem fio (Fonte: O autor).                                   | 12 |
| 2.5  | Módulo nRF24L01+ com Antena externa (Fonte: O autor).                                         | 13 |
| 2.6  | Funcionamento do filtro GFSK (Fonte: COMMUNICATIONS, 2022).                                   | 14 |
| 2.7  | Diagrama de blocos de um sistema embarcado (Fonte: SAMPAIO, 2021).                            | 15 |
| 2.8  | Placas Arduino Nano (a) e Arduino Uno (b) (Fonte: O autor).                                   | 16 |
| 2.9  | IDE do arduino (Fonte: O autor).                                                              | 17 |
| 3.1  | Arduino UNO (Fonte: O autor).                                                                 | 23 |
| 3.2  | Pinagem do Arduino UNO (Fonte: O autor).                                                      | 23 |
| 3.3  | Arduino Nano utilizado (Fonte: O autor).                                                      | 24 |
| 3.4  | Pinagem do nRF24 e suas funções (Fonte: O autor).                                             | 25 |
| 3.5  | Esquema de ligação entre dispositivos com interface SPI (Fonte: FILHO; BARBOSA et al., 2012). | 26 |
| 3.6  | Sensor de temperatura e pressão BMP180 (Fonte: O autor).                                      | 26 |
| 3.7  | Esquema de ligação entre dispositivos através da interface I2C (Fonte: TEIXEIRA, 2022).       | 27 |
| 3.8  | Módulo bluetooth HC-05 (Fonte: O autor).                                                      | 28 |
| 3.9  | Layout do Node-RED (Fonte: O autor).                                                          | 30 |
| 3.10 | Layout da janela Designer do App inventor (Fonte: O autor).                                   | 31 |
| 3.11 | Layout do Editor de blocos no App inventor (Fonte: O autor).                                  | 32 |
| 4.1  | Esquema de funcionamento do sistema de telemetria proposto (Fonte: O autor).                  | 33 |
| 4.2  | Esquema de ligação da montagem do módulo sensor (Fonte: O autor).                             | 34 |
| 4.3  | Esquema de ligação do módulo sensor no ambiente de simulação (Fonte: O autor).                | 35 |

|      |                                                                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.4  | Protótipo do módulo sensor (Fonte: O autor).                                                                                              | 36 |
| 4.5  | Fluxograma básico do funcionamento do módulo sensor (Fonte: O autor).                                                                     | 37 |
| 4.6  | Formato da estrutura <i>Payload</i> da mensagem a ser enviada ao módulo servidor (Fonte: O autor).                                        | 38 |
| 4.7  | Esquema de ligação da montagem do módulo servidor (Fonte: O autor).                                                                       | 40 |
| 4.8  | Esquema de ligação do módulo servidor no ambiente de simulação (Fonte: O autor).                                                          | 41 |
| 4.9  | (a) Caixa do módulo servidor (b) Protótipo do módulo servidor (Fonte: O autor).                                                           | 41 |
| 4.10 | Fluxograma básico do funcionamento do módulo servidor (Fonte: O autor).                                                                   | 42 |
| 4.11 | Fluxograma de funcionamento do sistema supervisorio (Fonte: O autor).                                                                     | 44 |
| 4.12 | Sistema supervisorio - versão <i>desktop</i> (Fonte: O autor).                                                                            | 45 |
| 4.13 | Implementação do sistema supervisorio no Node-RED (Fonte: O autor).                                                                       | 46 |
| 4.14 | (a) Tela inicial do Aplicativo do sistema <i>mobile</i> (b) Tela de monitoramento do sistema supervisorio <i>mobile</i> (Fonte: O autor). | 47 |
| 5.1  | Serials dos módulos no teste de funcionamento do sistema (Fonte: O autor).                                                                | 49 |
| 5.2  | Gráfico das medições de temperatura gerado pelo supervisorio (Fonte: O autor).                                                            | 50 |
| 5.3  | Gráfico das medições de pressão gerado pelo supervisorio (Fonte: O autor).                                                                | 50 |
| 5.4  | Gráfico das medições de altitude gerado pelo supervisorio (Fonte: O autor).                                                               | 51 |
| 5.5  | Medições registradas no arquivo csv (Fonte: O autor).                                                                                     | 51 |
| 5.6  | Pontos de observação de Medições registradas - teste 1 (Fonte: O autor).                                                                  | 52 |
| 5.7  | Gráfico das medições de temperatura e altitude - teste 1 (Fonte: O autor).                                                                | 53 |
| 5.8  | Pontos de observação de Medições registradas - teste 2 (Fonte: O autor).                                                                  | 54 |
| 5.9  | Gráfico das medições registradas nos pontos de observação - teste 2 (Fonte: O autor).                                                     | 55 |

# Lista de Tabelas

|     |                                                                   |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Datasheet do nRF24 com antena (Fonte: adaptado de NORDIC, 2010).  | 14 |
| 2.2 | Comparativo entre placas arduino (Fonte: O autor) . . . . .       | 17 |
| 3.1 | Especificações do Sensor BMP180 (Fonte: O autor). . . . .         | 27 |
| 3.2 | Orçamento dos componentes de hardware do sistema (Fonte: Shoppe). | 28 |
| 5.1 | Alcance máximo (Fonte: O autor). . . . .                          | 55 |

# Lista de Símbolos

|         |                       |
|---------|-----------------------|
| A       | Ampère                |
| mA      | Miliampere            |
| $\mu$ A | Microampere           |
| dBm     | Decibel miliwatt      |
| H       | Altitude              |
| Hz      | Hertz                 |
| KHz     | Kilohertz             |
| MHz     | Megahertz             |
| GHz     | Gigahertz             |
| Kbps    | Kilobit por segundo   |
| Mbps    | Megabit por segundo   |
| KB      | Kilobyte              |
| m       | Metros                |
| cm      | Centímetros           |
| Km      | Quilômetros           |
| Pa      | Pascal                |
| hPa     | Hectopascal           |
| P       | Pressão               |
| $P_0$   | Pressão de referência |
| QR      | Quick Response        |
| V       | Volts                 |

# Lista de Abreviações

|        |                                                        |
|--------|--------------------------------------------------------|
| AD     | Analógico-para-Digital                                 |
| ANATEL | Agência Nacional de Telecomunicações                   |
| API    | interface de programação de aplicações                 |
| CI     | Circuito Integrado                                     |
| FCC    | <i>Federal Communications Commission</i>               |
| FM     | <i>Frequency Modulation</i>                            |
| GFSK   | <i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>                 |
| GPS    | <i>Global Positioning System</i>                       |
| GSM    | <i>Global System for Mobile Communications</i>         |
| IEEE   | <i>Institute of Electrical and Eletronic Engineers</i> |
| ISM    | <i>Industrial Scientif and Medical</i>                 |
| IoT    | <i>Internet of Things</i>                              |
| IDE    | Ambiente de desenvolvimento                            |
| $I^2C$ | <i>Inter-Integrated Circuit</i>                        |
| JSON   | <i>JavaScript Obect Notation</i>                       |
| LDR    | <i>Light Dependent Resistor</i>                        |
| LED    | <i>Light Emitting Diode</i>                            |
| LoRa   | <i>Long Range</i>                                      |
| RF     | Radio Frequência                                       |
| SPI    | <i>Serial Peripheral Interface</i>                     |
| SAE    | <i>Society of Automotive Engineers</i>                 |
| UART   | <i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>     |
| VANT   | Veículo Aéreo Não Tripulado                            |
| WLAN   | <i>Wireless Local Area Network</i>                     |
| WMAN   | <i>Wireless Metropolitan Area Network</i>              |
| WPAN   | <i>Wireless Personal Area Network</i>                  |
| WWAN   | <i>Wireless Wide Area Network</i>                      |
| WRAN   | <i>Wireless Regional Area Network</i>                  |

# Capítulo 1

## Introdução

Diversas instituições vêm realizando pesquisas sobre veículos aéreos não tripulados (VANTs) nos últimos anos, resultando em muito conhecimento e desenvolvimento em áreas afins. O grande desenvolvimento dessas aeronaves foi possível devido aos enormes avanços na tecnologia e ao poderoso poder de processamento dos microcomputadores e microprocessadores, ao baixo custo e à miniaturização dos componentes eletrônicos necessários para controlar o voo da aeronave. Esses tipos de máquinas, com ou sem asas, são assistidos por um operador terrestre, de forma remota. O uso desses veículos tem desempenhado um papel importante em diversas áreas, tais como: aplicações militares, monitoramento ambiental, design, fabricação, instrumentação, sistemas para voos autônomos e de entretenimento civil, como o aerodesign, e projetos de competição aeronáutica, como a competição SAE Brasil, onde várias universidades participam na apresentação de modelos e projetos de desenvolvimento de aeromodelos não tripulados, como o Mandacaru Aerodesign da UFPE. Os estudos e desenvolvimento na área tem o foco de disseminar técnicas e conhecimentos relativos à tecnologia da mobilidade, quanto à transmissão de informações remotamente, em suas variadas formas: terrestre, marítima e aeroespacial.

As pesquisas em computação e automação trouxeram grandes contribuições em diversas áreas, principalmente, no campo de monitoramento remoto, que facilita supervisão de aeronaves e automóveis, melhorando as condições de monitoramento à distância e aumentando, significativamente, a qualidade e confiabilidade da aquisição e transmissão de dados remotamente. A aquisição de dados é um dos maiores problemas que os operadores de VANTs enfrentam, quando se trata de analisar, adequadamente, o desempenho da aeronave, especialmente, em tempo real. Para isso, é necessário obter informações precisas, fáceis, rápidas e confiáveis. À medida que os equipamentos eletrônicos continuam sendo atualizados e desenvolvidos, como sensores e dispositivos de armazenamento e transmissão de dados, esse tipo de exigência é facilitado através da determinação e criação de sistemas eletrônicos capazes de realizar telemetria (FILARDI, 2006).

A telemetria é o processo de transmissão e utilização de informações de um ou mais veículos, equipamentos ou uma máquina remota, para monitorá-los e controlá-los, resultando numa comunicação rápida, em uma rede cabeada ou sem fio. O princípio básico do funcionamento da telemetria, para uma comunicação entre áreas remotas, é a presença de um módulo ou central de recebimento de dados, que funciona como um servidor, onde todas as informações são transmitidas e armazenadas. Com o crescente avanço tecnológico da eletrônica, o processamento de dados pode ser automatizado, possibilitando a análise das informações de forma remota e online (BONDE, 2022).

Os sistemas de telemetria podem ser utilizados durante todo o ciclo de vida do veículo ou equipamento a que estão associados, não apenas durante a fase de testes. Durante a fase de desenvolvimento, esses sistemas podem analisar o desempenho das máquinas, permitindo que equipes e operadores em terra validem, ou não, o processo de ensaio. Dessa forma, a inspeção do desempenho de uma aeronave, que só é realizada após o retorno do voo, quando os dados registrados no voo estão disponíveis, é realizado em tempo real, reduzindo o tempo de voo, número de partidas e chegadas e, portanto, melhorando a segurança, reduzindo falhas e custos de testes. Assim, os dados de telemetria também auxiliam nas atividades de manutenção, pois, podem fornecer informações sobre o tempo e a condição real de operação, permitindo a avaliação da performance do veículo. Diante disso, é possível realizar manutenções preditivas e preventivas, auxiliando na melhor tomada de decisão dos operadores quanto a resolução de problemas (MALAQUIAS, 2009).

## 1.1 Justificativa

O avanço da tecnologia dos VANTs tem se tornado cada vez mais popular, abrindo múltiplas possibilidades para sua aplicação em competições de aeromodelismo (como SAE Aerodesign) e no setor civil (como entretenimento ou monitoramento ambiental). No entanto, projetos de aviação de pequeno porte, ou qualquer tipo de veículo, apresentam algumas dificuldades, que incluem manuseio de muitas variáveis presentes no projeto, como determinar conjuntos de sensores para processamento das variáveis do sistema e desenvolver eletrônica capaz de fazer telemetria, além de fornecer suporte computacional para testes e corroboração dos dados adquiridos. Assim, a necessidade de verificação real e autêntica, em tempo real, de uma aeronave ou veículo, torna-se mais apropriado (FLOREANO; WOOD, 2015; LAJÚS et al., 2015).

Dessa forma, um sistema capaz de coletar parâmetros estratégicos de aeronaves de pequeno porte, ou qualquer tipo de veículo, e monitorá-los em tempo real, agregará valor ao desenvolvimento de programas de aviação, facilitando o processo

de verificação e validação. A telemetria ajuda a fazer registros dos testes e ensaios, permitindo supervisionar e analisar as informações e as condições em que a aeronave esta sendo exposta. Estes sistemas de telemetria devem ser acessíveis e robustos com base em precisão suficiente, custo e durabilidade. Porém, segundo Gomes (2016), a utilização de sistemas de telemetria disponíveis possuem fatores limitantes: custo e acessibilidade.

Diante disso, um sistema de telemetria acessível e eficiente, facilita e permite análise e registro de dados remotamente e, portanto, é vantajoso para monitoramento e validação de projetos de VANTs e outros.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é pesquisar, definir, implantar e desenvolver uma solução de um sistema de telemetria, que realize transmissão eficiente de dados remotamente, em tempo real, com intuito de garantir a entrega das informações coletadas de forma satisfatória, com tolerância à falhas e reenvio de dados. Os dados serão disponibilizados para análise, através de uma interface de supervisão, para serem monitorados, auxiliar na avaliação e validação de projeto de aeronaves, e identificar as condições em que estão submetidas.

### **1.2.1 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Priorizar uso de dispositivos eletrônicos de baixo custo e de baixo consumo de energia, para implementação do módulo de telemetria;
- Transmitir dados utilizando tecnologia sem fio, sem depender de internet e nem da rede de telefonia móvel;
- Apresentar aplicação de monitoramento com interface simples;
- Disponibilizar dados em tempo real, provenientes de pontos móveis (aeronaves e outros);
- Modelar e implementar algoritmo do mecanismo de aquisição, transmissão, recepção, tratamento e apresentação dos dados do sistema de telemetria;
- Implementar armazenamento das informações em arquivo, para análise posterior;
- Projetar e desenvolver protótipo para simulações, testes e integração do sistema;

- Validar o sistema de telemetria em contexto próximo da realidade.

## 1.3 Organização do TCC

O conteúdo deste TCC está dividido em seis capítulos. As referências encontram-se nas páginas finais. A seguir, um resumo dos capítulos seguintes do TCC.

**Capítulo 2.** Perpassa o referencial teórico, realizado para entender o funcionamento de sistemas de telemetria e encontrar o melhor tipo de comunicação *wireless* para aplicar numa solução eficiente e acessível de um sistema de telemetria.

**Capítulo 3.** Apresenta a metodologia adotada para o desenvolvimento do sistema de telemetria proposto no trabalho.

**Capítulo 4.** Aborda e ilustra o desenvolvimento do sistema, mostrando a implementação realizada para criação do sistema de telemetria.

**Capítulo 5.** Apresenta os resultados obtidos, de forma discursiva, dos testes realizados com o desenvolvimento do sistema de telemetria, mostrando a integração da medição, transmissão, recepção e monitoramento de dados remotamente.

**Capítulo 6.** Apresenta as conclusões do trabalho e também sugestões de trabalhos futuros.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

Neste capítulo serão apresentadas as pesquisas e partes integrantes ao trabalho proposto, dos sistemas de telemetria, sensores, meios de transmissão, sistemas de transmissão de dados, através de comunicação de rede sem fio com módulo *wireless*, utilização do microcontrolador arduino e sistema embarcado para processamento e manipulação de dados.

### 2.1 Telemetria

De origem grega, a palavra telemetria deriva-se de: *Tele*, que significa distante, e *metron*, que significa medida ou medição. Logo, a telemetria fundamenta-se em medições que são feitas à distância, ou seja, remotamente (DIAS, 1992).

É um mecanismo que envolve obtenção, transmissão, recepção, gravação e visualização de dados e eventos à distância, vindos de máquinas e/ou sensores remotos, para que sejam feitos o monitoramento e controle deles (VISSOTO, 2004). A utilização de sistemas de telemetria começou a surgir devido à necessidade de realizar medições em locais que os humanos não podem alcançar, se tornando cada vez mais uma ciência complexa na atualidade, com a finalidade de transmitir informações de forma confiável e transparente de fontes de dados remotas para usuários que estão fora do sistema, onde os dados são monitorados e analisados (MATTOS, 2004).

A telemetria permite a coleta de dados em tempo real em locais de difícil acesso, agilizando o processo de obtenção de informações, proporcionando conectividade entre diversos tipos de sistemas e seus subsistemas, melhorando a gestão e a segurança da informação (MATTOS, 2004; SANTOS, 2010).

#### 2.1.1 Métodos de telemetria

Existem diversos meios para se realizar uma telemetria, podendo ser: mecânico, elétrico e outros. O método mais comum é baseado em sinais elétricos e pode ser

realizado por meios com ou sem fio. O modo de telemetria sem fio é o mais utilizado atualmente porque permite uma alta mobilidade, diminui necessidade de cabear quilômetros de fios e flexibilidade, permitindo sua implementação em áreas remotas (LOZANO-NIETO, 1999).

### 2.1.2 Sistemas de telemetria

Um sistema de telemetria consiste em pelo menos um ou mais sensores, uma interface entre o sensor e uma rede de comunicação, um dispositivo de comunicação (transmissor/receptor) e um sistema supervisório, que é uma interface que obtém, organiza e apresenta as informações, através de um painel visual para análise e supervisão. O processamento de dados de sistemas de telemetria é bastante rápido, de forma que a aquisição e tratamento das informações seja mais vantajoso que enviar um ser humano para fazer a obtenção dos dados, fazendo com que sejam considerados sistemas de tempo real (DIAS, 2010). A Figura 2.1 representa um modelo básico de um sistema de telemetria.

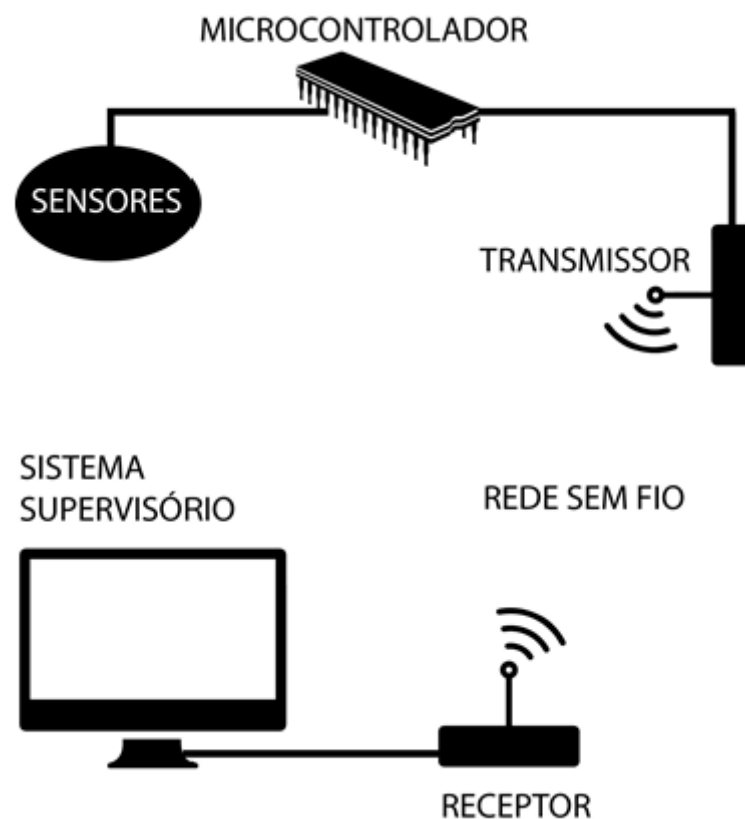


Figura 2.1: Esquema básico do sistema de telemetria (Fonte: GOMES, 2016).

## 2.2 Transmissão de dados

A transmissão de dados é o processo de envio de dados digitais ou analógicos, através de um meio de comunicação, permitindo a intercomunicação de dispositivos em ambientes ponto a ponto, ponto a multiponto e multiponto a multiponto, que envolve o uso de um meio e um portador de informações, para transmiti-las entre dois pontos fisicamente distantes (MOREIRA, 2022).

Atualmente, a transmissão de dados é feita mais na forma digital, usando transmissão digital. A transmissão digital inclui o envio de informações, na forma de sinais digitais, por meio de comunicação. Portanto, os dados analógicos lidos pelos sensores são pré-digitalizados antes da transmissão, através de conversores Analógico-digital (HUS, 2003; ROCHA, 2013). As transmissões de dados envolvidas no projeto tratam-se de transmissões digitais. A Figura 2.2 ilustra os tipos de sinais digital e analógico.

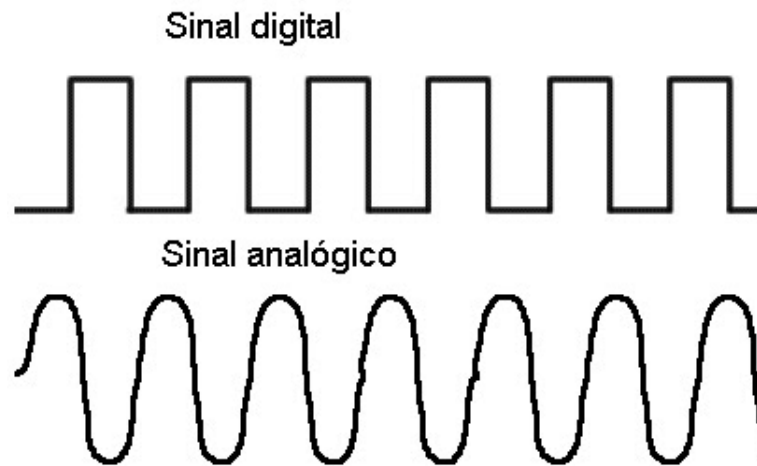


Figura 2.2: Exemplo de um sinal digital e analógico (Fonte: ROCHA, 2013).

## 2.3 Meios de transmissão

Existem vários métodos de comunicação disponíveis para suportar as aplicações de sistemas de telemetria, sendo alguns deles: rede de telefonia móvel, satélite e rádio. A escolha de qual meio utilizar em um projeto de sistema de telemetria depende do custo da solução e dos equipamentos, da confiabilidade do processo e nível de integração, cobertura e alcance, dependendo da necessidade do sistema e do projeto (SANTOS, 2004).

As transmissões via rádio são chamadas de transmissões rádio frequência (RF). Para funcionar, elas precisam de uma infraestrutura para realizar uma comunicação,

necessitando de antenas para que dois pontos diferentes troquem informações, enviando e recebendo dados. A comunicação sem fio é a mais utilizada, pois, através da propagação das ondas de RF é possível alcançar longas distâncias e ter uma perda gerenciável da potência do sinal (SANTOS, 2010).

