

# Desenvolvimento de um dispositivo para a coleta de dados de vibração em drones utilizando uma FPGA Kria Kr260, acelerômetros ADXL345 e envio via Bluetooth

Francisco Lima Cavalcante Filho



CENTRO DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa, 2025



Francisco Lima Cavalcante Filho

Desenvolvimento de um dispositivo para a coleta de dados de vibração em drones utilizando uma FPGA Kria Kr260, acelerômetros ADXL345 e envio via Bluetooth

Monografia apresentada ao curso Engenharia da Computação do Centro de Informática, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Bacharel

Orientador: Alisson Vasconcelos de Brito

Maio de 2025

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

F481d Filho, Francisco Lima Cavalcante.

Desenvolvimento de um dispositivo para a coleta de dados de vibração em drones utilizando uma FPGA Kria Kr260, acelerômetros ADXL345 e envio via Bluetooth / Francisco Lima Cavalcante Filho. - João Pessoa, 2025.  
46 f. : il.

Orientação: Alisson Vasconcelos de Brito.  
TCC (Graduação) - UFPB/CI.

1. FPGA. 2. ADXL345. 3. Vibração. 4. IoT. 5. Manutenção preditiva. I. Brito, Alisson Vasconcelos de. II. Título.

UFPB/CI

CDU 004.6



CENTRO DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia da Computação intitulado *Desenvolvimento de um dispositivo para a coleta de dados de vibração em drones utilizando uma FPGA Kria Kr260, acelerômetros ADXL345 e envio via Bluetooth* de autoria de Francisco Lima Cavalcante Filho, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

---

Prof. Dr. Ewerton Monteiro Salvador  
CI/UFPB

---

Mestre Ricardo Cardoso Soares  
IFPI

---

Coordenador(a) do Departamento Departamento de Informática  
Josilene Aires Moreira  
CI/UFPB

João Pessoa, 15 de maio de 2025



## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um dispositivo embarcado para coleta de vibrações em drones, com foco em manutenção preditiva, alinhada aos princípios da Indústria 4.0. O sistema foi desenvolvido utilizando uma FPGA Kria KR260, explorando seu paralelismo para integrar múltiplos núcleos MicroBlaze, cada um dedicado à leitura de sensores acelerômetros ADXL345 conectados via protocolo I<sup>2</sup>C. Os dados adquiridos foram armazenados, processados e, por fim, transmitidos via UART para um módulo Bluetooth HC-05, permitindo comunicação sem fio com dispositivos externos. O propósito do projeto é viabilizar a coleta eficiente de sinais de vibração em tempo real, possibilitando a identificação de falhas mecânicas por meio de análise posterior. Os testes foram conduzidos em um drone modelo MARK4, operando em quatro classes distintas de condição, incluindo estado saudável e diferentes falhas simuladas. Foi utilizada a faixa de medição de  $\pm 16g$ , com taxa de amostragem de 400 Hz. Os resultados demonstraram que a solução proposta é eficaz para aplicações embarcadas com requisitos de baixa latência, alta confiabilidade e escalabilidade, contribuindo como uma ferramenta viável para sistemas de diagnóstico e monitoramento em tempo real.

**Palavras-chave:** FPGA; ADXL345; vibração; IoT; manutenção preditiva.

## ABSTRACT

This work presents the development of an embedded device for vibration data acquisition in drones, focused on predictive maintenance and aligned with Industry 4.0 principles. The system was built using a Kria KR260 FPGA, leveraging its parallelism to integrate multiple MicroBlaze cores, each dedicated to reading ADXL345 accelerometer sensors via the I<sup>2</sup>C protocol. The acquired data was stored, processed, and finally transmitted via UART to an HC-05 Bluetooth module, enabling wireless communication with external devices. The goal of the project is to enable efficient real-time vibration signal collection, allowing for the identification of mechanical faults through subsequent analysis. Experiments were conducted on a MARK4 drone operating under four distinct condition classes, including a healthy state and various simulated faults. A measurement range of  $\pm 16g$  was used, with a sampling rate of 400 Hz. The results demonstrated that the proposed solution is effective for embedded applications requiring low latency, high reliability, and scalability, serving as a viable tool for real-time diagnostic and monitoring systems.