Estes tipos de equipamentos e antenas, que usam faixas de frequência, são regularizados, nos Estados Unidos, pela FCC (*Federal communications Commission*) e no Brasil, pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) que estabelecem regras para os sinais de transmissão de dados que devem ser seguidas (FCC, 2022). A infraestrutura dos meios de transmissão seguem uma padronização adotada pelo IEEE (*Institute of Electrical and Eletronic Engineers*) e, de acordo com Irwin e Wilamowski (2016), a definição das categorias e classificação para redes *wireless*, que é uma infraestrutura de comunicação via rádio que transfere dados e informações sem utilização de cabos, é dada levando em consideração a área de abrangência, estabelecida pela frequência, propósito, velocidade e alcance de cada rede, sendo dividido nas seguintes categorias:

- WPAN - *Wireless Personal Area Network*: são as redes pessoais sem fio, que são de baixo consumo energético e alcance, geralmente de dezenas de metros, em alguns casos, podem chegar até 100m, presente em dispositivos celulares e computadores;
- WLAN - *Wireless Local Area Network*: são as redes locais sem fio, que possuem alcance entre 100 e 300 metros;
- WMAN - *Wireless Metropolitan Area Network*: são as redes metropolitanas sem fio, que enquadram, geralmente, redes de banda larga que podem chegar a um alcance de 6km. São conjuntos de várias WLANs;
- WRAN - *Wireless Regional Area Network*: são as redes de áreas regionais sem fio;
- WWAN - *Wireless Wide Area Network*: são as redes geograficamente distribuídas sem fio, que apresentam maior alcance e são destinadas a serviços de telecomunicações que demandam longas distâncias de transmissão.

Na Figura 2.3, pode-se observar a descrição das redes sem fio e os protocolos em que cada rede está relacionada, conforme padronização do IEEE (2022).

As tecnologias de RF possuem características distintas, devido aos seus diferentes objetivos de desenvolvimento, relacionadas aos protocolos utilizados para comunicação entre os pontos e as regiões de frequências utilizadas, para estabelecer a potência de transmissão dos equipamentos, existindo vários padrões.

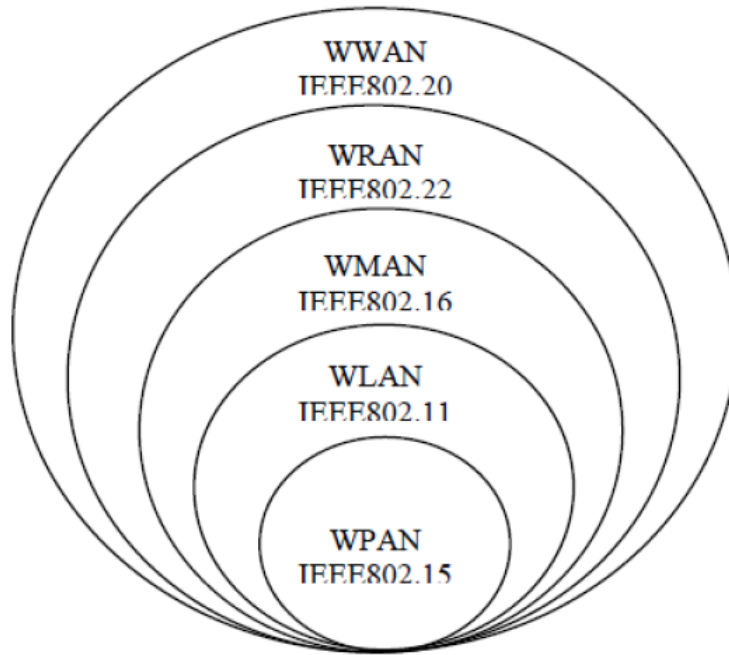


Figura 2.3: Padronização IEEE para redes wireless (Fonte: Adaptado de IEEE, 2022).

### 2.3.1 Banda de frequência ISM

A banda de frequência ISM (*Industrial Scientific and Medical*) é uma faixa de frequência separada para o desenvolvimento industrial, científico e médico. O espectro de frequência ISM é separado para desenvolvimentos livres, sem necessitar de licença, sendo elas de 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz. A região ISM é constituída por canais de frequência, que são faixas de espectros de frequência com largura definida. A banda ISM possui normas que limitam a potência de transmissão e as técnicas de modulação dentro dessas faixas de frequência. A limitação de potência é utilizada para limitar a interferência entre sistemas coexistentes, introduzida pela FCC e adotada pela Anatel no Brasil. Portanto, equipamentos operando dentro da mesma faixa podem causar interferência prejudicial. Não há limite para o número de transmissores e nenhum protocolo definido. Na banda ISM, há partilha de espaço com outros tipos de serviços e dispositivos, fazendo com que a interferência possa ser inevitável (POZAR, 2000).

A faixa de frequência ISM de 2,4 GHz é importante para as telecomunicações devido ao uso de múltiplas tecnologias de comunicação em diferentes dispositivos, que utilizam a banda de frequência para transmitir dados sem fio. Existem vários padrões *wireless*, que operam na região de frequência ISM de 2,4 GHz, inclusive alguns bastante utilizados como o bluetooth e o wi-fi, embora não venha a ser utilizado no trabalho. Estes tipos de tecnologias são bastante conhecidos e utilizados,

e foram analisados para entender o funcionamento de dispositivos que operam nessa banda de frequência ISM (GOMES; SPOHN, 2010).

Logo, para o desenvolvimento do sistema de telemetria, a utilização de dispositivos que operam na faixa de frequência ISM, como a de 2,4 GHz, é muito importante, pois, podem ser usados sem licença e estão sujeitas a regras de operação reduzidas, preocupando-se somente com o uso de tecnologias e abordagens que permitam uma operação eficiente contra eventuais interferências que possam ocorrer devido a coexistência de dispositivos na região de frequência (GOMES et al., 2012).

## **Wi-fi**

O wi-fi é baseado nas especificações do padrão IEEE 802.11. Os dispositivos que usam essa tecnologia podem operar em 2,4 GHz ou 5 GHz. O protocolo wi-fi é usado principalmente para atividades que exigem altas taxas de transferência, variando de 11 Mbps a 54 Mbps, em ambientes internos ou externos, com um raio de alcance de até 100 metros. Os padrões de wi-fi que operam nestas taxas de transferências são os tipos: a, b, g, n, e ac. (AZEVEDO, 2010).

Capaz de trabalhar com alto rendimento e transmissão, pode haver atraso nas transferências devido a pilha protocolar de comunicação ser grande. Possui alto consumo de energia comparado a outras tecnologias. Os dispositivos que usam essa tecnologia se comunicam com a Internet. Não possui um raio de alcance grande e a banda de frequência é limitada, comparado a outros tipos de tecnologias, como a de celular (SILVA, 2007). O wi-fi não foi utilizado no projeto, porém, foi estudado para entender o funcionamento de dispositivos que utilizam tecnologias que operam na região de frequência ISM.

## **Bluetooth**

O bluetooth é baseado de acordo com o padrão IEEE 802.15.1. Os dispositivos equipados com esta tecnologia também operam na banda de frequência de 2,4 GHz. Muito utilizado em transmissão de dados com distâncias menores. O consumo de energia desta tecnologia é baixo, pois, requerem muito menos potência, porém tem a desvantagem de que a área de cobertura é bem menor, com um alcance que, geralmente, varia de 0 a 10 m, com taxa de transferência de até 3 Mbps. A banda de operação também é bastante limitada comparado a outras tecnologias (AZEVEDO, 2010). Para o trabalho, o uso do bluetooth foi estudado para gerar uma comunicação do sistema com um dispositivo celular para apresentação simples de informações.

## Outros

Existem alguns outros tipos de tecnologias, que valem a pena serem mencionados, que trabalham com outras faixas de frequência, como: GSM (*Global System for Mobile Communications*), LoRa (*Long Range*), Zigbee, SigFox e outros. Embora não foram estudados e utilizados, são tecnologias que podem prover soluções em diversos projetos.

## 2.4 Comunicação wireless

O significado da palavra *wireless* deriva-se de *wire*, que significa fio, e *less*, que significa sem. É um tipo de comunicação em que a interação entre dispositivos, seja ponto a ponto ou ponto multiponto (com protocolo lógico adequado), ocorre sem o uso de nenhum tipo de cabo e, como visto, utiliza o meio de transmissão de propagação de ondas de rádio frequência (GOMES, 2016).

Normalmente, os sistemas de comunicação sem fio possuem uma configuração padrão, onde a arquitetura consiste num transmissor de dados, que é composto por componentes eletrônicos que enviam sinais de rádio frequência, que podem atravessar barreiras físicas, enviando as informações para um receptor, como mostra a Figura 2.4. Esse tipo de comunicação permite uma maior mobilidade do dispositivo, permitindo que sejam instalados em vários pontos distantes, dentro de seu alcance. Os dados dos receptores podem ser monitorados e analisados por sistemas supervisórios e processados por computadores (MATOS, 2004).

Tecnologias que proporcionam comunicação sem fio estão sendo desenvolvidas em massa e são encontradas em muitas aplicações em vários campos, como: aeroespacial, automotivo, industrial e automação residencial. Esse crescimento significativo é acompanhado por avanços tecnológicos, com foco cada vez maior na redução do custo de sua aplicação, tornando o uso da tecnologia mais acessível e valorizando o custo-benefício da implementação de novos sistemas de comunicação (AZEVEDO, 2010).

### 2.4.1 Sistema de transmissão RF

Os sistemas de RF usam ondas eletromagnéticas como elemento de comunicação entre o transmissor e o receptor. Essas ondas de RF viajam pelo espaço até chegar ao destino e serem captadas, como visto na Figura 2.4. Desta forma, a implementação e implantação de um sistema desta escala é bastante acessível, evitando o custo de emaranhar vários quilômetros de cabos, com as enormes vantagens de mobilidade e flexibilidade durante a instalação (MATOS, 2004).



Figura 2.4: Esquema padrão de uma comunicação sem fio (Fonte: O autor).

### Transmissor

Um transmissor é um componente eletrônico que gera um sinal de RF, que permite que os dados de telemetria cheguem a um receptor, ou seja, enviando os dados através de uma antena, por meio de propagação via rádio (MATTOS, 2004).

### Receptor

Um receptor é um dispositivo eletrônico que captura informações de um sinal de RF, enviado por um transmissor, pela antena. Uma vez recebidos, os dados podem ser processados e analisados em sistemas de monitoramento (BARBOSA, 2012).

### Antena

As antenas são dispositivos essenciais em qualquer comunicação via rádio frequência, sendo um meio para irradiar ou receber ondas de RF. As antenas convertem energia eletromagnética guiada em energia eletromagnética irradiada, e vice-versa. Só assim é possível a comunicação sem fio, entre o receptor e o transmissor (FIORESE, 2005).

## 2.5 Módulo wireless

O módulo *wireless* é um dispositivo que contém componentes eletrônicos que conseguem fazer a função de transmissão e/ou recepção de dados sem fio, via rádio frequência, estabelecendo uma comunicação entre dispositivos (ALVES, 2015). O módulo adotado neste trabalho consiste num *hardware* que opera na banda de frequência ISM de 2,4 GHz e não utiliza padrão wi-fi nem bluetooth, pois, como requisito, o sistema deve proporcionar comunicação e transmissão dados com alcances maiores, com baixo consumo de energia e, inicialmente, com taxa de transferência de dados baixa.

### 2.5.1 Transceptor nRF24L01+

Um transceptor é um dispositivo que pode realizar transmissão e recepção de dados. Desta forma, pode completar a função de enviar e receber dados ao mesmo tempo. O módulo utilizado para o desenvolvimento consiste num circuito integrado nRF24L01+ produzido pela Nordic Semiconductor (NORDIC, 2008). A Figura 2.5 ilustra o módulo *wireless* nRF24L01.

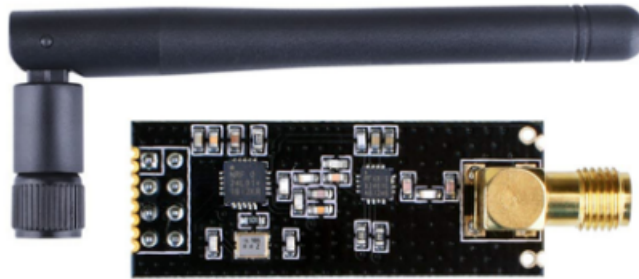


Figura 2.5: Módulo nRF24L01+ com Antena externa (Fonte: O autor).

O módulo nRF24L01+ é projetado para uso na banda ISM de frequência de 2,4 GHz, pode utilizar até 126 canais diferentes de banda de 1 MHz. Sua frequência de operação pode variar de 2,4 a 2,525 GHz. É adequado para aplicações sem fio de baixo consumo de energia, devido a ter um protocolo lógico integrado, o *Enhanced ShockBurst™* (GIARETTA, 2014). Segundo Nordic (2008), o *Enhanced ShockBurst™* é uma camada de enlace de dados baseada em pacotes com montagem e temporização automática de pacotes, reconhecimento automático e retransmissão de dados em pacotes entre dois dispositivos. Ele permite comunicação de baixo consumo e alto desempenho com microcontroladores, e seus recursos podem melhorar significativamente a eficiência energética de sistemas unidirecionais ou bidirecionais. O módulo possui parâmetros configuráveis como: canal de frequência, potência de saída e taxa de dados. Suporta taxas de transferência de dados de 250 kbps a 2 Mbps. Com uso de antena externa omnidirecional, num ambiente aberto (sem obstáculos), o alcance pode variar de 0 a 1000 m (usando taxa de 250 Kbps) (NORDIC, 2008).

O módulo utiliza a modulação de frequência GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*) ou modulação Gaussiana, na camada física. De acordo com Communications (2022), nesse tipo de modulação, o sinal digital passa por um filtro gaussiano antes de entrar no modulador, resultando numa redução na largura espectral, conforme mostrado na Figura 2.6, fazendo com que as ondas geradas sejam estreitas e ideais para redes sem fio de pequeno porte (MENEZES, 2017).

Para projetar um sistema de rádio usando o nRF24L01+, são necessários um microcontrolador e alguns componentes passivos. A interface de comunicação do



Figura 2.6: Funcionamento do filtro GFSK (Fonte: COMMUNICATIONS, 2022).

nRF24L01+ é através do protocolo de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI). A Tabela 2.1 mostra as informações mais relevantes sobre o módulo.

Um estudo apresentado por Christ et al. (2011) analisou a eficiência do uso do módulo nRF24L01 em redes de comunicação, neste estudo detectaram uma pequena taxa de perda de pacotes ao alterar o tamanho da mensagem e taxa de envio. Nisso, concluiu-se que a ineficiência do módulo depende de como o sistema é projetado. Portanto, para maximizar a eficiência do módulo, é necessário estudar e utilizar técnicas avançadas de construção de fluxos de rede e estratégias para tratamento de perda de pacotes.

Tabela 2.1: Datasheet do nRF24 com antena (Fonte: adaptado de NORDIC, 2010).

|                        |                     |
|------------------------|---------------------|
| Tensão de alimentação  | 1,9V – 3,6V         |
| Taxa de dados          | 250 Kbps a 2 Mbps   |
| Antena                 | 2 dBi               |
| Frequência de operação | 2400 MHz a 2524 MHz |
| Modulação              | GFSK                |
| Sensibilidade          | -95 dBm             |
| Corrente Máx. a 0dB    | 11,3 mA             |
| Ganho de PA            | 20 dB               |
| Ganho de LNA           | 10 dB               |
| Comprimento da antena  | 10,7 cm             |
| Dimensões              | 41 x 15,2 x 11 mm   |
| Alcance                | Até 1 Km            |

## 2.6 Microcontrolador

Um microcontrolador é um dispositivo eletrônico usado para controlar um sistema periférico que realiza ações diversas no dispositivo, dependendo da lógica atribuída ao sistema. Este sistema embarcado no microcontrolador só funciona devido a um oscilador que atua como relógio, executando instruções de forma síncrona (FERREIRA, 1998). Um microcontrolador é definido como um microcomputa-

dor, no qual o sistema está concentrado em um chip de circuito integrado (CI), com um núcleo de processador e memória. Podem ser utilizados em projetos de eletrônica de qualquer porte e em qualquer área, pois, podem realizar trabalhos de forma autônoma e em tempo real, com periféricos de entrada e saída programáveis (ARAUJO; SILVA; CAVALCANTE, 2019).

### 2.6.1 Sistema embarcado

Sistemas embarcados (*Embedded Systems*), são sistemas que contêm *softwares* incorporados num microprocessador ou microcontrolador, que executam um conjunto de tarefas definidas pelo programador no dispositivo microcontrolador, no qual se pode controlar ações nos periféricos de entrada e saída. Aqui, importa que esses sistemas são controlados por microcontroladores presentes no dispositivo para realizar tarefas específicas, como analisar valores analógicos, processar dados e, dependendo de um sistema lógico definido, fazer ações para controlar um sistema (WOLF, 2012). A Figura 2.7 ilustra como é composto um sistema embarcado, num diagrama de blocos.

Para o referente trabalho, foi escolhido o Arduino, um sistema de placa única, com uma interface programável.

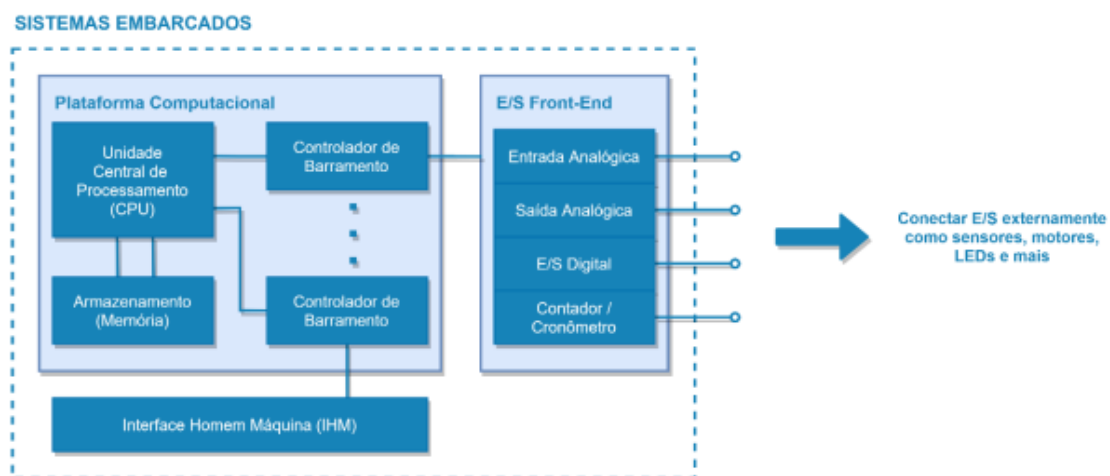


Figura 2.7: Diagrama de blocos de um sistema embarcado (Fonte: SAMPAIO, 2021).

### 2.6.2 Arduino

Pode-se dizer que o Arduino é um microcomputador programável, que pode processar sinais de entrada e saída entre o dispositivo e os componentes periféricos. O Arduino é uma plataforma de computação embarcada, ou seja, um sistema que interage com seu ambiente por meio de *hardware* e *software*. É uma plataforma

aberta, ou seja, composto de *hardware* e *software* livres, que podem ser alterados e configurados. Possui uma rede de cooperativismo e suporte para a solução de problemas e/ou dúvidas, através de fóruns. A placa arduino é uma plataforma compacta e de baixo custo, assim, melhorando custo-benefício de projeto (SILVEIRA, 2003; MCROBERTS, 2015).

As versões das placas arduino utilizadas no projeto foram: Arduino Uno e Arduino Nano, ilustradas na Figura 2.8. O microcontrolador mais utilizado e presente nestas placas arduino é o ATmega328. É o principal componente responsável por todo o processamento. O Arduino é um dos sistemas mais utilizados devido a sua facilidade de manutenção e integração com diversos projetos eletrônicos, incluindo sistemas de telemetria. Pois, em suas entradas digitais e analógicas podem ser usados componentes como: sensores e outros dispositivos eletrônicos que são importantes para um sistema de monitoramento por telemetria, no qual esses dados serão processados e analisados. Assim, o arduino mostra-se adequado para coleta de dados de telemetria, devido sua capacidade e versatilidade para esse tipo de prototipagem. É um dispositivo que pode ser utilizado em ocasiões de baixo consumo de energia (PAIVA, 2021). A Tabela 2.2 ilustra um comparativo entre placas arduino utilizadas, de acordo com suas especificações.

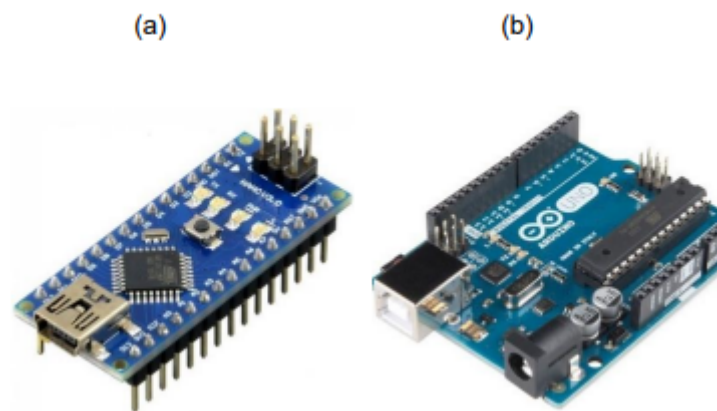


Figura 2.8: Placas Arduino Nano (a) e Arduino Uno (b) (Fonte: O autor).

Possui um próprio ambiente de desenvolvimento (IDE) baseado na linguagem C++. Podendo ser usado para desenvolver projetos de vários portes. É um ambiente que torna possível a implementação de códigos e provê comunicação entre a placa e a IDE, e é também nela em que há exibição de dados para o usuário, servindo como uma interface humano-máquina (RAMOS; ANDRADE, 2016). A Figura 2.9 ilustra a IDE do arduino.