**Key-words:** FPGA;accelerometers;vibration;ADXL345;IoT.

## LISTA DE FIGURAS

1	Diagrama do Protocolo I2C . . . . .	16
2	Diagrama do Protocolo SPI . . . . .	17
3	Módulo acelerômetro ADXL345 . . . . .	19
4	Módulo Bluetooth HC-05 . . . . .	20
5	Dispositivo com os Componentes Conectados . . . . .	21
6	Diagrama de Blocos . . . . .	23
7	Posicionamento do Acelerômetro no Drone . . . . .	25
8	Motor Operando em Condição Saudável . . . . .	26
9	Eixos X, Y e Z do Motor Saudável . . . . .	27
10	Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor Saudável . . . . .	28
11	Configurações do Drone na Falha 1 . . . . .	29
12	Drone Operando em Condições da Falha 1 . . . . .	30
13	Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 1 . . . . .	31
14	Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 1 . . . . .	32
15	Configurações do Drone na Falha 2 . . . . .	33
16	Drone com a Falha Aplicada na Hélice 2 . . . . .	34
17	Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 2 . . . . .	35
18	Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 2 . . . . .	36
19	Configurações do Drone na Falha 3 . . . . .	37
20	Hélice Cortada do Motor 3 . . . . .	38
21	Drone com a Falha Aplicada na Hélice 3 . . . . .	39
22	Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 3 . . . . .	40
23	Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 3 . . . . .	41
24	Recursos Utilizados pela FPGA . . . . .	42

## LISTA DE TABELAS

1	Consumo de energia da FPGA por subsistema . . . . .	43
---	---	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

FPGA - Field Programmable Gate Arrays

IoT - Internet of Things

UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1	FPGAs e Gerenciamento de Periféricos em Sistemas Embarcados . . . . .	15
2.2	Acelerômetros . . . . .	15
2.3	Comunicação entre o Acelerômetro . . . . .	16
2.4	Transmissão . . . . .	17
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	<b>19</b>
3.1	Acelerômetro ADXL345 . . . . .	19
3.2	Módulo Bluetooth HC-05 . . . . .	20
3.3	FPGA Kria Kr260 . . . . .	20
3.4	Projeto . . . . .	22
3.5	Banco de dados . . . . .	24
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>26</b>
4.1	Sem Falhas . . . . .	26
4.2	Falha 1 . . . . .	29
4.3	Falha 2 . . . . .	33
4.4	Falha 3 . . . . .	37
4.5	Utilização de Recursos da FPGA . . . . .	42
4.6	Consumo de Energia . . . . .	43
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>44</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>44</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A interconectividade entre sistemas físicos e serviços em nuvem utilizando tecnologia inteligente moderna, como comunicação máquina a máquina e Internet das Coisas, vem aumentando cada vez mais ao passar dos anos (CARDOSO, 2017). Essa interação resulta em uma grande melhoria na automatização das máquinas, na comunicação, no transporte e na utilização de dispositivos inteligentes capazes de analisar e diagnosticar problemas sem necessitar de uma intervenção humana. Esse cenário é uma das características da quarta revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0, que vivemos atualmente (LIMA, 2020), e seu objetivo é criar sistemas industriais inteligentes e que operem de maneira autônoma, integrando tecnologias como IoT, robótica avançada, big data e computação em nuvem. Segundo FREITAS e MENDES (2021), um dos protagonistas da quarta revolução industrial são os drones, pois sua utilização possui diversas vantagens para a indústria, entre elas a agilidade de locomoção, o baixo custo operacional e a facilidade de acessar áreas que normalmente apresentariam riscos para um ser humano acessar. Os drones podem ser aplicados em diversos contextos, como por exemplo, entregas de mercadorias, no monitoramento agrícola, inspeções de infraestrutura, resgates em casos de desastres e também em pesquisas científicas, como veículos utilizados para testes e validações de tópicos de pesquisa avançados (GURURAJAN; MITCHELL; EBEL, 2019).