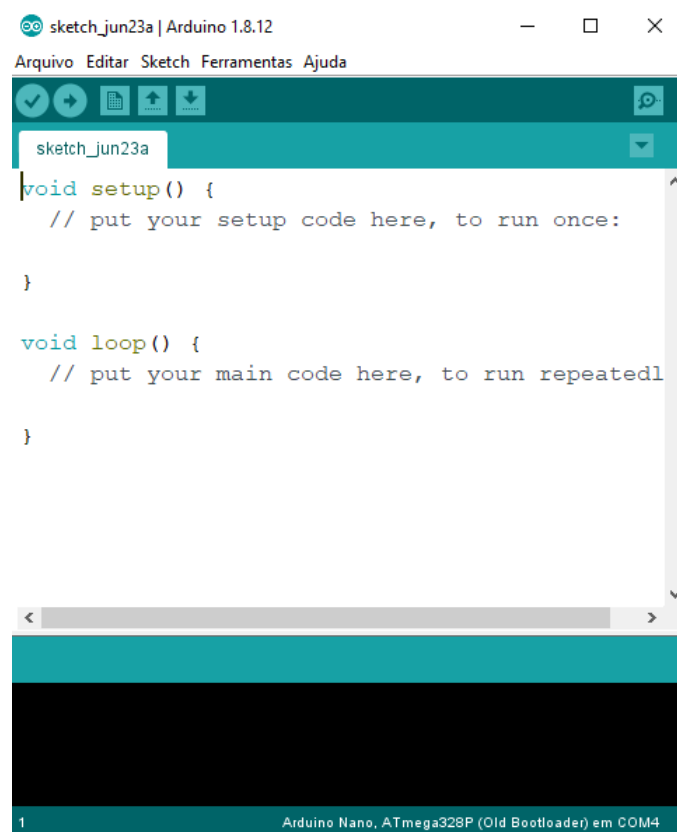


Figura 2.9: IDE do arduino (Fonte: O autor).

Tabela 2.2: Comparativo entre placas arduino (Fonte: O autor)

| Periférico da placa | Arduino UNO | Arduino Nano |
|---------------------|-------------|--------------|
| Microncontrolador   | ATmega328   | ATmega328p   |
| CPU                 | 16 MHz      | 16 MHz       |
| Conexões            | USB         | Mini USB     |
| Memoria Flash       | 32 KB       | 32 KB        |
| Mem.Bootloader      | 0,5 KB      | 2 KB         |
| SRAM                | 2 KB        | 2 KB         |
| EEPROM              | 1 KB        | 1 KB         |
| PWM                 | 6           | 6            |
| Portas Digitais     | 14          | 14           |
| Portas Analógicas   | 6           | 6            |
| IO Voltage          | 5 V         | 5 V          |
| IO Current          | 40 mA       | 40 mA        |
| I2C                 | 1           | 1            |
| SPI                 | 1           | 1            |
| UART                | 1           | 1            |
| Alimentação         | 7-12 V      | 7-12 V       |

## 2.7 Sensores

Para Wendling (2010), o termo sensoriamento é a operação de aquisição de dados de um sensor. Sensores são dispositivos que recebem e respondem a sinais e/ou estímulos, para medir grandezas físicas e gerar sinal elétrico proporcional à magnitude da quantidade medida. Um transdutor converte uma energia de grandeza física em outra. Normalmente, os sensores podem ser composto por transdutores e converter a energia em sinais elétricos, que podem ser utilizados num sistema de controle.

São dispositivos sensíveis a alguma forma de energia do ambiente, relacionada à grandeza física que precisa ser medida, como pressão, temperatura, aceleração, altitude, etc. Por isso, são utilizados em instrumentos de medição com indicações diretas e legíveis por humanos (WENDLING, 2010).

### 2.7.1 Sensor analógico

O sensor analógico pode mensurar qualquer valor, dentro da faixa de operação, ao longo do tempo. Variáveis analógicas são medidas com componentes de circuitos eletrônicos sensíveis a grandezas físicas. Os sensores analógicos produzem um sinal de tensão contínuo, proporcional ao que está sendo medido. Grandezas físicas, como temperatura, velocidade, pressão, deslocamento, tensão e outras, são analógicas (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

### 2.7.2 Sensor digital

Os sensores digitais produzem um sinal de saída digital cuja tensão representa o nível digital, ou seja, o nível de informação binária, 0 ou 1 (WENDLING, 2010).

### 2.7.3 Tipos de sensores

Existem muitos tipos de sensores, que variam de acordo com a finalidade e a grandeza física do sensoriamento que deseja-se mensurar.

#### Indutivo

Esses sensores são considerados componentes eletrônicos capazes de detectar a aproximação de objetos metálicos sem contato físico. O sensor é ativado quando um objeto metálico passa pelo seu campo magnético. Isso se deve ao fato de que a frequência do oscilador eletrônico varia com o fluxo magnético (WENDLING, 2010).

## **Capacitivo**

Também capaz de detectar objetos que se aproximam sem contato físico, devido a mudanças na capacitância. Isso se deve a alterações no campo eletrostático, gerado pelo sensor, quando algum tipo de objeto com massa se aproxima (WENDLING, 2010).

## **Térmico**

Esses dispositivos eletrônicos atuam nos circuitos elétricos, detectando mudanças de temperatura no meio em que estão inseridos, e convertem essas informações em sinais elétricos. Alguns exemplos são: termistores, termopar, NTC e PTC, que são resistores que diminuem ou aumentam sua resistividade em função da temperatura, entre outros (MATTEDE, 2022).

## **Fotoelétrico**

Esse tipo de sensor detecta alterações na quantidade de luz refletida ou bloqueada pelo objeto monitorado e consiste em uma fonte de luz, um sensor de luz, uma lente e uma saída. Esses sensores são muito rápidos e são utilizados quando é necessária uma resposta de detecção rápida. Alguns exemplos incluem: resistores dependentes de luz (LDRs), fotodiodos e fototransistores, como LEDs (WENDLING, 2010).

## **Outros**

Além dos sensores aqui relatados, há outros tipos de sensores que merecem destaque, como: GPS de navegação, sensores de pressão e mecânicos, que também podem ser utilizados em sistemas de telemetria, dependendo do objeto de sensoramento e do projeto.

# Capítulo 3

## Metodologia

Neste capítulo do trabalho é apresentado a metodologia utilizada para o estudo e desenvolvimento do sistema proposto, suas principais características, incluindo os componentes básicos de *hardware* e *software* utilizados, as variáveis monitoradas e a função do sistema supervisorio desenvolvido.

Primeiramente, foi feito um estudo e revisão sistemática da literatura nos bancos de dados Google acadêmico, Scielo e IEEE Xplore, nos idiomas português e inglês, referente aos últimos 20 anos, realizando o cruzamento das palavras chaves: telemetria, transmissão, sensores e comunicação sem fio. Com o propósito de analisar estudos acerca de aplicações desenvolvidas e tecnologias utilizadas para uso da telemetria, sendo selecionados cerca de 50 trabalhos mais relacionados.

Como resultado, foram definidos alguns equipamentos e módulos necessários que utilizam as formas de comunicação ditas como apropriadas e que fossem de baixo custo. Assim, foi determinado a utilização de um meio de transmissão de dados, por rádio frequência. Dessa maneira, o meio telemétrico selecionado para transmissão de dados foi o módulo transceptor nRF24L01+ com antena, que opera na faixa de frequência de 2,4 GHz. Para a escolha do módulo foram levados em consideração as seguintes características: frequência de operação, alcance em ambientes abertos e urbanos, a taxa de transmissão de dados e a largura de banda.

Para o sensoriamento de variáveis importantes para o trabalho, inicialmente, optou-se pelo uso do sensor térmico e barométrico, o BMP180. Para implementação, adotou-se a plataforma Arduino, que possui compatibilidade com os dispositivos mencionados e componentes necessários para o sistema. Para o desenvolvimento do sistema supervisorio, foi definido a utilização de *softwares* abertos, optando por dois *softwares*: O Node-RED e o App Inventor.

Portanto, o estudo foi estruturado nas seguintes etapas: revisão da literatura, definição do meio de transmissão, elaboração do sistema proposto, definição dos componentes de *hardware*, definição das características do sistema supervisorio, implementação do sistema, montagem do protótipo, testes e validação.

## 3.1 Sistema Proposto

O sistema foi idealizado para fornecer uma solução de monitoramento simultâneo, de múltiplos dados, em tempo real, por meio de telemetria, que permite um bom acesso aos dados gerados, ao mesmo tempo que proporcione uma comunicação eficiente. Através da metodologia de desenvolvimento de um sistema acessível utilizando dispositivos de baixo custo, fácil implementação e mobilidade.

O sistema implementado consiste num método de monitorar variáveis, utilizando transmissão sem fio, com um módulo *wireless*, que opera na banda de frequência de 2,4 GHz, através de módulos sensores instalados em máquinas, que estão distantes e em movimento, como: aeronaves não tripuladas de pequeno porte, podendo estender-se a outros tipos de veículos, em testes, ensaios ou apresentações. E que não dependa de conexão com internet e nem de sinal de rede telefonia móvel. E, por fim, através de um módulo denominado servidor, receber, processar os dados e apresentar essas informações, em tempo real, num sistema supervisorio, de maneira simplificada, com o objetivo de prover um sistema de comunicação por telemetria.

## 3.2 Variáveis monitoradas

As variáveis selecionadas, para serem analisadas, foram escolhidas baseadas de acordo com Mattos (2004), devido sua importância para um projeto de VANTs, e outros tipos de veículos, em geral. Para o referente trabalho, inicialmente, foram escolhidas três variáveis descritas a seguir.

### 3.2.1 Temperatura

A temperatura é uma importante variável a ser mensurada, pois, através dela é possível identificar superaquecimento ou resfriamento em locais, como no motor e na bateria, além da temperatura do ambiente. Dessa forma, monitorando a temperatura pode-se evitar problemas futuros e com a informação dela pode-se agir imediatamente para evitar e/ou resolver contratempos.

### 3.2.2 Pressão

A pressão atmosférica é uma importante variável a ser mensurada, pois, é essencial saber a que pressão o veículo está submetido. Através da medição desta variável, é possível medir, indiretamente, a altitude através do registro de alterações da pressão atmosférica que acompanham as variações de altitude a um ponto de referência, geralmente, ao nível do mar, podendo funcionar como um altímetro.

### 3.2.3 Altitude

A altitude é também uma importante variável a ser monitorada, pois, é uma grandeza que influencia no desempenho de um veículo aéreo. Através da sua estimativa, é possível determinar a quantos metros de altura encontra-se a aeronave, e dessa forma controlar seu voo, reagindo a problemas de forma precavida e evitar acidentes.

Então, em média, a altitude absoluta pode ser calculada em função da pressão, utilizando a fórmula barométrica internacional, mostrada na equação 3.1 (BOSCH, 2013).

$$H = 44330 * \left[ 1 - \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{1}{5,255}} \right] \quad (3.1)$$

em que,  $H$  é a altitude,  $P_0$  é a pressão de referência, geralmente, ao nível do mar (por padrão, 1013,25 hPa) e  $P$  é a pressão a que está submetido no momento.

## 3.3 Componentes utilizados

Nesta seção são apresentados os componentes de *hardware* principais utilizados para o desenvolvimento do sistema de telemetria proposto.

### 3.3.1 Arduino UNO

A placa arduino Uno é uma placa de código aberto com circuitos físicos programáveis. É baseado no microcontrolador ATmega328 da Atmel. O referido microcontrolador, possui um conjunto de pinos de entrada e saída que podem ser programados, através do *software* Arduino IDE, utilizando a linguagem de programação C++, como mostrado na Figura 2.9. A placa possui entrada de cabo USB Tipo B, para receber e enviar dados via serial. Pode ser alimentado pelo cabo USB, com uma tensão de 5V regulada, ou bateria externa, operando numa tensão entre 7V e 12V não regulada. De acordo com Atmel (2015), o microcontrolador possui arquitetura de 8 *bits*, frequência de 20 MHz, 2KB de RAM e 32KB de *flash*, que armazena *scripts* e executa instruções. Sua tensão de trabalho é de 5V. O Arduino Uno é a placa de desenvolvimento mais utilizada na família Arduino (POLASTRINI, 2016). O arduino UNO utilizado no trabalho está apresentado na Figura 3.1

O arduino UNO possui pinos de alimentação, 6 pinos de entrada analógica, 14 pinos de entrada e saída digital, dos quais alguns podem ser utilizados como saídas PWM de 8 *bits*. Também possui pinos de Tx e Rx, que são dedicados para o uso de comunicação serial. Tem pinos que também podem ser destinados para interface de comunicação SPI e I2C (*Inter-Integrated Circuit*) (ARDUINO, 2022b). A Figura 3.2 apresenta a pinagem da placa.



Figura 3.1: Arduino UNO (Fonte: O autor).

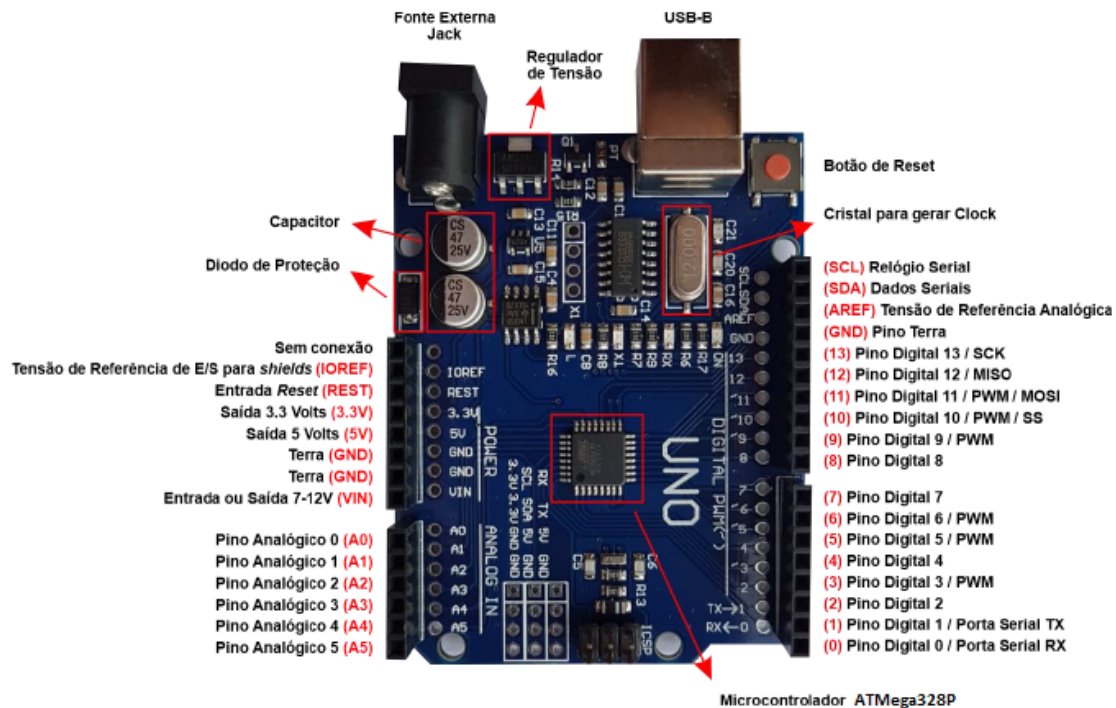


Figura 3.2: Pinagem do Arduino UNO (Fonte: O autor).

### 3.3.2 Arduino Nano

Trata-se de um microcontrolador para a plataforma Arduino, em uma versão bem compacta, utilizando um processador Atmega328p, o mesmo utilizado na plataforma Arduino Uno. A placa pode ser alimentada com bateria externa, com tensão entre 7V e 12V não regulada, ou pelo cabo USB, com tensão de 5V regulada, possui também 14 pinos de entrada e saída digital, em que 6 podem ser usados como saídas

PWM e outros que podem ser dedicados à comunicação SPI e I2C. Possui 8 pinos de entrada analógica, cristal de 16 MHz, *flash* de 32 KB, memória EEPROM de 1 KB, SRAM de 2 KB e entrada de cabo USB mini (ARDUINO, 2022a).

Este modelo foi escolhido devido a seu tamanho reduzido, permitindo ser utilizado em lugares compactos. É a placa de menor preço do mercado, atendendo aos requisitos de *design* e redução de custos. O Arduino Nano utilizado no trabalho e suas pinagens pode ser visto na Figura 3.3.

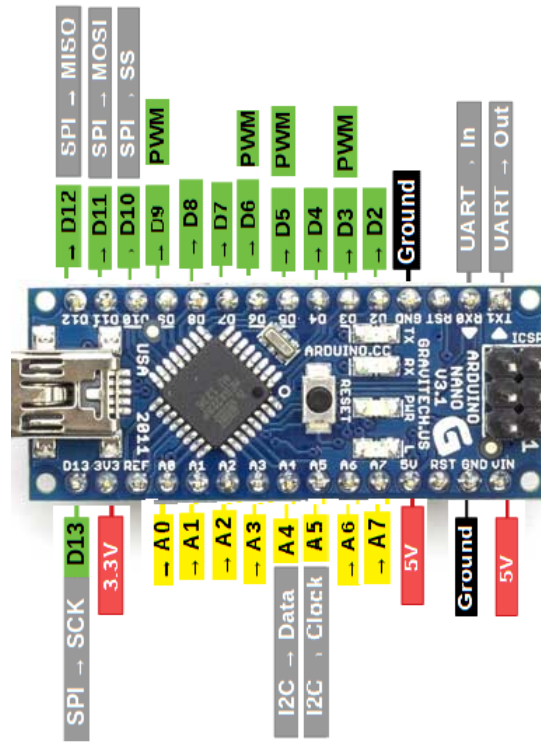


Figura 3.3: Arduino Nano utilizado (Fonte: O autor).

### 3.3.3 Transceptor nRF24L01

Produzido pela Nordic Semiconductor, o nRF24L01+ é um transceptor de rádio operando entre 2,4-2,5 GHz. Consiste em um sintetizador de frequência integrado, um amplificador, um cristal oscilador, demodulador, modulador e mecanismo de protocolo *ShockBurst*, com potência de saída e canais programáveis. Sua interface de comunicação com outros dispositivos adota o protocolo SPI. Sua alimentação e tensão de operação são de até 3,3V, corrente de 11,3 mA para transmissão, 13,5 mA para recepção e 26  $\mu$ A em *standby*, podendo operar numa faixa de -40°C até +85°C de temperatura. (NORDIC, 2008). A Figura 3.4 apresenta as pinagens do módulo utilizado no trabalho.

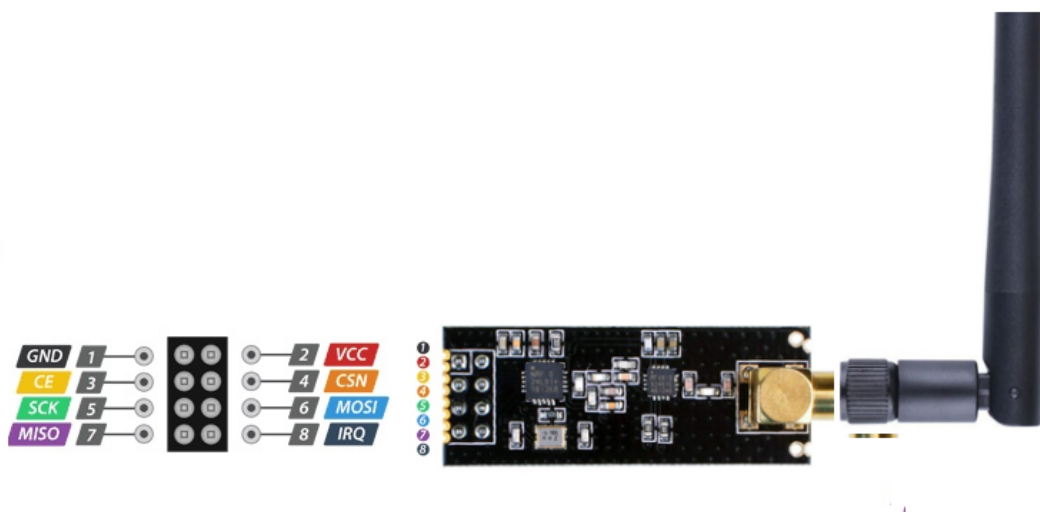


Figura 3.4: Pinagem do nRF24 e suas funções (Fonte: O autor).

Segundo Neto (2019), o módulo possibilita diversos tipos de comunicação entre dispositivos transmissor e receptor, podendo realizar mais de uma comunicação, através de todos os seus canais, permitindo que cada canal estabeleça comunicação com até seis dispositivos diferentes, multiplexando cada sinal de um dispositivo a um canal (NETO, 2019).

Na Figura 3.4, pode-se ver os pinos de configuração do módulo e suas funções:

- Pino CE: é responsável por controlar e ativar a comunicação com o chip;
- Pino IRQ: responsável por indicar erros na comunicação, indicando interrupções que podem vir a acontecer;
- Pinos SCK, CSN, MOSI e MISO: são pinos dedicados a interface de comunicação SPI.

É através da interface SPI que há comunicação entre o módulo nRF24 com o microcontrolador arduino, podendo trocar dados entre si. Criado pela Motorola, o SPI é um protocolo de comunicação serial síncrona, entre dois ou mais *hardwares* que operam em modo *full-duplex*, ou seja, trocam de dados em duas direções. Nesse tipo de comunicação, um dispositivo considerado como mestre, controla outro, considerado como escravo, e pode-se fazer requisição de dados direcionados para aquele dispositivo. Através do pino CS, o mestre seleciona o dispositivo com o qual quer conversar, envia dados pelo MOSI e recebe dados pelo MISO (FILHO; BARBOSA et al., 2012). A Figura 3.5 ilustra como fica a ligação entre dispositivos utilizando a interface SPI. Portanto, devido à compatibilidade do módulo com o arduino, seu baixo

custo de aquisição e baixo consumo de energia, optou-se por adotá-lo na realização da transmissão de dados por telemetria.

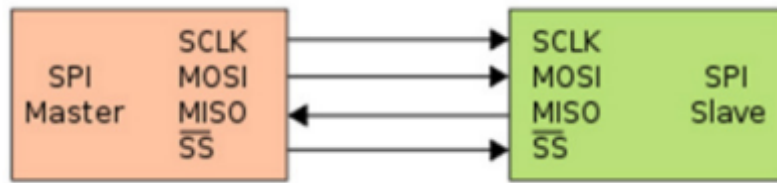


Figura 3.5: Esquema de ligação entre dispositivos com interface SPI (Fonte: FILHO; BARBOSA et al., 2012).

### 3.3.4 BMP180: Sensor de temperatura e pressão

É um sensor digital de pressão barométrica, que utiliza o chip BOSCH BMP180, com faixa de medição de 300 a 1100 hPa e resolução de 0,06 hPa (50 cm). Também pode ser usado como altímetro. Possui baixo consumo de corrente, até 5  $\mu$ A, e pode ser utilizado para medição de pressão e, indiretamente, para medição de altitude, utilizando os cálculos necessários. Trabalha com tensão de 1,8 a 3,6V e foi projetado para se comunicar com microcontroladores via I2C. Outra característica deste sensor é que ele também pode medir a temperatura. É indicado para utilização em equipamentos compactos (BOSCH, 2013). A tabela 3.1, apresenta mais especificações do sensor. A Figura 3.6 apresenta o sensor utilizado no projeto.