Devido à sua natureza, os motores dos drones estão suscetíveis a falhas, para isso a manutenção preditiva é um do processo realizado por diversas empresas e pesquisadores que consiste em uma abordagem que utiliza tecnologias avançadas, como IoT, IA e análise de dados para monitorar em tempo real a saúde dos equipamentos e prever quando uma manutenção será necessária (ABDELLILAH et al., 2023), com o objetivo de para garantir que o equipamento continue operando de maneira eficiente, tenha sua vida útil prolongada e reduzir a probabilidade de falhas. Segundo SILVA e DIAS (2020), uma das maneiras de realizar esse processo é através da análise de vibração dos motores do drone, pois a partir dela, é possível identificar falhas mecânicas e elétricas que podem ser causadas por defeitos internos ou de alimentação dos motores. A vibração excessiva pode causar diversas falhas mecânicas e elétricas, resultando em perda de eficiência, aumento do desgaste dos componentes e em alguns casos, paradas inesperadas do equipamento.

Para abordar esse problema, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo capaz de coletar dados de vibração em tempo real de motores em diferentes condições de operação, sendo capaz de enviar esses dados para uma plataforma através de uma comunicação sem fio. Visando fornecer dados para que seja feita uma análise de vibração e uma possível manutenção preditiva, assim evitando futuros problemas que podem acontecer com o equipamento analisado, evitando custos adicionais de reparo ou

até uma perda total do equipamento.

Para isso, um dos fatores decisivos para a escolha de uma FPGA em vez de um microcontrolador convencional foi a flexibilidade oferecida pelas ferramentas de desenvolvimento baseadas em High-Level Synthesis (HLS). Essa abordagem permite que novos módulos ou técnicas de processamento sejam adicionados posteriormente ao sistema já implementado, sem impactar negativamente a lógica existente. Com isso, o dispositivo pode ser expandido ou adaptado para novas funcionalidades de forma prática e eficiente, garantindo maior escalabilidade do projeto ao longo do tempo.

Foi escolhido a FPGA Kria Kr260 como componente principal desse dispositivo, pois, enquanto microprocessadores convencionais oferecem um processamento sequencial, a FPGA oferece uma capacidade de processamento em paralelo, permitindo a execução de múltiplas tarefas simultaneamente, o que pode ser muito bem aproveitado no contexto desse trabalho, pois o dispositivo poderá realizar a coleta, aplicar tratamento de dados, e enviá-los em alta taxa de amostragem, podendo entregar resultados em tempo real (AGNOL, 2018).

Para coletar os sinais de vibração, foi utilizado o ADXL345 pois ele é um sensor dedicado apenas a coletar dados de aceleração, além de oferecer uma taxa de amostragem que pode chegar até 3200 Hz, junto de sua flexibilidade para selecionar faixas de medições, sendo elas  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$  ou  $\pm 16g$  (ANALOG DEVICES, s.d.), permitindo escolher as configurações ideais para a realização desse projeto. Segundo a pesquisa de GHAZALI e RAHIMAN (2022), que realizou comparações entre diversos acelerômetros diferentes, foi demonstrado que o ADXL345 é capaz de detectar todas as falhas, incluindo variações sutis no equipamento, como por exemplo, uma hélice levemente danificada.