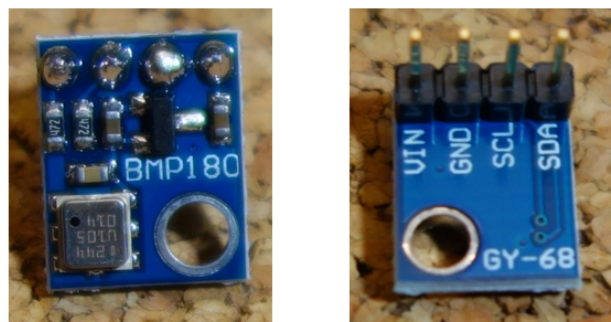


Figura 3.6: Sensor de temperatura e pressão BMP180 (Fonte: O autor).

Os pinos VIN e GND, são de alimentação e terra, respectivamente. Os pinos SCL e SDA, são dedicados a interface de comunicação I2C. Este protocolo de comunicação serial, foi desenvolvido pela Philips e nesse tipo de interface, um dispositivo dito como mestre, controla um dispositivo escravo. O mestre é quem controla a velocidade de *clock* do sistema, no pino SCL, e, geralmente, varia de 100 a 400 KHz. Através do pino SDA, o mestre envia o endereço do dispositivo escravo que

quer se comunicar e, após receber confirmação, o mestre, então, pode escrever ou ler dados do dispositivo escravo, ou seja, a troca de dados ocorre entre os dois sentidos (MUSSOLINI, 2011). A Figura 3.7 ilustra o esquema da interface I2C.

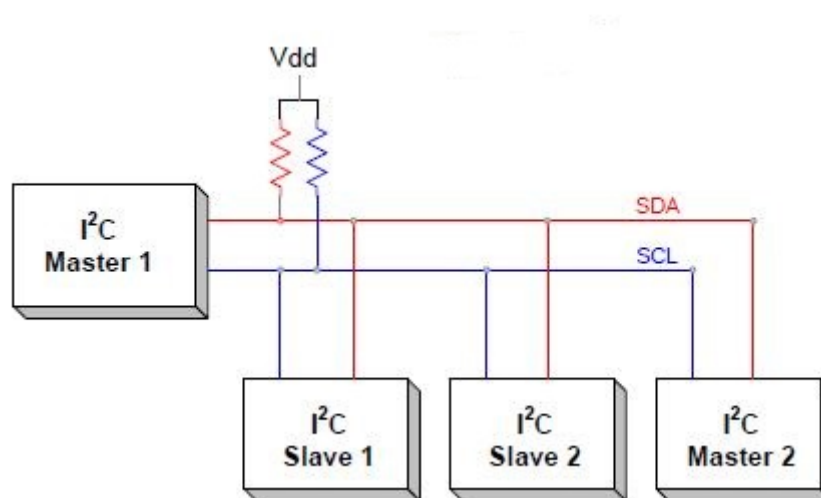


Figura 3.7: Esquema de ligação entre dispositivos através da interface I2C (Fonte: TEIXEIRA, 2022)

Tabela 3.1: Especificações do Sensor BMP180 (Fonte: O autor).

|                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| Tensão de alimentação | 1,9V – 3,6V        |
| Faixa de pressão      | 300 hPa a 1100 hPa |
| Faixa de altitude     | –500 m a 9000 m    |
| Resolução             | 0,06 hPa ( 50 cm)  |
| Consumo               | 5 $\mu$ A          |
| Tempo de reação       | 7,5 ms             |
| Dimensões             | 14 x 12 mm         |
| Interface             | I2C                |

### 3.3.5 Módulo bluetooth HC-05

O HC-05, oferece uma forma fácil e barata de comunicação sem fio, de curto alcance, via bluetooth. Possui configuração para trabalhar tanto como modo escravo quanto mestre. Ele possui duas interfaces: serial UART e bluetooth, através dos pinos Tx e Rx. Geralmente, possui um alcance de no máximo 10 metros e pode ser alimentado com até 5V. Sua tensão nos pinos digitais operam no máximo em 3,3 V e implementa protocolo bluetooth V2.0 (SANTOS; GASPAROVIC, 2018). Este módulo é compatível com arduino, o que torna mais fácil a implementação. A Figura 3.8 apresenta o módulo utilizado no projeto.



Figura 3.8: Módulo bluetooth HC-05 (Fonte: O autor).

No trabalho, o seu uso está, estritamente, ligado apenas para amostragem dos dados dos sensores, recebidos do sistema principal, com finalidade de deixar prático e rápido, a leitura dos dados supervisionados, com comunicação de curto alcance, gerando uma comunicação entre o módulo receptor e um dispositivo móvel.

### 3.3.6 Custos

A seguir na tabela 3.2 está representado os custos referentes aos *hardwares* que compõem os módulos de telemetria, para construção do sistema proposto. O custo total para construção do sistema de telemetria foi de \$33,32, que é equivalente a R\$174,00, na cotação atual.

Tabela 3.2: Orçamento dos componentes de hardware do sistema (Fonte: Shoppe).

| Componentes de Hardware | Preços ( \$ /unidade) | Quantidade | Total          |
|-------------------------|-----------------------|------------|----------------|
| Arduino UNO             | \$10,72               | 1          | \$10,72        |
| Arduino Nano            | \$7,66                | 1          | \$7,66         |
| nRF24L01+ (com Antena)  | \$4,21                | 2          | \$8,42         |
| BMP180                  | \$1,92                | 1          | \$1,92         |
| Módulo Bluetooth HC05   | \$4,60                | 1          | \$4,60         |
| <b>Total</b>            |                       |            | <b>\$33,32</b> |

## 3.4 Sistema supervisório

O sistema supervisório, foi idealizado para que os dados coletados dos sensores, possam ser apresentados e analisados em tempo real, sem necessitar de conexão com internet. De maneira que ofereça um sistema de monitoramento de variáveis, ao usuário, que está fora do sistema. Sendo possível supervisionar e analisar as variáveis e saber todo histórico de medições, pelo computador ou celular. Foram desenvolvidas duas versões de sistema supervisório, sendo eles: versão *desktop*, utilizando um notebook; e versão *mobile*, através de um aplicativo celular *android*, conectando o sistema ao celular, via bluetooth. Para o desenvolvimento do sistema, foram utilizados os seguintes *softwares*: Node-RED, para versão *desktop*, e o App inventor, para versão *mobile*. Nesse sistema, o usuário pode visualizar os dados coletados através indicadores e gráficos, tornando mais simples o monitoramento em tempo real.

Uma das características do sistema supervisório, é a existência de um painel visual, que contém todas as informações. Na versão *desktop*, contém uma aba destinada a cada tipo de medição, em tempo real, apresentadas por indicadores e gráficos. Também é capaz de armazenar as informações em arquivo. Já a versão *mobile*, possui uma tela contendo todas as informações coletadas dos sensores, em tempo real, podendo ser utilizado para casos de testes rápidos. Assim, melhorando a análise dos resultados e identificando possíveis anomalias.

### 3.4.1 *Softwares* utilizados

Nesta seção serão apresentados e descritos os *softwares* utilizados para o desenvolvimento do modelo dos sistemas supervisório.

#### Node-RED

O Node-RED é uma ferramenta de visualização *open source*, desenvolvida pela IBM, para desenvolvimento de programação visual baseada em fluxo de dados, onde as mensagens são passadas por caminhos pré-definidos e já estruturados, desenvolvido em linguagem JavaScript. Originalmente, foi desenvolvido para implementar, criar e/ou conectar dispositivos de *hardware* IoT (Internet of Things), APIs e serviços, e outros (MOREIRA; NASCIMENTO, 2020).

Possui um editor baseado em navegador, compatível com todos os *browsers*. Além de simples, ajuda a conectar fluxos usando “nós” e pode ser usado em qualquer sistema operacional. A plataforma inclui uma forma mais simples e versátil de programação, para conectar vários tipos de dispositivos, incluindo o Arduino. Sua programação consiste no uso de nós, que são blocos de código, que podem inserir ou

emitir dados. Cada nó é desenvolvido de forma genérica, para que possa ser reutilizado em aplicações. Nesta estrutura, os nós trocam mensagens entre si, no formato JSON (*JavaScript Object Notation*). Também é possível criar funções, modelos ou fluxos JavaScript, que existem em bibliotecas internas. O Node-RED também é capaz de criar interfaces gráficas, para mediar a comunicação entre usuários e sistemas, armazenar e coletar dados em bancos de dados, criar eventos acionados por tempo e coletar dados (MOREIRA; NASCIMENTO, 2020). Para utilizar a ferramenta é necessário fazer a instalação dela no computador. A Figura 3.9 apresenta o ambiente de desenvolvimento Node-RED.

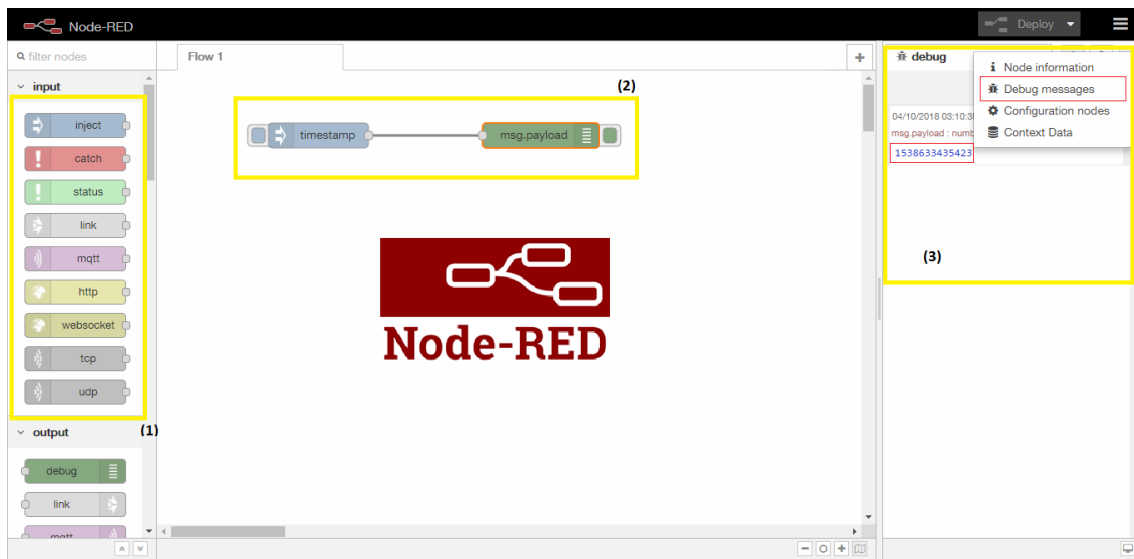


Figura 3.9: *Layout* do Node-RED (Fonte: O autor).

No *layout* mostrado na Figura 3.9, a barra lateral esquerda, indicada por (1), apresenta uma lista de nós, que contém funções específicas, que podem ser utilizados no programa. O espaço para implementação é indicado por (2), e a barra lateral direita, indicada por (3), contém três abas que mostram informações gerais, *debug* para depuração e configuração de *dashboards*.

Para o referente trabalho, esta ferramenta será utilizada para criar um *dashboard*, que é um painel visual, contendo todas as informações do sistema de monitoramento, e estabelecer uma conexão entre um computador e um arduino, que receberá os dados via telemetria, utilizando comunicação serial. Criará um servidor local, no qual o *dashboard* de supervisão do sistema proposto poderá ser acessado. Também processará e apresentará, de forma rápida e fácil, os dados dos sensores, em tempo real, no sistema de monitoramento desenvolvido, com o objetivo de tornar fácil e versátil a supervisão.

## App Inventor

Desenvolvido pelo Google e pelo MIT, o App Inventor é uma linguagem de programação visual, para implementação e criação de aplicativos simples em dispositivos móveis, baseados em *android*. Sua IDE é baseada em programação com blocos, porém, diferencia-se por permitir que os usuários criem aplicativos que contenham qualquer tipo de serviço, como: interação com sensores e leitura de dados. O tipo de programação é orientado à eventos, ou seja, o comportamento dos componentes utilizados dependem da interação do usuário com a aplicação. A ferramenta é bastante utilizada para desenvolvimento de interfaces para trabalhar com IoT (FINIZOLA et al., 2014).

O desenvolvimento de aplicativos, nesta ferramenta, ocorre através de duas janelas: Designer e Blocos. A janela Designer permite projetar visualmente e personalizar a interface do aplicativo do usuário, clicando e arrastando os componentes (botões, caixa de texto e outros), como pode ser visto na Figura 3.10.

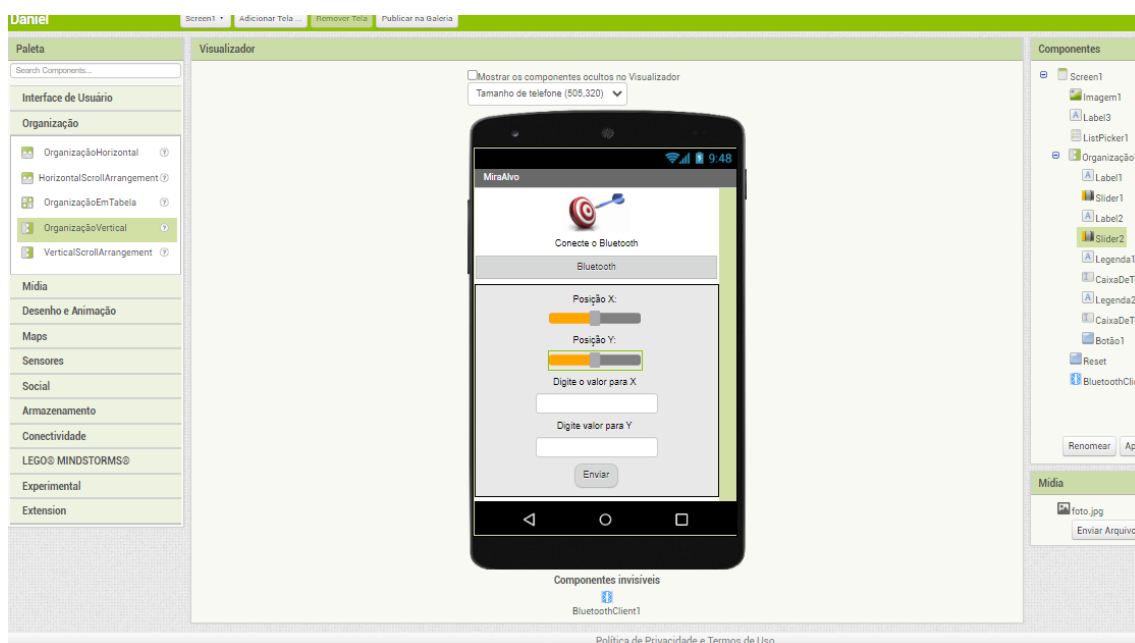


Figura 3.10: *Layout* da janela Designer do App inventor (Fonte: O autor).

Na janela blocos, que pode ser vista na Figura 3.11, é onde é feito a implementação de controle do comportamento dos componentes usados. Nesta janela, o usuário pode encontrar blocos plugáveis, que podem ser eventos ou métodos, em uma interface de arrastar e soltar. Nesta aba é montada toda a lógica de programação. Esses blocos realizam várias operações: controle de condição, manipulação de *strings*, operações matemáticas e outros. Após a compilação, é gerado um arquivo .apk, que pode ser baixado e instalado num dispositivo móvel. A Figura 3.11 ilustra um exemplo de implementação na janela de blocos no App inventor.

Para o trabalho, a utilização desta ferramenta foi para criar um aplicativo para dispositivos móveis, que contenha um painel visual do sistema de monitoramento, apresentando as informações das variáveis monitoradas em tempo real. O objetivo do uso é de criar uma interface simples e de uso rápido, como alternativa para usar em testes rápidos de campo e em locais que não seja possível usar um *notebook* ou computador. A troca de mensagens do módulo, que irá receber os dados via telemetria, com o aplicativo celular será por meio de bluetooth. Então, o aplicativo terá uma aplicação de conexão bluetooth. O meio físico para isso, será o módulo bluetooth HC05, componente que torna transparente uma comunicação sem fio, via bluetooth.

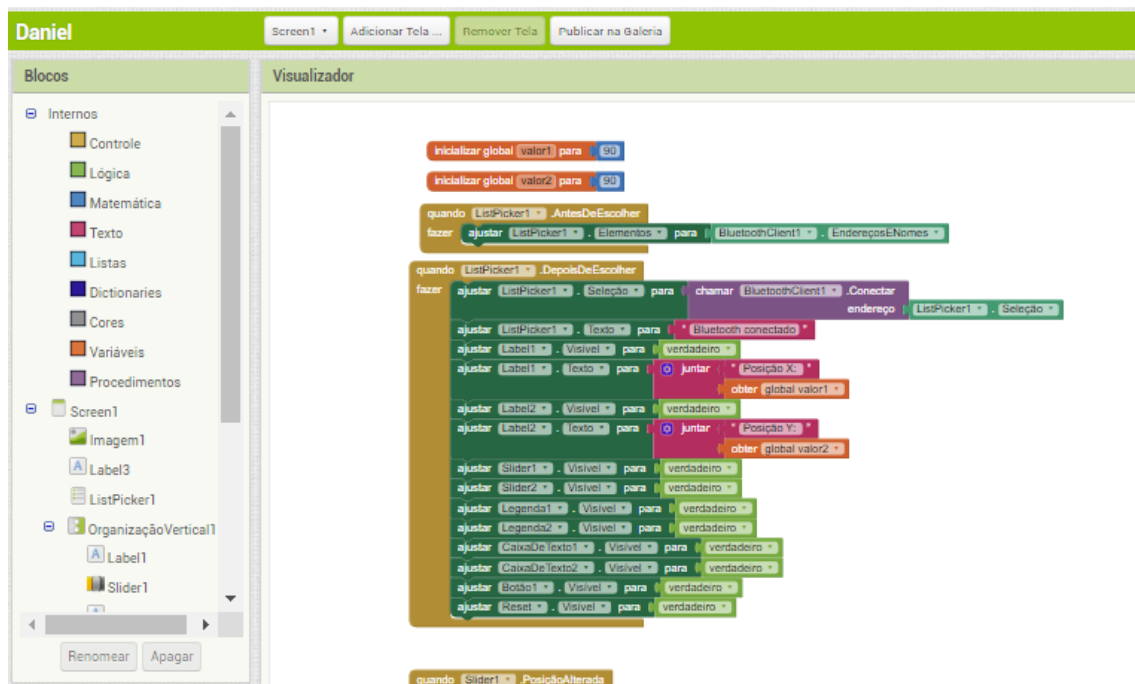


Figura 3.11: *Layout* do Editor de blocos no App inventor(Fonte: O autor).

# Capítulo 4

## Desenvolvimento

Neste capítulo são apresentados detalhes da realização do desenvolvimento e implementação do sistema de telemetria, proposto no projeto. Para o desenvolvimento da solução, o projeto foi dividido em 3 módulos, sendo eles: módulo sensor, módulo servidor e sistema supervisorio.

O sistema de telemetria, proposto no trabalho, consiste na transmissão de dados sem fio, proveniente dos módulos sensores, que são instalados nos VANTs (ou outros veículos), que o usuário deseja supervisionar e esses dados são recebidos e processados pelo módulo servidor e, posteriormente, exibidos no sistema supervisorio. O sistema funciona conforme a Figura [4.1](#)

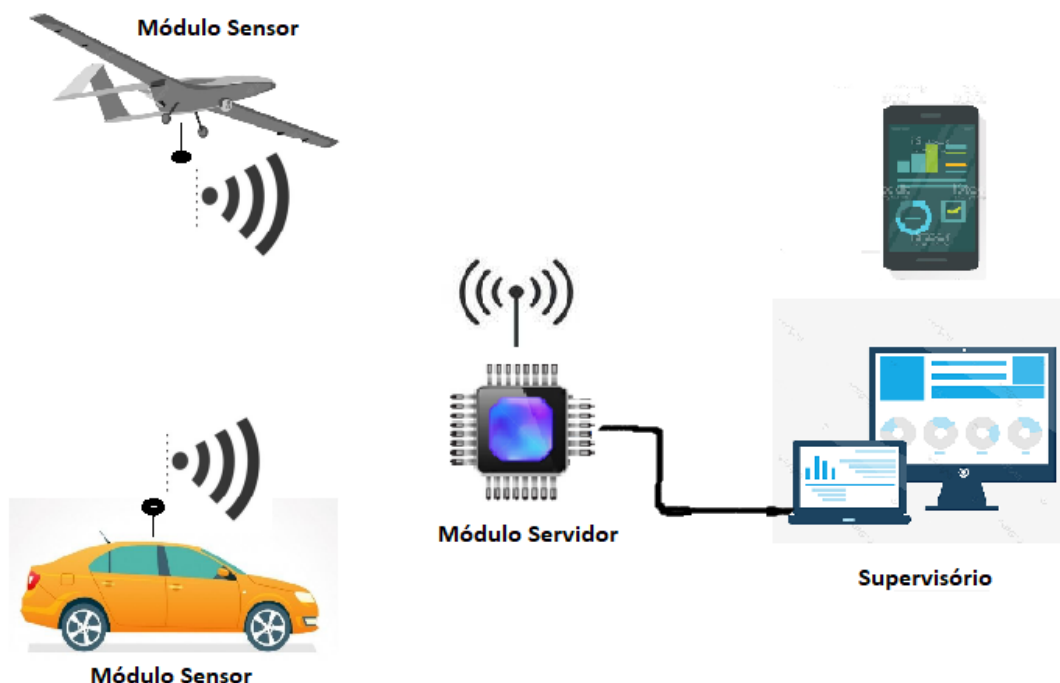


Figura 4.1: Esquema de funcionamento do sistema de telemetria proposto (Fonte: O autor).

A seguir é apresentado como foi desenvolvido os módulos do sistema.

## 4.1 Módulo sensor

O módulo sensor é responsável por fazer a aquisição dos dados importantes, que serão monitorados pelo sistema, e transmitir essa informação. O desenvolvimento do módulo foi dividido em duas etapas: *hardware* e *firmware*, que serão descritas a seguir.

### 4.1.1 Hardware

O *hardware* do módulo sensor é composto pelos seguintes componentes: sensor BMP180, arduino Nano e o transceptor nRF24L01+. O sensor BMP180, irá fazer a obtenção dos dados de temperatura e pressão do sistema, que também servirá para estimar, indiretamente, a altitude. O transceptor, irá ser responsável pela transmissão sem fio dos dados. O arduino, é o microcontrolador que irá fazer todo processamento, controle, gerenciamento dos dados e do funcionamento do módulo sensor, em geral. A Figura 4.2 apresenta o esquema de ligação entre os componentes da montagem do protótipo do módulo sensor.

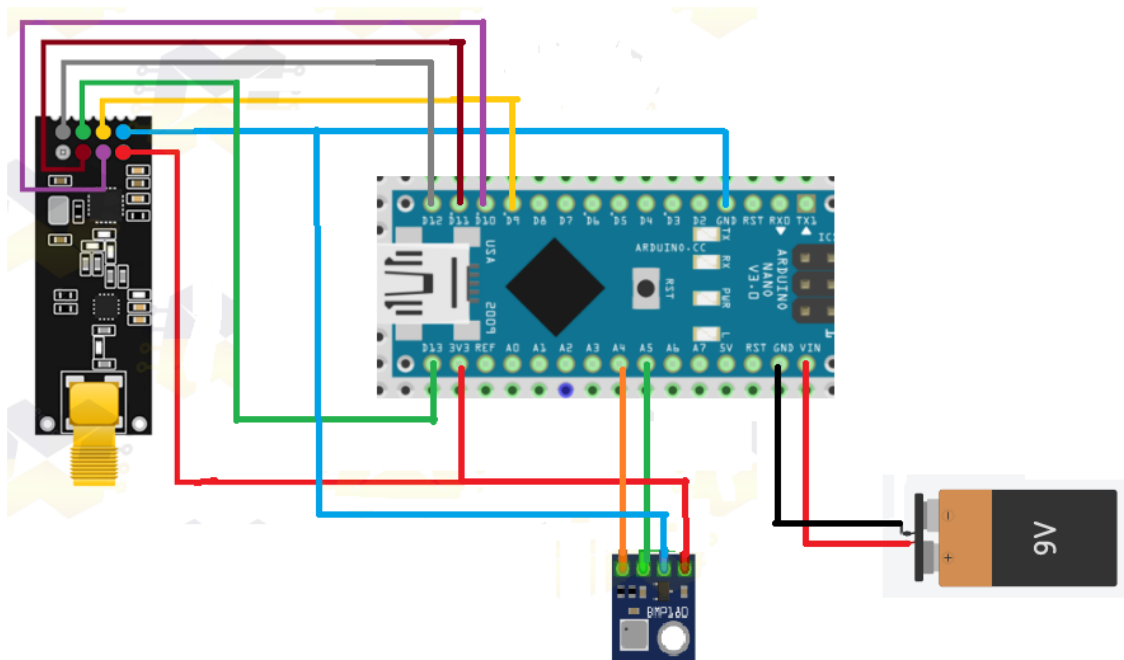


Figura 4.2: Esquema de ligação da montagem do módulo sensor (Fonte: O autor).

Conforme a Figura 4.2, para o módulo sensor, foi escolhido o arduino nano, por ele ser compacto para instalação em locais pequenos, sem ocupar muito espaço.

A bateria de 9V é usada para alimentação do módulo sensor, sendo conectado ao pino  $V_{in}$  e GND do arduino Nano. O transceptor nRF24L01+ e o sensor BMP180 necessitam de uma tensão de 3,3V de alimentação, por isso, seus pinos de  $V_{cc}$  foram conectados no pino 3V3 e GND do arduino, para receberem essa tensão e serem alimentados.

O sensor BMP180, foi ligado nos pinos de barramento I2C do arduino, pois, ele se comunica utilizando essa interface. Os pinos SDA e SCL, do sensor, foram ligados nos pinos A4 e A5, respectivamente, do arduino, que também são dedicados para protocolo de comunicação I2C. Já o transceptor nRF24L01+, se comunica com o microcontrolador através da interface SPI. Assim, para que haja a comunicação entre os dispositivos, o componente foi ligado nos pinos dedicados ao barramento de comunicação SPI do arduino. Os pinos SCK, MISO, MOSI, CSN e CE são conectados aos pinos digitais D13, D12, D11, D10 E D9, respectivamente, do arduino Nano. A Figura 4.3 apresenta melhor o esquema de ligação dos pinos dos componentes com o microcontrolador, no ambiente de simulação.

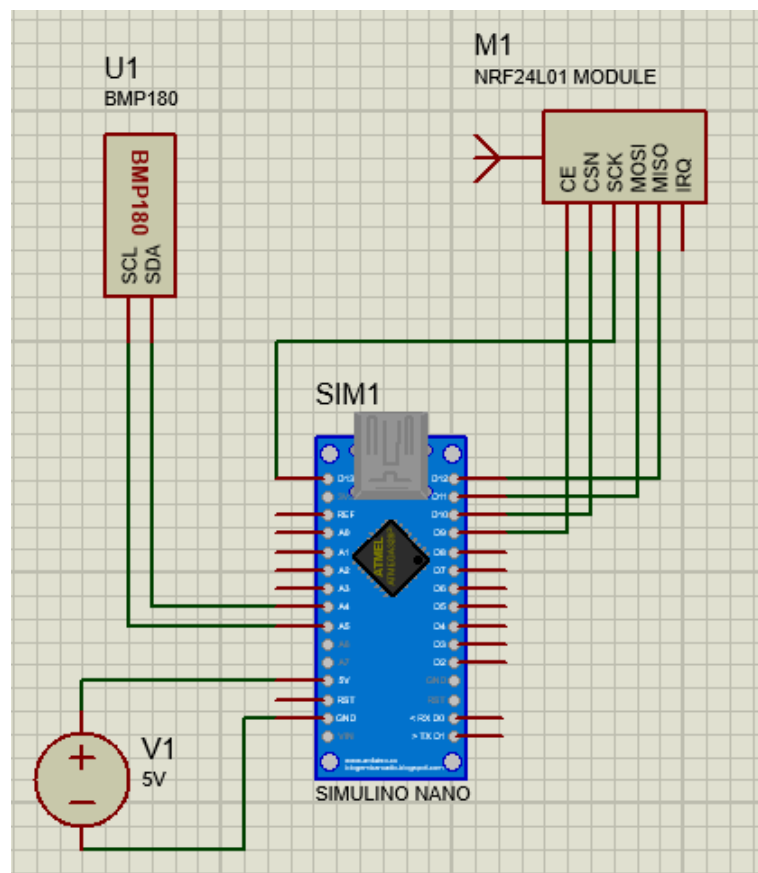


Figura 4.3: Esquema de ligação do módulo sensor no ambiente de simulação (Fonte: O autor).

A Figura 4.4 apresenta o protótipo do módulo sensor, montado na *protoboard*, que foi utilizado para o projeto e para os testes de validação do sistema.

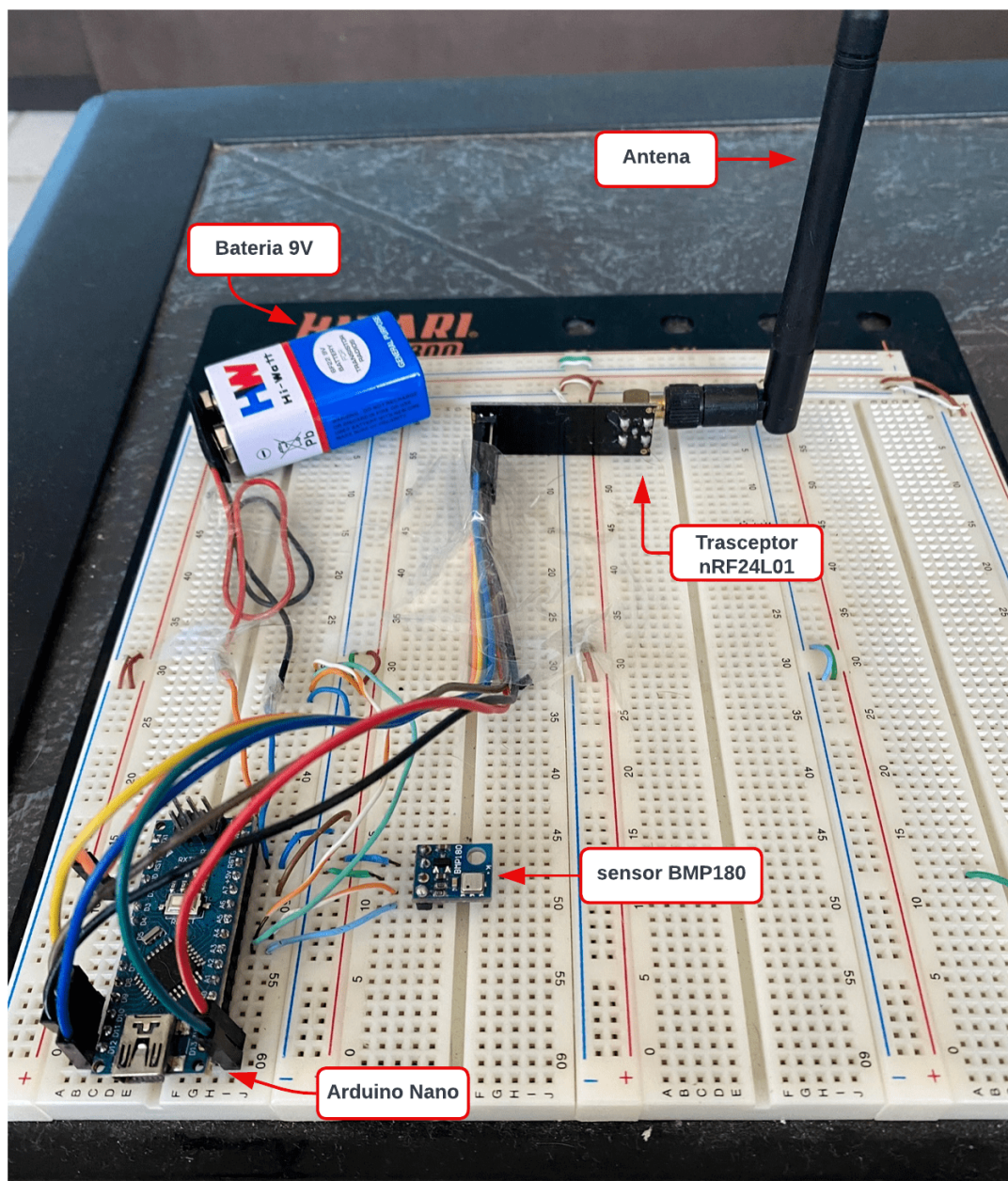


Figura 4.4: Protótipo do módulo sensor (Fonte: O autor).

#### 4.1.2 *Firmware*

O *firmware* do módulo sensor foi desenvolvido na IDE do arduino. Para este módulo, o *firmware* contém o sistema embarcado com toda a lógica de funcionamento geral do módulo, desde a aquisição, armazenamento e a transmissão dos dados, sem que haja perda de informações, que serão descritos a seguir. Para o desenvolvimento do código, foram utilizadas as seguintes bibliotecas: RF24.h, nRF24L01.h e RF24Network.h, que são *drivers* que fornecem interface com APIs para o dispositivo *wireless*; SFE\_BMP180.h e Adafruit\_BMP085.h, *drivers* responsáveis por oferecer

uma interface com APIs para o BMP180; Wire.h e SPI.h, *drivers* que fornecem APIs para utilização de funções com interface I2C e SPI, respectivamente.

O funcionamento do módulo é definido por um fluxo de estados, em que são feitas as operações de aquisição dos dados, transmissão das informações e checagem de confirmação de recebimento dos dados. A Figura 4.5 apresenta o fluxograma básico de funcionamento do módulo sensor.

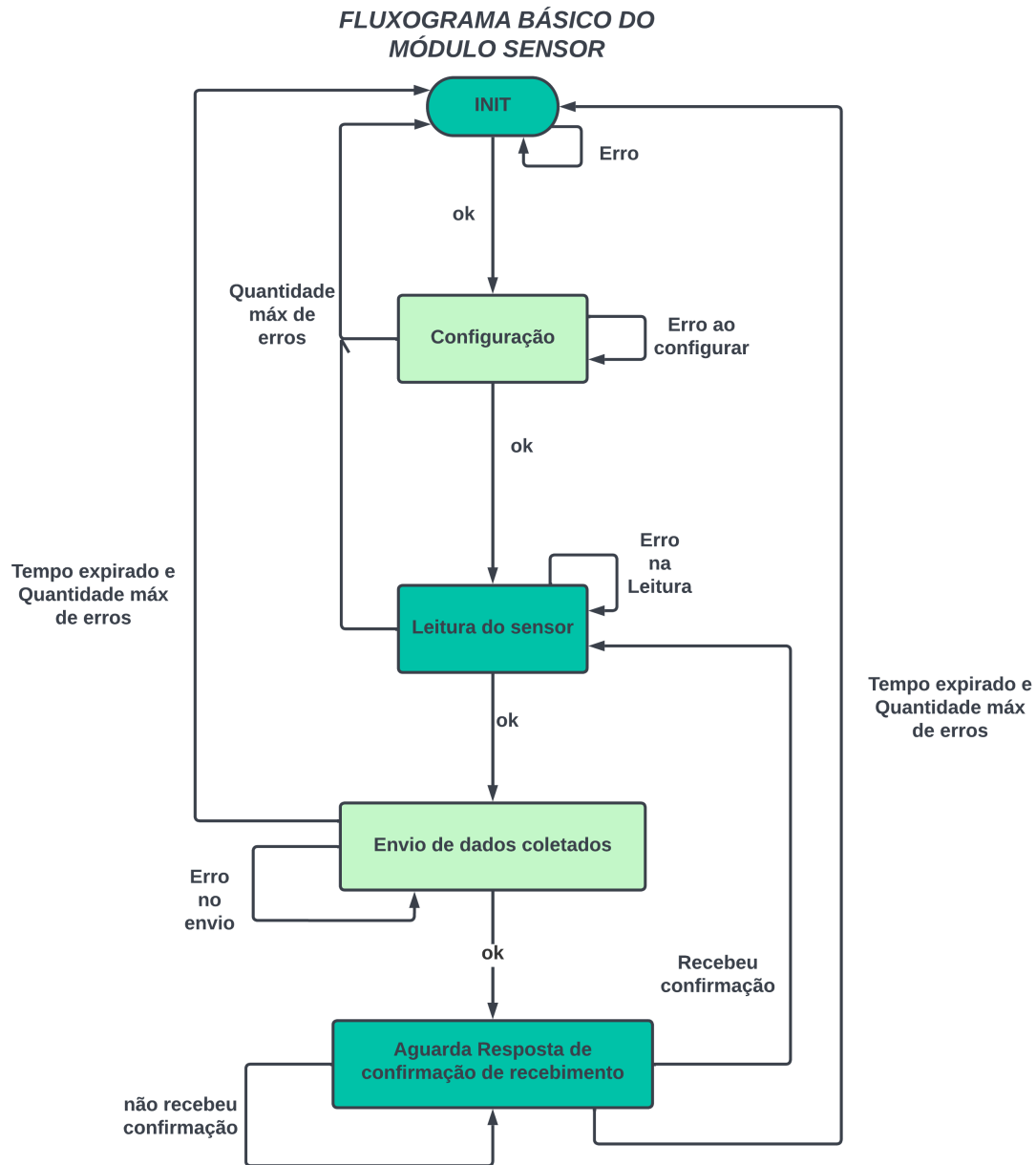


Figura 4.5: Fluxograma básico do funcionamento do módulo sensor (Fonte: O autor).

Ao alimentar, o módulo é iniciado. Primeiramente, é feito a inicialização do rádio, do sensor e da rede de comunicação, que será ponto a ponto. Após o módulo ser iniciado com sucesso, passa para o estado de configuração do sensor e do trans-

ceptor, onde são configurados os parâmetros necessários do dispositivo como: o canal de frequência, utilizado para comunicação dos módulos, o nível da potência de transmissão, taxa de transmissão e a calibração do sensor. Caso ocorra erro na configuração é incrementado uma variável de falha, denominada como “*contFailConfig*”. Se numero máximo de tentativas falhas de configuração for ultrapassado, o modulo é reinicializado e o contador é resetado.

Após fazer a configuração com sucesso, o módulo está apto a fazer a leitura dos dados do sensor, armazená-los e prepará-los para envio. Os dados obtidos pela leitura do sensor são armazenados num buffer *payload*, que é uma estrutura, que segue o formato indicado na Figura 4.6, que contém os dados dos valores de temperatura, pressão e altitude, que fica salvo na memória RAM e serão transmitidos posteriormente. Caso ocorra erro de leitura é incrementado uma variável de falha, denominada como “*contFailSensing*”. Se numero máximo de tentativas falhas de leitura for ultrapassado, o modulo é reinicializado e o contador é resetado. Ao fazer a leitura do sensor com sucesso, o módulo transmitirá os dados.

```

/*
 * Estrutura payload da mensagem a ser enviada
 */
typedef struct {
    float temperatura;
    float pressao;
    float Altitude;
}payload_t;

```

Figura 4.6: Formato da estrutura *Payload* da mensagem a ser enviada ao módulo servidor (Fonte: O autor).

No estado de transmissão, é iniciado um *timer*, denominado como “*timerSendData*”, que indica o tempo máximo (*timeout*) em que a mensagem seja enviada com sucesso. Caso ocorra erro no envio da mensagem, enquanto o tempo não expirar, o módulo continua tentando enviar a mensagem. Caso esse tempo expire e a mensagem ainda não tenha sido enviada, é incrementado uma variável de falha, denominada como “*contFailSendData*”, que possui uma quantidade máxima de tentativas de envio. Se o tempo expirar novamente e o numero máximo de tentativas falhas for ultrapassado, o modulo é reinicializado e o contador é resetado, iniciando novamente o sistema, atualizando a rede para fazer nova leitura. Os dados são armazenados no *buffer*, ao conseguir comunicação, todos os dados armazenados são transmitidos. Se o envio foi feito com sucesso, o módulo vai para o estado de aguardar resposta de confirmação.

No estado de aguardo de confirmação, o módulo espera retornar uma resposta de recebimento, que é uma *flag* que indica o recebimento, enviada por parte do módulo servidor. Também é iniciado um *timer*, denominado como “*timerReceiveAck*”, que indica o *timeout* que o módulo pode aguardar resposta de confirmação dos dados enviados anteriormente. Da mesma forma, se ainda não recebeu confirmação, enquanto o tempo não expirar, o módulo continua aguardando resposta de recebimento. Caso esse tempo expire e ainda não tenha recebido a confirmação, é incrementado um contador de falha, denominado como “*contFailReceiveAck*”. Se o tempo expirar e o número máximo de tentativas falhas for ultrapassado, o módulo será reinicializado, resetando o contador. Porém, se recebeu confirmação, o módulo irá fazer nova leitura dos dados e a variável *payload* poderá ser modificada pelos novos valores obtidos, para serem transmitidos de maneira rápida e eficiente, além de resetar os *timers* e contadores para valores iniciais.

A reinicialização é para garantir que o módulo não fique travado. Assim, o módulo passa a ter fluxos alternativos de operação, deixando-o dinâmico, para casos de erros. Desta maneira, o módulo fica num ciclo de funcionamento de aquisição e transmissão de dados. Para funcionamento do módulo, foi utilizado um *timeout* de 3s para o “*timerSendData*” e o “*timerReceiveAck*”, e uma quantidade máxima de 2 tentativas falhas para os contadores “*contFailReceiveAck*”, “*contFailSendData*”, “*contFailSensing*” e “*contFailConfig*”.

## 4.2 Módulo servidor

O Módulo servidor é responsável por receber as informações adquiridas pelo módulo sensor, tratar e encaminhá-los para o sistema supervisório. O desenvolvimento do módulo servidor foi dividido em 2 etapas: *hardware* e *firmware* que são descritas a seguir.

### 4.2.1 Hardware

O *hardware* do módulo servidor é composto pelos seguintes componentes: arduino Uno, transceptor nRF24L01+ e módulo bluetooth HC-05. O HC-05 é responsável por se comunicar com o aplicativo *mobile* de supervisão e fazer a transmissão das informações para o celular, via bluetooth. O transceptor fará a recepção dos dados. O arduino irá fazer todo funcionamento, processamento e tratamento dos dados para serem passados e apresentados pelos supervisórios. No módulo servidor foi utilizado o arduino Uno, embora possa ser usado também, sem mais problemas, o arduino Nano. A Figura 4.7 apresenta o esquema de ligação para montagem do protótipo do módulo servidor.

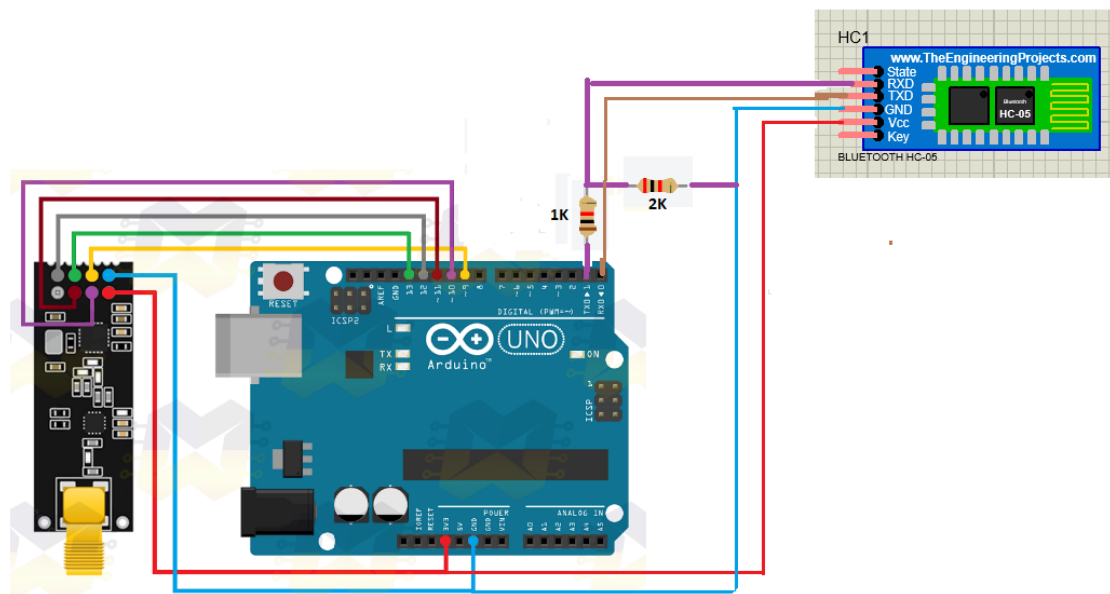


Figura 4.7: Esquema de ligação da montagem do módulo servidor (Fonte: O autor).

Conforme a Figura 4.7, o principal componente do módulo servidor é o arduino Uno. A alimentação do módulo também poder ser feita com uma bateria de 9V conectada ao pino VIN e GND, ou conectando o cabo USB no computador. A troca de dados entre o módulo servidor e os supervisórios será feito por comunicação serial, através da UART (ou USART) do arduino, para o supervisório *desktop*, e comunicação bluetooth, para o supervisório *mobile*. Portanto, para que haja comunicação com o sistema supervisório *desktop*, deve-se conectar o cabo USB no computador, que fará com que a placa também seja alimentada.