Este artigo tem como objetivo contribuir para a área de monitoramento de sistemas ao desenvolver um dispositivo capaz de coletar sinais de vibração de um motor com diferentes tipos de defeitos, utilizando uma FPGA, que oferece uma alta capacidade de processamento em tempo real, conectada a um ou mais acelerômetros ADXL345, sensores projetados para captar sinais de vibração de alta frequência do motor. E a partir disso, seguir a metodologia de projetar e implementar um sistema de aquisição de dados em FPGA, integrar o acelerômetro no sistema para captar sinais do motor, e por último, validar o desempenho por meio de experimentos com motores, simulando diferentes tipos de falhas e defeitos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 FPGAs e Gerenciamento de Periféricos em Sistemas Embarcados

As FPGAs se destacam por serem plataformas reconfiguráveis para integração de periféricos em sistemas embarcados, o que permite a implementação de múltiplos núcleos de processamento dedicados e protocolos de comunicação personalizados. De acordo com ABOUELGHIT et al. (2020), arquiteturas baseadas em System-on-Chip (SoC) possibilitam a divisão de tarefas entre lógica programável e programadores soft-core como o MicroBlaze, otimizando, então, o gerenciamento de múltiplos dispositivos. Essa abordagem é essencial para sistemas que exigem um alto grau de paralelismo, como drones equipados com diversos sensores distribuídos (FONTOURA; DO NASCIMENTO; GIOPPO, 2013).

No contexto desse trabalho, a utilização de MicroBlaze individuais para cada acelerômetro tem como objetivo garantir processamento dedicado e baixa latência, que é uma estratégia alinhada com a implementação feita por ABOUELGHIT et al. (2020), onde foi atribuído núcleos independentes, cada um deles possuindo MicroBlazes integradas, responsáveis por monitorar as funções primárias do quadróptero e processamento de dados dos sensores presentes em um drone quadróptero, não apenas melhorando a eficiência, mas também simplificando a depuração, pois cada núcleo opera em domínios isolados.

### 2.2 Acelerômetros

Acelerômetros são dispositivos que medem a aceleração estática (gravidade) ou dinâmica (movimento/vibração) em um ou mais eixos. Eles convertem forças mecânicas em sinais elétricos, permitindo a análise de vibrações, orientação e movimentação em sistemas físicos (RODRIGUES et al., 2021). Suas aplicações abrangem desde monitoramento industrial até sistemas embarcados em veículos autônomos e drones (GHAZALI; RAHIMAN, 2022).

Os sensores baseados em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS) destacam-se por sua miniaturização, baixo custo e integração com circuitos digitais. Eles utilizam uma massa sísmica suspensa por micro molas, cujo deslocamento altera a capacitância entre eletrodos fixos, gerando um sinal proporcional à aceleração (RODRIGUES et al., 2021).

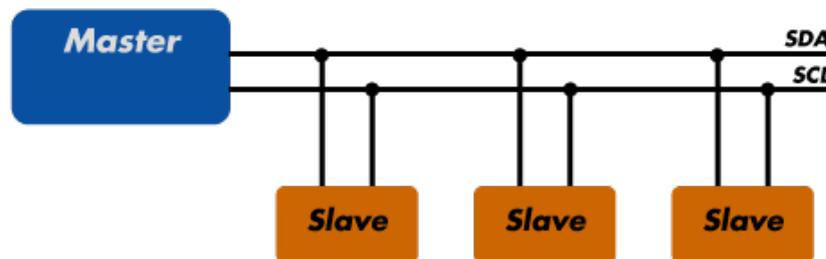
Para este trabalho, foi adotado o ADXL345, que é um acelerômetro triaxial digital com interface I2C/SPI, configurável para faixas de  $\pm 2$  g a  $\pm 16$  g, baseado na tecnologia MEMS (RODRIGUES et al., 2021). Sua sensibilidade de 3,9 mg/LSB (em  $\pm 2$  g) permite detectar vibrações de baixa amplitude, essencial para identificar anomalias em sistemas críticos (GHAZALI; RAHIMAN, 2022). Estudos demonstram que o sensor é capaz de detectar falhas em drones, identificando hélices desbalanceadas e rachaduras em braços com

maior precisão que sensores SW420 (GHAZALI; RAHIMAN, 2022), operar em ambientes rotativos, mantendo um erro absoluto médio de 0,38% em rotações de 300 rpm, validando sua precisão em frequências até 1,2 kHz (ROSSI et al., 2023) e integrar-se a sistemas IoT, sendo compatível com microcontroladores como Arduino, usado para correlacionar vibrações (0,22 g) com parâmetros de usinagem em tornos (SHANKAR et al., 2022).