O transceptor nRF24L01+ necessita de uma tensão de 3,3V para operar e o HC-05 necessita de uma tensão de até 6V. Por isso, seus pinos de  $V_{cc}$  foram conectados aos pinos 3V3 e 5V, respectivamente, e GND do arduino, para serem alimentados. O transceptor comunica-se com o arduino através da interface SPI, portanto, a ligação dos pinos do nRf24L01+ deve ser feita no barramento SPI, da mesma maneira como indicado no módulo sensor. O HC-05 possui uma interface serial UART, então, para transmitir os dados que foram recebidos, provenientes do módulo sensor, para o aplicativo celular, via bluetooth, é conectado o pino Rx do arduino no Tx do HC-05, e o pino Tx do arduino no Rx do HC-05. O uso dos resistores de  $1K\Omega$  e  $2K\Omega$  é para fazer um divisor de tensão, para que o sinal de tensão 5V, que sai do arduino e que vai para o pino Rx, seja 3V3, pois, o pino de entrada Rx do módulo HC-05 suporta tensão até 3,3V. A Figura 4.8 apresenta melhor o esquema de ligação dos pinos dos componentes com o arduino, no ambiente de simulação. A Figura 4.9 apresenta o protótipo do módulo servidor.

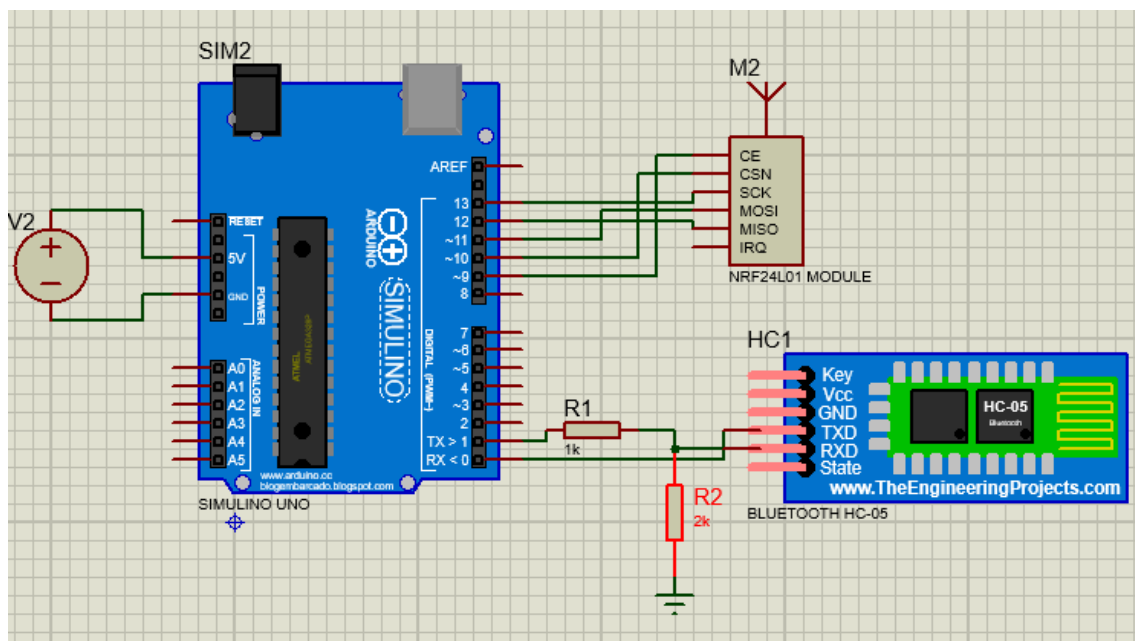


Figura 4.8: Esquema de ligação do módulo servidor no ambiente de simulação (Fonte: O autor).

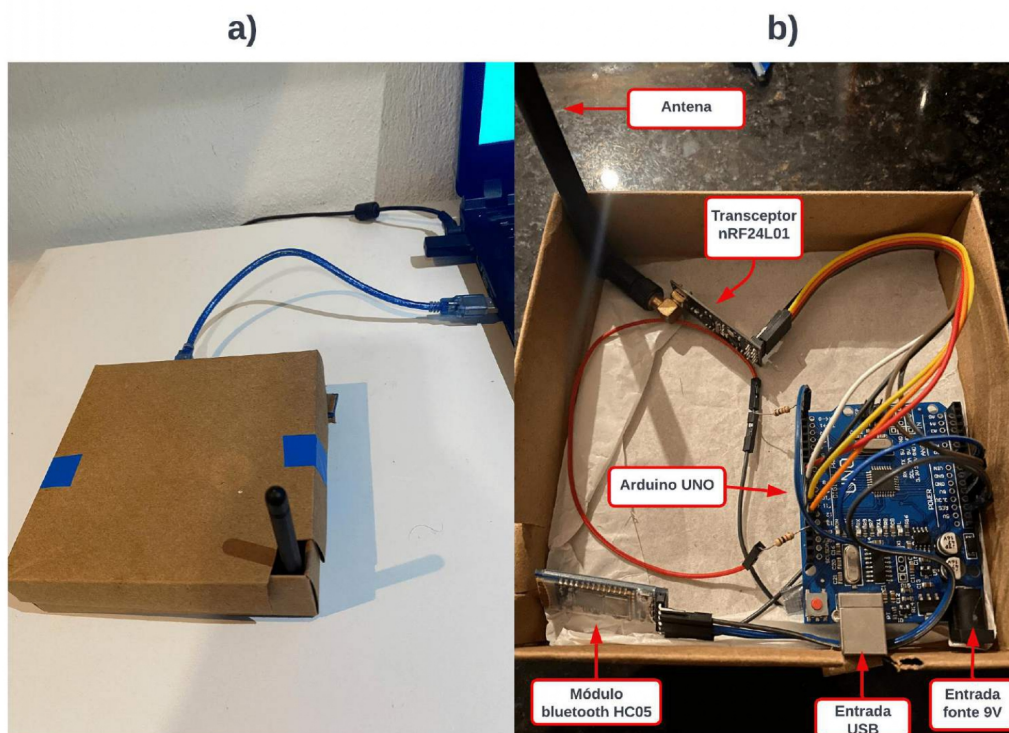


Figura 4.9: (a) Caixa do módulo servidor (b) Protótipo do módulo servidor (Fonte: O autor).

### 4.2.2 *Firmware*

O *firmware* do módulo servidor foi desenvolvido na IDE do arduino. Para este módulo, o *firmware* contém o sistema embarcado com toda a lógica de funcionamento geral do módulo, para recepção e envio dos dados para apresentação no sistema supervisorio. Para o desenvolvimento do código foram utilizadas as seguintes bibliotecas: RF24.h, RF24Network.h e SPI.h, responsáveis por fornecer uma interface para implementações com o dispositivo *wireless*. O funcionamento do módulo é definido por um fluxo de estados, em que são feitas as operações de recepção dos dados, indicação dos valores medidos e envio de confirmação de recebimento. A Figura 4.10 apresenta o fluxograma básico de funcionamento do módulo servidor.

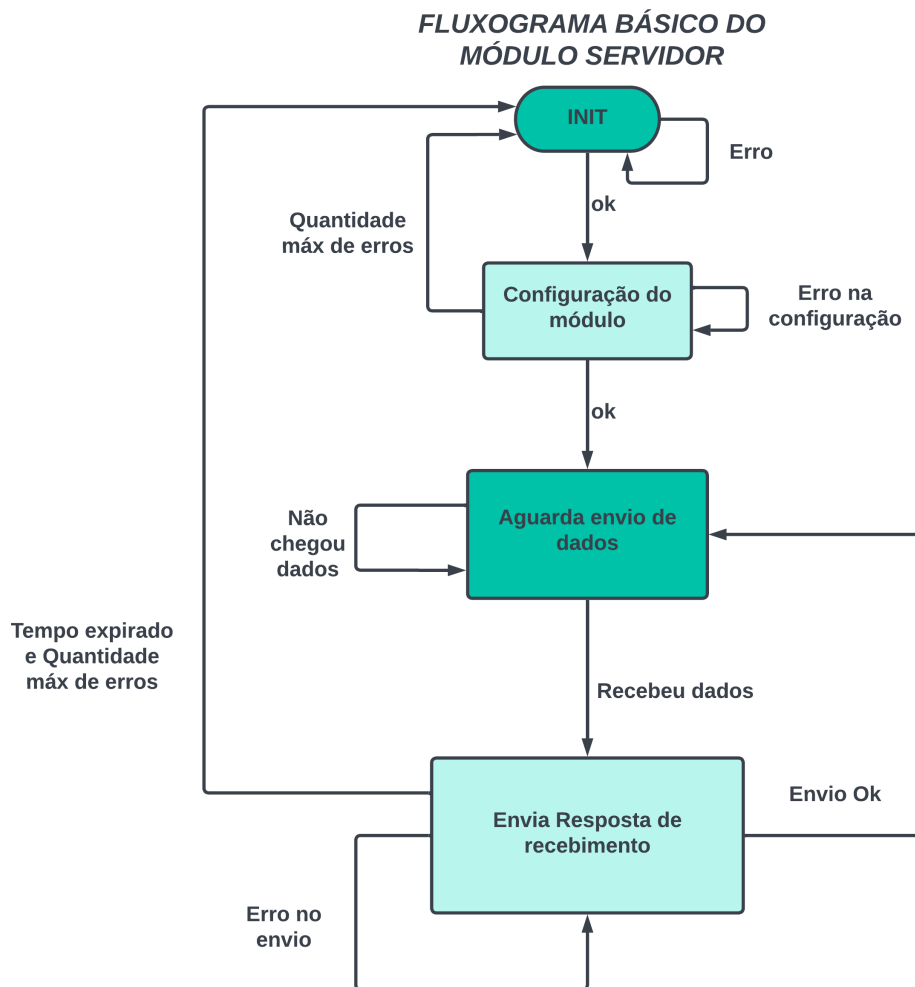


Figura 4.10: Fluxograma básico do funcionamento do módulo servidor (Fonte: O autor).

Ao ligar, o módulo é iniciado e preparado para uso. Primeiro é feita a inicialização do rádio e da rede de comunicação. Após o módulo ser iniciado, com sucesso, passa para o estado de configuração, onde são configurados os parâmetros: *Baud rate* da

serial, canal de frequência, nível da potência do amplificador e taxa de transmissão, semelhante ao módulo sensor. Caso ocorra erro na configuração é incrementado uma variável de falha, denominada como “*contFailConfig*”. Se numero máximo de tentativas falhas de configuração for ultrapassado, o modulo é reinicializado e o contador é resetado.

Após feita a configuração do dispositivo, para atuar no mesmo canal de frequência, o módulo servidor conseguirá enviar e receber dados do módulo sensor. Feito com sucesso, o módulo servidor passará para o estado de aguardar envio de dados, o qual ficará num *loop* infinito, esperando chegar algum dado. Caso receba o pacote *payload* com os dados dos sensores, durante a transição para o próximo estado de operação, o módulo envia pela serial a mensagem que contém o valor dos dados de temperatura, pressão e altitude, para os supervisórios. Através dos dados enviados na UART, o computador, que está conectado na porta COM serial, e o dispositivo bluetooth, conectado aos pinos Tx e Rx do arduino, conseguem receber esses dados. Devido ao módulo bluetooth trabalhar com uma *streaming* de dados de informação, sem necessitar de envios de comando, conseguiu-se utilizar a mesma serial para o módulo e para comunicação. Assim, o sistema supervisorio irá interpretar, apresentar e armazenar as informações obtidas. A mensagem contendo os valores dos dados dos sensores são passados para os supervisórios, enviando na serial uma *string* contendo as informações, com o seguinte formato:

$$String\ dados = "temperatura,pressao,altitude" \quad (4.1)$$

Ao receber os dados e encaminhá-los para os supervisórios, o módulo irá transmitir resposta de confirmação de recebimento dos dados para o módulo sensor. No estado do envio de resposta, também é iniciado um *timer*, denominado como “*timerSendAck*”, que indica o *timeout* em que a resposta de recebimento seja enviada. Caso ocorra erro no envio da mensagem, enquanto o tempo não expirar, o módulo continuará a tentar enviar a confirmação. Caso esse tempo expire e ainda não tenha conseguido enviar a confirmação, é incrementado um contador de falha, denominado como “*contFailSendAck*”. Se o tempo expirar e o numero máximo de tentativas falhas for ultrapassado, o modulo é reinicializado e o contador resetado. Se o envio da resposta for feito com sucesso, o módulo passa a aguardar novos dados.

Dessa forma, o módulo fica num ciclo de funcionamento de recepção e amostragem dos dados para o sistema supervisorio, em tempo real. Para funcionamento do módulo, foi utilizado um *timeout* de 2s para o “*timerSendAck*”, e uma quantidade máxima de 2 tentativas falhas para os contadores “*contFailSendAck*” e “*contFailConfig*”.

## 4.3 Sistema supervisório

O sistema supervisório é responsável por exibir os dados coletados, pelos módulos sensores instalados nos equipamentos, aeronaves ou veículos, por meio de um painel visual, que apresenta os dados em forma de indicadores, valores e gráficos, facilitando o monitoramento e acesso às informações, de maneira intuitiva, para o usuário fazer o monitoramento e análise. O sistema supervisório, criado para análise e armazenamento, foi desenvolvido nas versões *desktop* e *mobile*, utilizando as ferramentas: Node-RED e App Inventor, respectivamente.

O desenvolvimento das versões do sistema supervisório foram feitos baseado no fluxo de funcionamento do sistema, que pode ser visto na Figura 4.11. O sistema recebe a mensagem, que contém os dados das medições dos sensores, gerados e enviados pelo módulo servidor, através da comunicação serial, interpreta e separa os dados de temperatura, pressão e altitude. Com os dados separados é feito a amostragem, individualmente, dos valores, por meio de indicadores e gráficos, no painel do sistema supervisório.

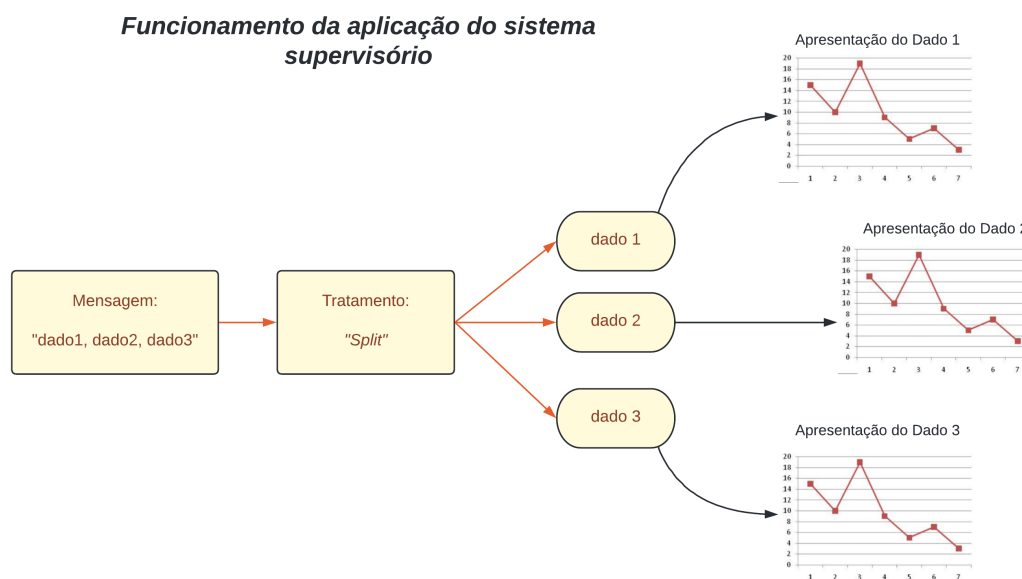


Figura 4.11: Fluxograma de funcionamento do sistema supervisório (Fonte: O autor).

### 4.3.1 Versão *desktop*

A versão *desktop*, do sistema supervisório, foi feita utilizando o Node-RED. Esta versão apresenta, em tempo real, os dados medidos dos módulos sensores, em forma

de gráficos e indicadores, num *dashboard* de monitoramento. O gráfico, apresenta os pontos de valores de medição ao longo do tempo. O sistema também cria um *DataLogger* do sistema, fazendo o armazenamento de todos os dados, num arquivo csv. Dessa forma, o usuário pode ver todo o histórico dos dados, abrindo o arquivo em qualquer *software* de edição de planilhas. No arquivo, são gravados todas as medições das variáveis, juntamente com o registro da data e hora, em que foram lidos. Assim, é possível analisar e reconstruir todo o trajeto de medições. O sistema supervisorio *desktop* chama-se “Performace Monitor”. A Figura 4.12, apresenta a tela do *dashboard* de monitoramento do supervisorio *desktop*.

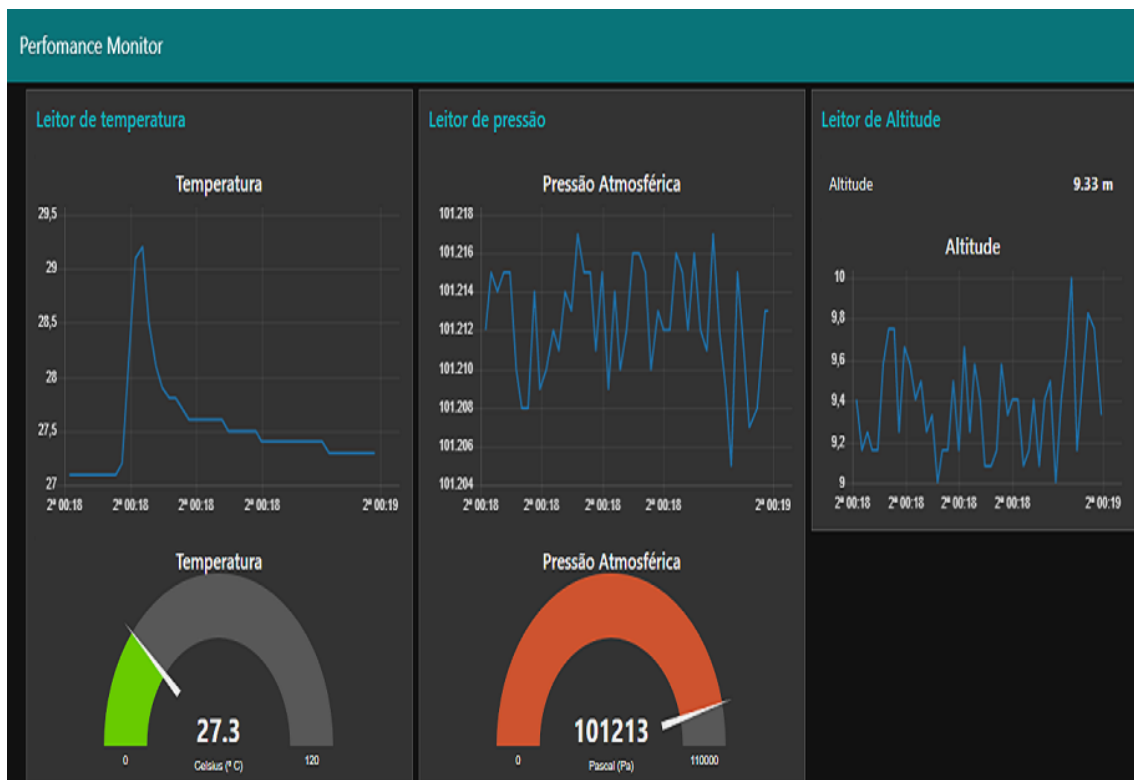


Figura 4.12: Sistema supervisorio - versão *desktop* (Fonte: O autor).

A implementação da versão foi feita utilizando “nó” de entrada serial (*Serial In*), para o sistema receber a *string* de dados, transmitida pelo módulo servidor, através comunicação serial, na porta COM do computador. Nele, fez-se toda configuração da COM, que está sendo utilizada na conexão com o computador e com o arduino, do módulo servidor, pelo cabo USB. Para interpretação, processamento, armazenamento e apresentação dos dados, há uma camada com “nós” de função, arquivo e *dashboard*, que fazem controle e gerenciamento de exibição das medições na tela de monitoramento. A Figura 4.13 apresenta a implementação feita no Node-RED.

Ao executar a aplicação do Node-RED, instalado no computador, é criado uma conexão como servidor local, tornando possível acessar a página do sistema super-

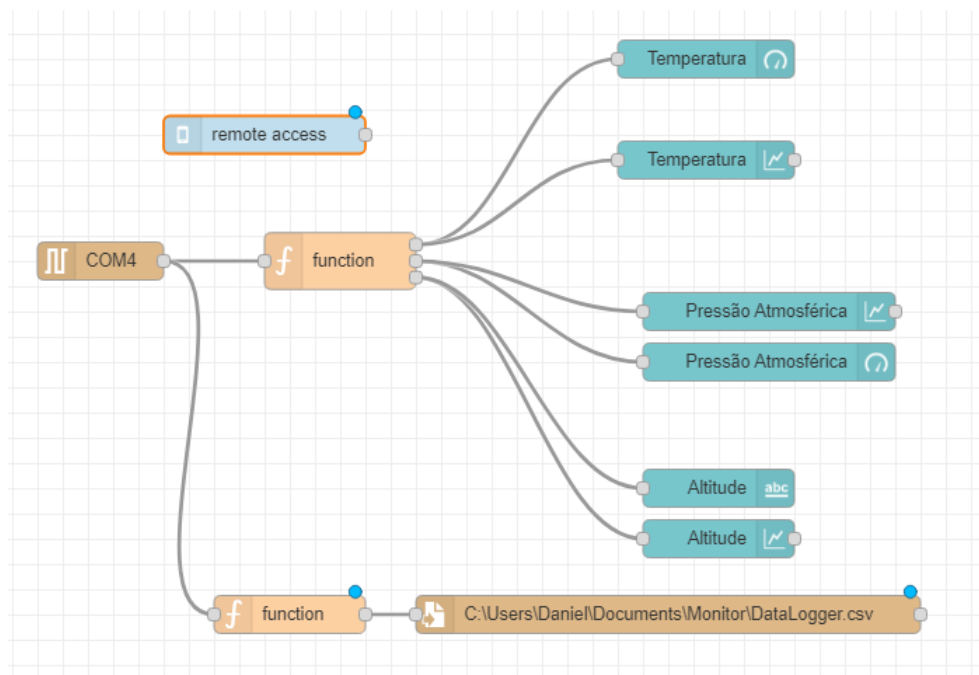


Figura 4.13: Implementação do sistema supervisorio no Node-RED (Fonte: O autor).

visorio no navegador, mesmo que não haja conexão com a internet. Um bônus é que se a máquina possuir conexão com rede de internet, faz com que o servidor fique online e, através do nó “*remote access*”, é possível acessar o sistema utilizando o celular, com o uso do App Remote-RED, o qual vincula o acesso através da leitura de um QR-Code gerado pelo nó. Caso o celular tenha conexão é permitido acessar remotamente o sistema supervisorio.

### 4.3.2 Versão *mobile*

A versão *mobile* do sistema supervisorio foi feita utilizando o App inventor. Esta versão apresenta, em tempo real, os dados medidos dos módulos sensores, através de um aplicativo, usando conexão bluetooth. Esta versão apenas mostra os valores de temperatura, pressão e altitude medidos no momento. O desenvolvimento desta versão é para aplicações de testes rápidos, em que deseja-se analisar medições em tempo real.

A implementação do sistema foi feita utilizando uma aplicação de um componente bluetooth, do App inventor. O aplicativo recebe a *string*, com a mensagem dos dados transmitidos pelo módulo servidor, via *bluetooth*, através da comunicação entre o pareamento do módulo servidor com a aplicação do sistema supervisorio do celular. O supervisorio *mobile* contém duas telas: A primeira, é a tela inicial, onde é feito o pareamento entre o *bluetooth* do celular com o dispositivo *bluetooth* do

módulo servidor, o HC-05. Após fazer o pareamento, a segunda tela da aplicação é a que apresenta as medições das variáveis monitoradas no módulo sensor. Para o funcionamento do aplicativo, foi desenvolvido uma camada de lógica, para o processamento dos dados, que intermedia os eventos, a troca de informações entre os pacotes recebidos e a interface do sistema *mobile*, que faz o controle de exibição das medições na tela de monitoramento. Enquanto houver recepção de dados é mostrado as medições na tela de monitoramento. Caso fique, por muito tempo, sem receber dados é indicado no sistema que perdeu a conexão. O aplicativo do sistema supervisorio *mobile* chama-se “Performance Monitor”. A Figura 4.14 apresenta o *layout* das telas do aplicativo da versão *mobile* do sistema supervisorio.



Figura 4.14: (a) Tela inicial do Aplicativo do sistema *mobile* (b) Tela de monitoramento do sistema supervisorio *mobile* (Fonte: O autor).

# Capítulo 5

## Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos, de forma discursiva, dos testes realizados da implementação e desenvolvimento do sistema de telemetria proposto no trabalho, para validação da transmissão e verificação dos dados em tempo real.

### 5.1 Resultados de Síntese

Para sistemas de comunicação sem fio, simulações nem sempre correspondem a resultados obtidos em implementações em um ambiente real. Neste trabalho, além de simulações, também foram realizados testes de laboratórios e em ambientes reais, em diferentes locais de campo aberto e áreas urbanas, para observar a obtenção de diferentes registros de transmissão dos dados e também analisar a eficiência e ocorrência de interferências.

Após o desenvolvimento de todos os módulos necessários para o funcionamento do sistema, foi possível realizar os testes de funcionamento e de validação do sistema. A Figura 5.1 apresenta o *logger* da serial dos módulos sensor e servidor, respectivamente, apresentando o fluxo de funcionamento do sistema, quanto a leitura, transmissão e recepção dos dados mensurados, e o tempo em que foram lidos, na realização do teste de funcionamento dos módulos do sistema.

Na Figura 5.1 é possível observar o funcionamento dos módulos. O módulo servidor após iniciar, fica aguardando dados. Depois que o módulo sensor foi inicializado, foram feitas as medições dos valores e transmitidos os dados. As primeiras medições foram transmitidas, pelo módulo sensor, em 22:43:20.122. O módulo servidor recebeu os dados em 22:43:20.167, ou seja, num intervalo de pelo menos 1 segundo. O pacote de dados recebidos conferem com os dados enviados. Depois, o módulo servidor envia confirmação de recebimento dos dados para o módulo sensor, que estava aguardando a resposta de confirmação, fazer nova leitura dos sensores e transmitir novamente as informações. A cada segundo é realizado a troca de mensagens e, portanto, a atualização dos dados é apresentada em tempo real.

| Serial do módulo sensor                             | Serial do módulo servidor                         |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 22:43:19.539 -> Sucesso na inicializacao do BMP180  | 22:43:17.582 -> Sucesso na inicializacao do radio |
| 22:43:19.539 -> Sucesso na inicializacao do radio   | 22:43:17.582 -> Neew State = INIT                 |
| 22:43:19.539 -> Neew State = INIT                   | 22:43:17.582 -> Iniciando..                       |
| 22:43:19.752 -> Neew State = SENSOR_MEDICAO         | 22:43:17.676 -> Neew State = WAIT                 |
| 22:43:20.122 -> Neew State = SEND                   | 22:43:17.676 -> - Aguardando dados...             |
| 22:43:20.122 -> Enviando dados - tentativa: 0       | 22:43:18.670 -> - Aguardando dados...             |
| 22:43:20.122 -> Temperatura: 26.90 °C               | 22:43:19.653 -> - Aguardando dados...             |
| 22:43:20.122 -> Pressao: 101258.00 Pascal (pa)      | 22:43:20.167 ->                                   |
| 22:43:20.122 -> Altitude: 5.58 m                    | 22:43:20.167 -> Dados recebidos:                  |
| 22:43:20.122 -> State: RECEIVE - Aguardando ACK.... | 22:43:20.167 -> Temperatura:26.90                 |
| 22:43:20.403 -> Neew State = RECEIVE                | 22:43:20.167 -> pressao =101258.00 Pascal         |
| 22:43:20.403 -> State: RECEIVE - Aguardando ACK.... | 22:43:20.214 -> Altitude: 5.58 m                  |
| 22:43:20.403 ->                                     | 22:43:20.214 -> Enviando ACK.... Tentativa: 0     |
| 22:43:20.403 -> Ack recebido                        | 22:43:20.214 -> Ack enviado                       |
| 22:43:20.403 ->                                     | 22:43:20.214 ->                                   |
| 22:43:20.736 -> Neew State = SENSOR_MEDICAO         | 22:43:20.308 -> - Aguardando dados...             |
| 22:43:21.060 -> Neew State = SEND                   | 22:43:21.106 ->                                   |
| 22:43:21.060 -> Enviando dados - tentativa: 0       | 22:43:21.106 -> Dados recebidos:                  |
| 22:43:21.060 -> Temperatura: 26.90 °C               | 22:43:21.106 -> Temperatura:26.90                 |
| 22:43:21.060 -> Pressao: 101258.00 Pascal (pa)      | 22:43:21.106 -> pressao =101258.00 Pascal         |
| 22:43:21.060 -> Altitude: 5.58 m                    | 22:43:21.106 -> Altitude: 5.58 m                  |
| 22:43:21.060 -> State: RECEIVE - Aguardando ACK.... | 22:43:21.106 -> Enviando ACK.... Tentativa: 0     |
| 22:43:21.390 -> Neew State = RECEIVE                | 22:43:21.106 -> Ack enviado                       |
| 22:43:21.390 -> State: RECEIVE - Aguardando ACK.... | 22:43:21.106 ->                                   |
| 22:43:21.390 ->                                     | 22:43:21.200 -> - Aguardando dados...             |
| 22:43:21.390 -> Ack recebido                        | 22:43:22.137 ->                                   |

Figura 5.1: Seriais dos módulos no teste de funcionamento do sistema (Fonte: O autor).

O modelos dos gráficos das variáveis de temperatura, pressão e altitude, monitoradas no teste, gerados pelo sistema supervisorio, a partir dos dados das medições enviadas pelo módulo sensor, são apresentados conforme a Figuras 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente.

Vê-se nos gráficos, o histórico das medições recentes. Observou-se que o intervalo de medições dos sensores são registrados a cada segundo, confirmando que o sistema supervisorio apresenta, para o usuário, o monitoramento das variáveis em tempo real. A verificação de que os dados são transmitidos e recebidos, em tempo real, também foi confirmada através do arquivo *datalogger* gerado num arquivo csv, ao comprovar que os dados dos sensores contendo os valores das medições, foram registrados a cada segundo, como mostra a Figura 5.5. Assim, foi possível confirmar que o sistema transmite e disponibiliza os dados, em tempo real, como esperado.

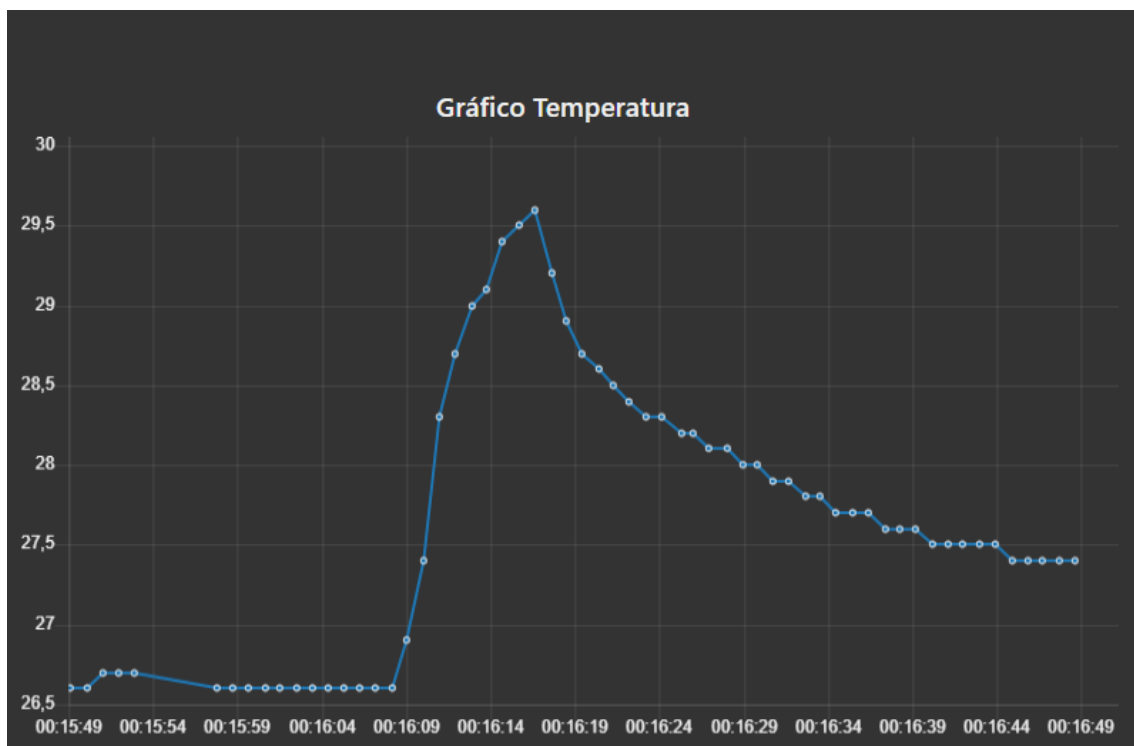


Figura 5.2: Gráfico das medições de temperatura gerado pelo supervisorío (Fonte: O autor).

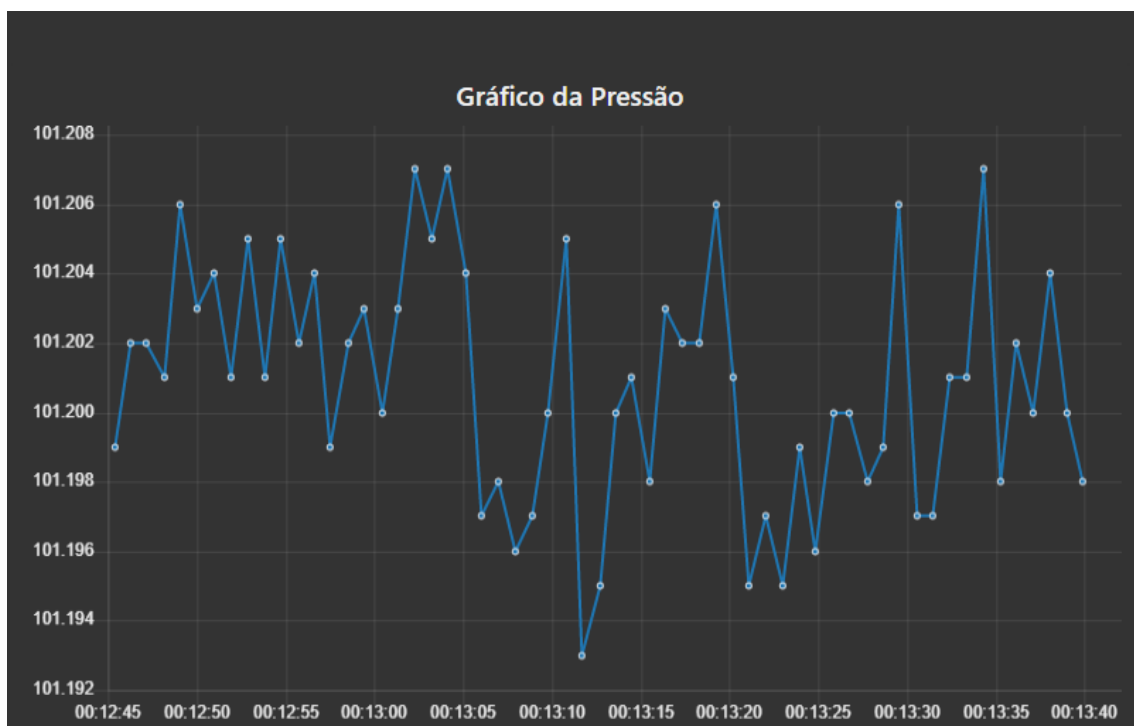


Figura 5.3: Gráfico das medições de pressão gerado pelo supervisorío (Fonte: O autor).

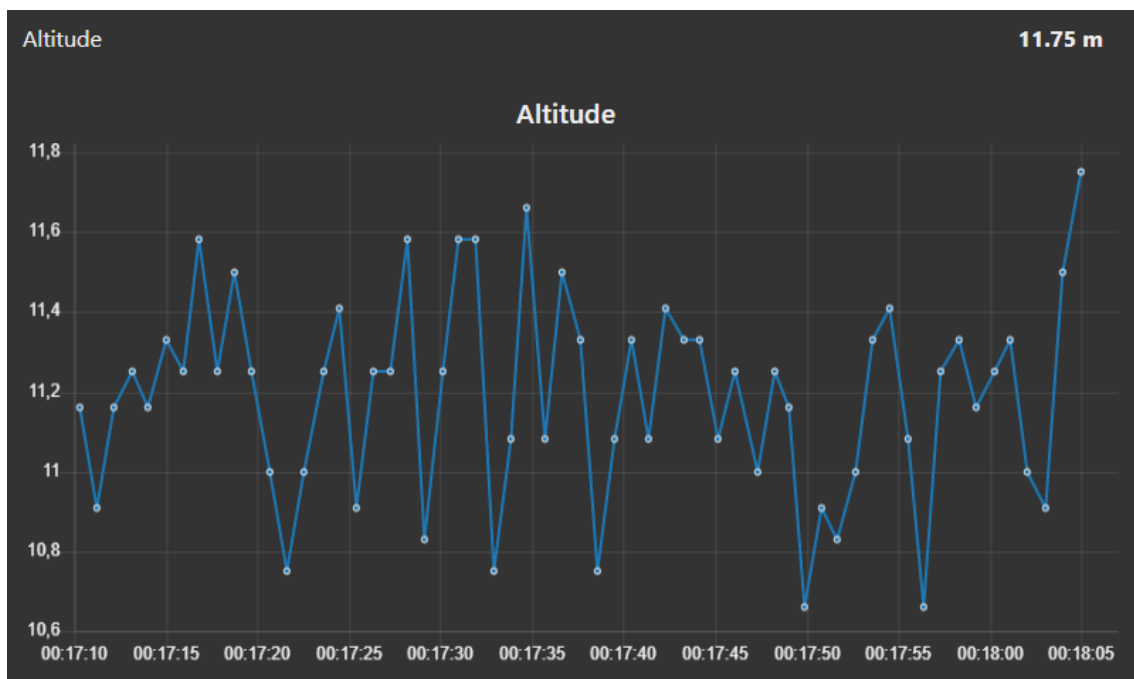


Figura 5.4: Gráfico das medições de altitude gerado pelo supervisor (Fonte: O autor).

| A                    | B           | C         | D        |
|----------------------|-------------|-----------|----------|
| Data Hora            | Temperatura | Pressão   | Altitude |
| 2022/6/31 - 11:34:29 | 31.70       | 101232.00 | 7.75     |
| 2022/6/31 - 11:34:30 | 31.70       | 101230.00 | 7.91     |
| 2022/6/31 - 11:34:31 | 31.70       | 101232.00 | 7.75     |
| 2022/6/31 - 11:34:32 | 31.60       | 101229.00 | 8.00     |
| 2022/6/31 - 11:34:33 | 31.60       | 101214.00 | 9.25     |
| 2022/6/31 - 11:34:34 | 31.60       | 101209.00 | 9.66     |
| 2022/6/31 - 11:34:35 | 31.60       | 101214.00 | 9.25     |
| 2022/6/31 - 11:34:36 | 31.60       | 101214.00 | 9.25     |

Figura 5.5: Medições registradas no arquivo csv (Fonte: O autor).

## 5.2 Validação do sistema

Para a realização dos testes de validação, primeiramente, foi instalado o módulo servidor num ponto fixo inicial e instalado um módulo sensor num veículo e feito o acompanhamento dos dados, com o veículo em movimento e parado em determinados pontos de observação, variando a distância. O mapa da Figura 5.6, apresenta os locais em que foram feitos os testes de comunicação e transmissão dos dados do sistema. A Figura 5.7 mostra o gráfico dos dados de temperatura e altitude, medidos e transmitidos nos pontos de observação.



Figura 5.6: Pontos de observação de Medições registradas - teste 1 (Fonte: O autor).

O ponto inicial, denominado como zero, está indicado pelo ponto azul, no mapa da Figura 5.6. Inicialmente, foi preciso fazer: calibragem do sensor barométrico, de forma que a pressão atmosférica e a altitude medidas no ponto inicial, fossem setadas para altitude real zero, em relação ao solo; setar o nível do amplificador de potência dos transceptores e a taxa de transmissão de dados. Devido ao interesse da durabilidade da bateria, como o módulo sensor deve ser embarcado na aeronave e para o mesmo não consumir muita energia, não foi utilizado uma potência de transmissão alta, pois, demanda mais corrente. Por isso, foram utilizados dois níveis de potência de transmissão, começando com o nível mínimo de potência do dispositivo de -18 dBm e depois aumentado para -12 dBm, que demandam menos corrente, para verificação do comportamento do sistema. Devido ao sistema, inicialmente, não trocar mensagens com pacote de dados muito grandes, foi utilizado taxas de 250 Kbps e 1 Mbps, para analisar o comportamento da transmissão de dados e comunicação do sistema. Assim, posteriormente, foi feito o monitoramento dos dados, deslocando-se para os outros pontos de observação indicados no mapa, fazendo os testes de comunicação e transmissão.

No mapa da Figura 5.6, em todos os pontos verdes, ocorreu transmissão e re-

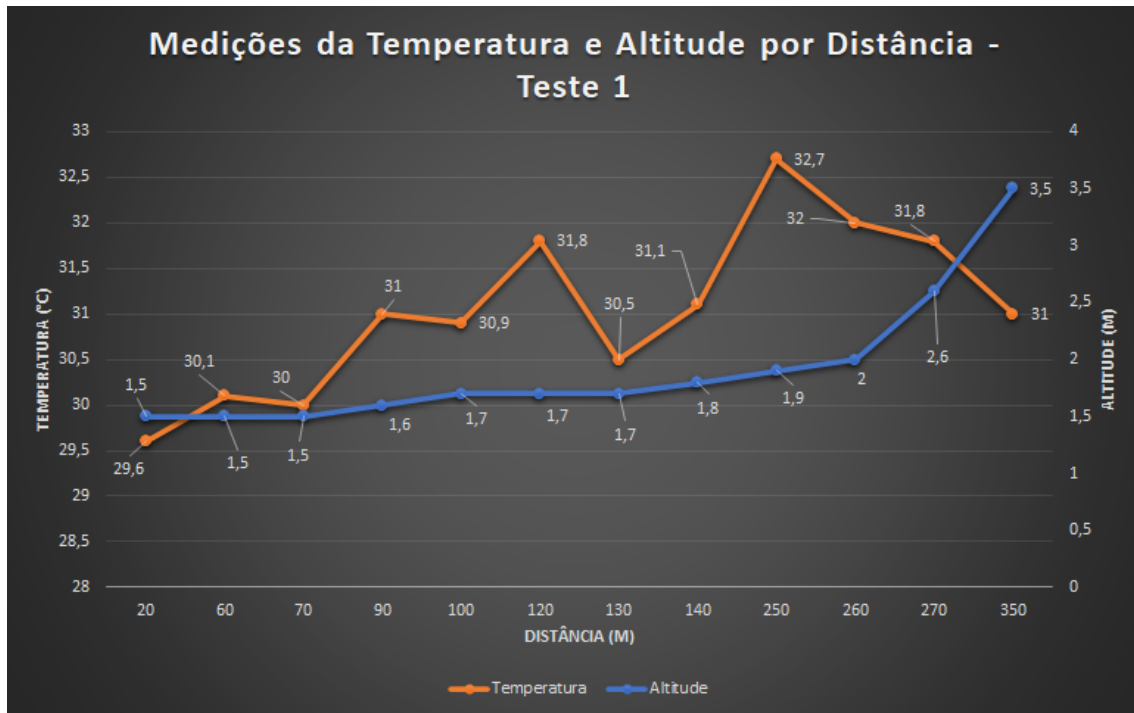


Figura 5.7: Gráfico das medições de temperatura e altitude - teste 1 (Fonte: O autor).

cepção eficiente dos dados, não havendo interferências e nem perda de conexão. Durante o deslocamento e trajetória feitos para esses pontos, também houve transmissão de dados eficiente. A cada segundo foram registrados os dados das medições no sistema supervisorio. Estes pontos, em relação ao ponto inicial, tiveram uma característica em comum, que foi a visada direta. Todos esses pontos obtiveram ótima comunicação, devido aos módulos conseguirem se enxergar, ou seja, havia ponto de visão entre as antenas de ambos. Por não ter muitos anteparos no trajeto, não fizeram com que o sinal sofresse muita atenuação. Assim, conseguiu-se obter transmissão e fazer monitoramento dos dados, em tempo real, em distâncias consideráveis, com o veículo em movimento, deslocando-se até os pontos de parada de observação.

Nos pontos amarelos, indicados no mapa da Figura 5.6, houve perda de comunicação por um instante, porém, reestabeleceu a comunicação após o módulo sensor ficar numa posição mais alta, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.7. Neste ponto, só houve transmissão de dados após o sistema se recuperar, precisando de um tempo maior, devido a perda de comunicação. Contudo, o sistema conseguiu recuperar a comunicação depois de um intervalo de 4s, ocorrendo a retransmissão dos dados, mantendo o registro no sistema supervisorio. Isso ocorreu devido a não ter a característica da visada, ou seja, não tinha campo de visão entre as antenas dos módulos. Pois, o trajeto até o local possui anteparos como árvores e prédios,

fazendo com que o sinal fosse bastante atenuado. Porém, conseguiu-se estabelecer comunicação novamente e os dados foram transmitidos, devido a conseguir obter uma janela com campo de visão. Assim, pôde-se perceber que em ambientes com condições que dificultem a visada, devido a obstáculos que podem atenuar o sinal, ocorre interferência, acarretando na perda de comunicação. Contudo, o sistema é capaz de se recuperar e reestabelecer comunicação e continuar a transmitir dados.

Se no ambiente, em que ocorre a supervisão, há campo de visão entre as antenas dos módulos, sem anteparos, o sistema continua e consegue estabelecer comunicação e realizar transmissão e recepção de dados eficiente, a cada segundo, sendo possível monitorar e analisar as informações em tempo real. Como visto que a condição de visada é importante, a Figura 5.8 mostra outros pontos de observação, num ambiente mais aberto que possui maior campo de visão e sem muitos anteparos. A Figura 5.9 mostra o gráfico dos dados de temperatura e altitude, medidos e transmitidos nos pontos de observação equivalentes aos pontos observados na Figura 5.6.

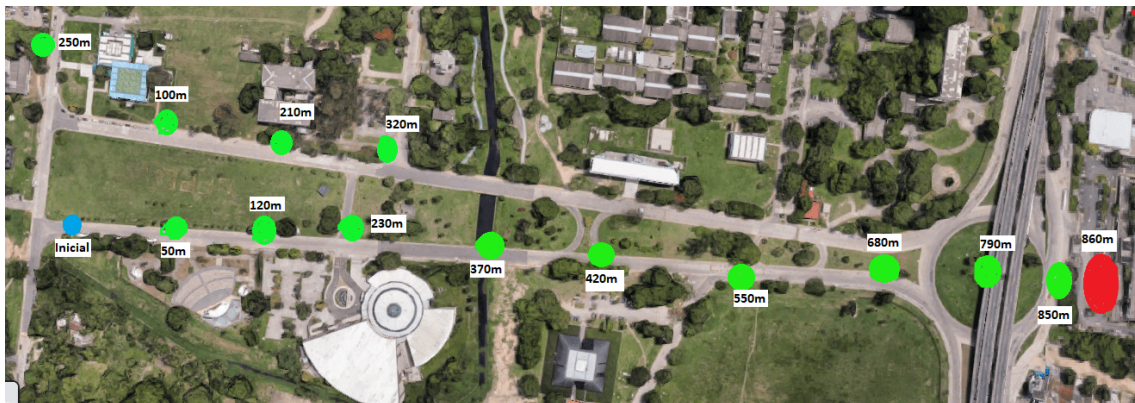


Figura 5.8: Pontos de observação de Medições registradas - teste 2 (Fonte: O autor).

Na Figura 5.8, o ponto marcado de azul também referencia o marco inicial. Os pontos verdes indicam que a transmissão, recepção e monitoramento dos dados pelo sistema ocorreu de forma eficiente. Nota-se que para distâncias equivalentes à Figura 5.6, em que a conexão foi perdida, houve comunicação e transmissão de dados, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.9. Portanto, os resultados mostram que devido às condições de anteparos da área do ambiente e da visada, o sistema consegue realizar comunicação e transmitir dados, proporcionando monitoramento e análise dos dados em tempo real, para distâncias consideráveis. Verificou-se que para as maiores distâncias, o intervalo de transmissão de dados ocorria a cada segundo quando havia campo de visão, quando não, o sistema conseguiu se recuperar após 3 segundos. Ao recuperar o campo de visão, as transmissões ocorreram a cada segundo, apresentando dados em tempo real.

O ponto vermelho indica o local e a distância máxima em que não era mais

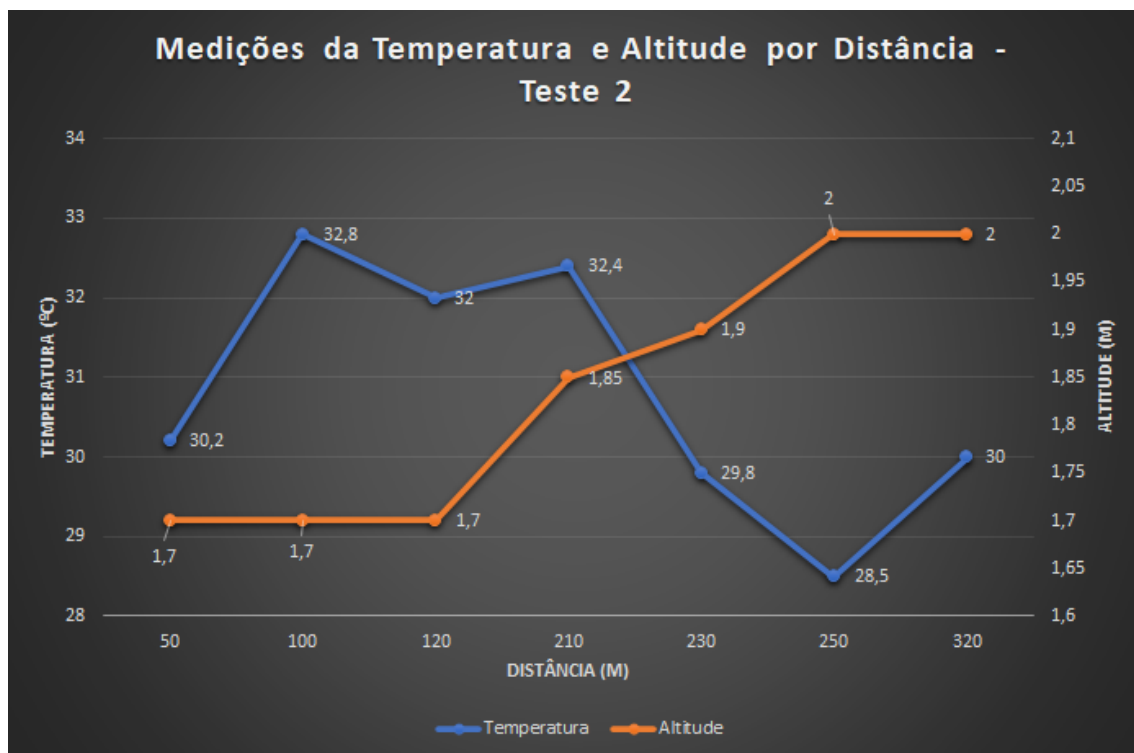


Figura 5.9: Gráfico das medições registradas nos pontos de observação - teste 2 (Fonte: O autor).

garantido comunicação e transmissão de dados eficiente entre os módulos, assumindo que numa distância de 860m, o sistema não funcionava adequadamente. O alcance máximo, que o sistema conseguiu transmitir informações de forma eficiente, foi de 850m, utilizando potência de transmissão de -12 dBm e taxa de transmissão de 250 Kbps. A tabela 5.1 apresenta o alcance máximo de comunicação atingido utilizando os níveis de potência indicados com as taxas de transmissão de dados diferentes.

Tabela 5.1: Alcance máximo (Fonte: O autor).

| Nível do amplificador de potência | Taxa de transmissão | Distância máxima |
|-----------------------------------|---------------------|------------------|
| -18 dBm                           | 250 Kbps            | 500 m            |
|                                   | 1 Mbps              | 400 m            |
| -12 dBm                           | 250 Kbps            | 850 m            |
|                                   | 1 Mbps              | 420 m            |

Para um raio de cobertura de 850 metros, foi garantido que há transmissão de dados eficiente, a cada intervalo de tempo de 1s, desde que haja visada. O sistema funciona bem, transmitindo dados com potência de transmissão de -12 dBm, a uma taxa de 250 Kbps, garantindo comunicação entre uma aeronave e o servidor, para distâncias, consideravelmente, significativas para telemetria de VANTs, como o aerodesign, proporcionando monitoramento em tempo real.

# Capítulo 6

## Conclusão

O trabalho apresentou uma implementação de um sistema de telemetria envolvendo tecnologia de comunicação *wireless*, por rádio frequência, contendo técnicas de transmissão, recepção, confirmação de dados, redundâncias e tratamento tolerante à falhas, utilizando dispositivos de baixo custo.

Desenvolvido em três estruturas, sendo uma móvel, o módulo sensor, responsável por fazer aquisição e transmissão de dados, e duas fixas, os módulos servidor e o supervisor, responsáveis por fazerem a recepção, tratamento e apresentação da verificação dos dados, respectivamente. O sistema conseguiu manter bom funcionamento, sincronismo e comunicação eficiente, em tempo real, como proposto inicialmente no projeto.

Apesar do desenvolvimento do sistema ter sido feito para um aerodesign, a instalação do módulo sensor pode ser utilizada em outros tipos de veículos, desde aeronaves não tripuladas a veículos terrestres ou marítimos, pois, o sistema permite e pode ser estendido para esse feito, adaptando apenas parâmetros e variáveis que deseja-se monitorar em tempo real. O módulo sensor consegue ajustar parâmetros de altitude real em relação ao solo, devido a calibração feita por *firmware*, garantindo estabilidade no funcionamento e confiabilidade dos dados transmitidos. O módulo servidor e o supervisor devem ser instalados numa infra-estrutura estratégica para garantir cobertura local de comunicação entre os módulos.

O intervalo de medições e transmissão de dados ocorreram, em média, a cada segundo. Portanto, o sistema demonstrou eficiência ao garantir a transferência dados, tornando possível analisar e supervisionar variáveis desejadas em tempo real. Caso ocorra perda de comunicação, o sistema tenta e consegue reestabelecer conexão, mantendo a transmissão de dados. O reenvio dos dados falhos é feito, posteriormente, assim que há resposta de comunicação, permitindo a análise dos dados salvo em arquivo. Logo, foi possível realizar o processo de supervisão e análise das variáveis em tempo real, atingindo uma área de cobertura com alcance máximo testado de 850 metros, com transmissão e recepção de dados garantida.

O sistema de telemetria proposto conseguiu atingir os objetivos pretendidos, garantindo a transmissão, recepção e monitoramento de dados remotamente, em tempo real, em ambientes com e sem obstáculos, desde que obedeça a região de cobertura e haja campo de visão. O sistema foi validado em situações próximas da realidade, através da realização de testes de campo, em ambientes reais e abertos, e permitiu que o usuário monitore as informações desejadas em tempo real, auxiliando no gerenciamento e controle da aeronave ou outro veículo.

## 6.1 Trabalhos futuros

O projeto desenvolvido cumpriu com o que foi proposto, porém, pode ser entendido e evoluir com o aperfeiçoamento dos módulos do sistema. Através dos resultados obtidos, enxerga-se grandes expectativas para novas pesquisas e trabalhos relacionados ao assunto.

Para trabalhos futuros, sugere-se a proposta de adicionar mais sensores nos módulos, para monitoramento de diversas variáveis e avaliar melhor a precisão dos sensores. Visto que a comunicação ponto a ponto funcionou de forma eficiente, pretende-se a instalação de mais módulos sensores em outros veículos, adicionando módulos a rede do sistema, para possibilitar o monitoramento de mais aeronaves, ao mesmo tempo, verificando a eficiência de uma comunicação ponto-multiponto, devido ao dispositivo *wireless* permitir esta versatilidade.

Devido ao projeto apresentado conseguir estabelecer comunicação e transmissão de dados para distâncias consideráveis, outra proposta é a utilização de outras tecnologias que possam aumentar o alcance de comunicação, como por exemplo: dispositivos com tecnologia FM e LoRa. Com este intuito, realizar a implantação de serviços de geolocalização no VANT, utilizando GPS, para determinar a localização atual da aeronave, para proporcionar acompanhamento e rastreamento do seu movimento num mapa.

Quanto à segurança dos dados, sugere-se também a criação de uma estrutura de mensagens única para troca de dados entre o VANT e o módulo servidor, para tornar a comunicação entre os módulos mais segura e robusta. E possibilitar, ao usuário, envio de telecomandos para o módulo sensor realizar ações à eventos e controle, através do aperfeiçoamento dos supervisórios.

# Referências Bibliográficas

ALVES, R. A. P. *Solução de monitoramento de consumo de água residencial*. 70 f. Monografia (TCC - Bacharelado em Sistemas da informação) — Centro Universitário Eurípides de Marília - UNIVEM, Marília, 2015.

ARAUJO, W. M.; SILVA, R. O. da; CAVALCANTE, M. M. Visão geral sobre microcontroladores e prototipagem com arduino. *Tecnologias Em Projeção*, v. 10, n. 1, p. 36–46, 2019.

ARDUINO. *Arduino Nano - Product Reference Manual*. 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/static/bc0734780c9158c57dfe004ddceed457/A000005-datasheet.pdf>. Acesso em: Março. 2022.

ARDUINO. *Arduino UNO - Product Reference Manual*. 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/static/bd71bc21b039b077c26f7004561cc389/A000066-datasheet.pdf>. Acesso em: Fevereiro. 2022.

ATMEL. *Datasheet ATmega328p*. 2015. Disponível em: [https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P\\_Datasheet.pdf](https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf). Acesso em: Março. 2022.

AZEVEDO, C. M. O. *Comando e monitorização de sistemas de actuação via redes wireless: ZigBee*. 137 f. Dissertação (Mestrado integrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2010.

BARBOSA, R. Z. *Desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados georreferenciados e de telemetria para monitoramento de parâmetros físicos em sistemas de irrigação*. 114 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) — Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu, SP, 2012.

BONDE, I. *Telemetria*. 2022. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialmtelemetria/default.asp>. Acesso em: Março. 2022.

BOSCH. *Bmp180 Datasheet*. 2013. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>. Acesso em: Abril. 2022.

CHRIST, P. et al. Performance analysis of the nrf24l01 ultra-low-power transceiver in a multi-transmitter and multi-receiver scenario. In: IEEE. *SENSORS, 2011 IEEE*. [S.l.], 2011. p. 1205–1208.

COMMUNICATIONS, N. *Modulação GFSK*. 2022. Disponível em: <https://sites.google.com/site/nearcommunications/modulacao-gfsk>. Acesso em: Março. 2022.

DIAS, J. E. A. *Eletrônica, instrumentação e telemetria do veículo UFVBAJA*. Monografia (TCC - Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

DIAS, M. A. F. d. S. Previsão de tempo a curtíssimo prazo - 6 a 24 horas. In: *Telemetria e Sensoriamento Remoto com Aplicações em Hidrologia e Meteorologia*. Curitiba: Emater, 1992.

FCC. *Federal communication Comissions*. 2022. Disponível em: <https://www.fcc.gov/>. Acesso em: Março. 2022.

FERREIRA, J. M. M. *Introdução ao projecto com sistemas digitais e microcontroladores*. 1. ed. Porto: FEUP Edições, 1998. 371 p.

FILARDI, V. L. *Desenvolvimento de um sistema para navegação e telemetria de aeronaves não tripuladas*. 147 f. Dissertação (Mestrado em Mecatrônica) — Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

FILHO, J. C.; BARBOSA, M. C. et al. *Desenvolvimento de interface SPI para controle de um Direct Digital Synthesizer AD9912*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2012.

FINIZOLA, A. et al. O ensino de programação para dispositivos móveis utilizando o mit-app inventor com alunos do ensino médio. In: *Anais do XX Workshop de Informática na Escola*. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2014. p. 337–341. ISSN 0000-0000. Disponível em: <https://sol.sbc.org.br/index.php/wie/article/view/16634>.

IORESE, V. *Wireless-Introdução às Redes de Telecomunicação Móveis Celulares*. Rio de Janeiro, RJ: Brasport, 2005. 327 p.

FLOREANO, D.; WOOD, R. J. Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 521, n. 7553, p. 460–466, 2015.

GIARETTA, M. S. *Solução de monitoramento de consumo de água residencial*. 45 f. Monografia (TCC - Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) — Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

GOMES, P. H. O. *Concepção de Sistema de Telemetria para Aeronaves Remotamente Controladas*. 46 f. Monografia (TCC - Graduação em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2016.

GOMES, R. D.; SPOHN, M. A. Estudo experimental da utilização espectral na banda ism de 2.4 ghz. In: *The 9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium*. Campina Grande: [s.n.], 2010.

GOMES, R. D. et al. Correlation between spectral occupancy and packet error rate in IEEE 802.15. 4-based industrial wireless sensor networks. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 10, n. 1, p. 1312–1318, 2012.

HUS, H. *Comunicação analógica e digital*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2003. 336 p.

IEEE. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*. 2022. Disponível em: <https://www.ieee.org.br/>. Acesso em: Março. 2022.

IRWIN, J. D.; WILAMOWSKI, B. M. *Industrial communications systems*. 2. ed. CRC, Florida: Boca Raton, 2016.

LAJÚS, C. R. et al. Prospecção de patentes relacionadas ao uso de vants como inserção tecnológica na agricultura de precisão. In: *X Congresso Brasileiro de Agroinformática*. Santa Catarina, Brasil: [s.n.], 2015. p. 1–10.

LOZANO-NIETO. A telemetry. In: WEBSTER, J. G. *The measurement, instrumentation and sensors handbook*. [S.l.]: CRC press LLC, 1999. cap. 87.

MALAQUIAS, I. M. *Projeto e Caracterização de um Sistema de Telemetria para Ensaios em Voo de Aeronaves Leves*. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

MATTEDE, H. *Sensor de temperatura - Tipos e funcionamento*.

2022. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/sensor-de-temperatura-tipos-funcionamento/>. Acesso em: Abril. 2022.

MATTOS, A. N. d. *Telemetria e Conceitos relacionados - uma visão geral dos sistemas de telemetria com ênfase em aplicações aeroespaciais*. São José do Campo, São Paulo: Edição do Autor, 2004. 315 p.

- MCROBERTS, M. *Arduino básico*. 2. ed. São Paulo: Novatec Editora, 2015.
- MENEZES, S. C. *Medições das propriedades básicas do solo de sistemas agrícolas a partir de sistemas remotos*. 81 f. Monografia (TCC - Bacharelado em Engenharia de Elétrica) — Universidade Federal do Ceará, Sobral, CE, 2017.
- MOREIRA, A. *Transmissão de dados digitais*. 2022. Disponível em: <https://www.dei.isep.ipp.pt/~asc/doc/transmissao-dados.html>. Acesso em: Março. 2022.
- MOREIRA, F. V.; NASCIMENTO, G. G. Proposta de um sistema controlador de demanda industrial baseado em iot. *Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL*, Minas Gerais, p. 11, 2020.
- MUSSOLINI, T. P. *Desenvolvimento de um microcontrolador de 8 bits em VHDL baseado no conjunto de instruções do 8051 com comunicação serial I2C e criptografia AES128*. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal Itajubá, Itajubá, MG, 2011.
- NETO, F. D. N. L. *Monitoramento remoto de temperatura para armazenagem de materiais biológicos e vacinas, aplicado em pesquisa clínica*. 102 f. Dissertação (Mestrado profissional em pesquisa clínica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.
- NORDIC, S. *nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver*. 2008. Disponível em: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01Pluss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf). Acesso em: Março. 2022.
- PAIVA, A. S. *Telemetria com uso de arduino em lançamentos de foguetes no ensino médio*. 185 f. Dissertação (Mestrado em Física) — Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.
- POLASTRINI, F. H. *Desenvolvimento de uma máquina CNC de baixo custo com software e hardware abertos*. 101 f. Monografia (TCC - Graduação em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Minas Gerais, Formiga, MG, 2016.
- POZAR, D. M. *Microwave and RF design of wireless systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2000.
- RAMOS, M. C.; ANDRADE, V. S. de. Desenvolvimento, construção e calibração de uma central de monitoramento de consumo de energia elétrica e de água utilizando o microcontrolador arduino. *Revista Produção e Desenvolvimento*, v. 2, n. 1, p. 39–50, 2016.

ROCHA, B. *Sinal digital/Sinal analógico*. 2013. Disponível em: <https://sites.google.com/a/aebenfica.info/copia-bernardo-rocha/glossario/postagemsemtitulo>. Acesso em: Abril. 2022.

SAMPAIO, G. S. *Construção de uma mini plotter artesanal para desenho*. 103 f. Monografia (TCC - Bacharelado em Engenharia da Computação) — Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, 2021.

SANTOS, D. S. *Rastreamento e telemetria de veículos usando comunicação de dados de alta velocidade disponível na telefonia celular*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica e Computação) — Departamento de Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2004.

SANTOS, F. B. d. *TSADA - Sistema de telemetria redundante e tolerante a falhas utilizando tecnologia GSM/GPRS e Zigbee*. 115 f. Dissertação (Mestrado em Informática) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

SANTOS, F. R.; GASPAROVIC, L. K. H. *Armadura fisioterapêutica para membros inferiores*. 39 f. Monografia (TCC - Curso Superior de Tecnologia em Mecatrônica Industrial) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2018.

SANTOS, J. L. A. *Sistema telemétrico para monitoramento de trens através de rede de sensores sem fio e processamento em sistema embarcado*. 110 f. Dissertação (Mestrado em Informática) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2010.

SILVA, A. T. *Módulos de comunicação wireless para sensores*. 84 f. Monografia (TCC - Licenciatura em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) — Faculdade de Engenharia, Universidade de Porto, Porto, 2007.

SILVEIRA, S. A. da. *Inclusão digital, software livre e globalização contra-hegemônica. Software Livre e Inclusão Digital-Organizadores: Sergio Amadeu de Silveira e Joao Cassino*, Conrad Sao Paulo, v. 7, p. 11, 2003.

TEIXEIRA, E. *Introdução I2C*. 2022. Disponível em: <https://embarcados.com.br/biblioteca-i2c-para-frdm-kl25z/>. Acesso em: Abril. 2022.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. 9. ed. São Paulo: Érica, 2020.

VISSOTO, D. J. *Transmissão de dados via telemetria: uma opção de comunicação remota*. 2004. Disponível em: <https://www.vivaolinux.com.br/>

---

[artigo/Transmissao-de-dados-via-telemetria-uma-opcao-de-comunicacao-remota/](#)).

Acesso em: Abril. 2022.

WENDLING, M. Sensores. *Universidade Estadual Paulista - UNESP*, São Paulo, v. 2, p. 20, 2010.

WOLF, M. *Computers as components: principles of embedded computing system design*. 3. ed. Waltham, USA: Elsevier, 2012.