### 2.3 Comunicação entre o Acelerômetro

A comunicação com o acelerômetro ADXL345 é realizada via protocolo I2C (Inter-Integrated Circuit), amplamente adotado em sistemas embarcados devido à sua simplicidade de implementação e baixo custo em termos de pinos físicos. O I2C opera com dois fios (SDA para dados e SCL para clock), permitindo a conexão de múltiplos dispositivos em uma única rede (até 128 dispositivos com endereçamento de 7 bits). Essa característica é vantajosa em sistemas com múltiplos sensores, pois reduz a complexidade de cabeamento e facilita a escalabilidade (FONTOURA, DO NASCIMENTO e GIOPPO, 2013).

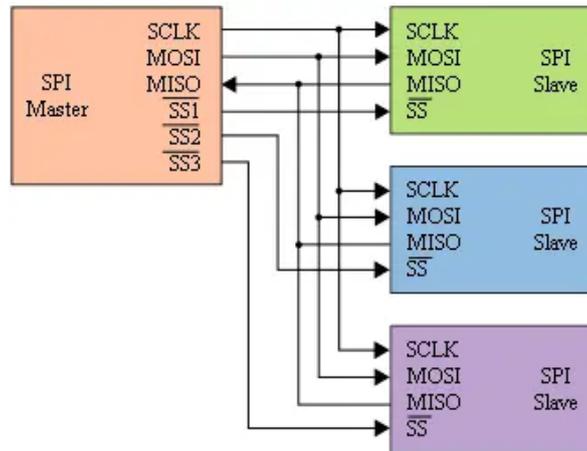
Figura 1: Diagrama do Protocolo I2C



Fonte: <https://autocorerobotica.blog.br/conhecendo-o-protocolo-i2c-com-arduino/>

Em contraste, o protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) utiliza quatro fios (MISO, MOSI, SCK e CS) e opera em modo full-duplex, proporcionando maior velocidade de transmissão em comparação ao I2C. No entanto, sua implementação exige um pino dedicado (Chip Select) para cada dispositivo escravo, aumentando a demanda por recursos físicos em sistemas com múltiplos sensores (PEREZ-CASTILLO; MORALES-CAPORAL, 2018). Enquanto o SPI é ideal para aplicações que exigem alta taxa de transferência (como aquisição de dados em tempo real), o I2C é preferido em projetos com restrições de espaço e necessidade de economia de energia, como em dispositivos vestíveis ou sistemas IoT (ABDELHEDI et al., 2016; PEREZ-CASTILLO; MORALES-CAPORAL, 2018).

**Figura 2: Diagrama do Protocolo SPI**



Fonte: <https://embarcados.com.br/spi-parte-1/>

No contexto deste trabalho, a escolha pelo I2C justifica-se pela sua adequação a sistemas embarcados de baixa complexidade, onde a redução de pinos e a facilidade de configuração são prioritárias. Conforme destacado por ABDELHEDI et al. (2016), o I2C pode suportar sistemas multi-master e sua implementação em software é simplificada, mesmo que sua lógica de controle seja mais complexa que a do SPI. Além disso, o ADXL345 permite a configuração de registradores via I2C para ajustar parâmetros como faixa de medição ( $\pm 2g$  a  $\pm 16g$ ) e taxa de amostragem (até 3.200 Hz), tornando-o versátil para aplicações em drones (ANALOG DEVICES, 2008).

## 2.4 Transmissão

A transmissão dos dados processados pela FPGA para sistemas externos é realizada via Bluetooth, uma tecnologia sem fio amplamente utilizada em sistemas embarcados devido ao seu baixo consumo de energia, alcance adequado e facilidade de integração com dispositivos móveis. Essa escolha é estratégica para aplicações em drones em voo, onde a mobilidade e a ausência de cabos são requisitos críticos. Enquanto artigos como PEREZ-CASTILLO e MORALES-CAPORAL (2018) optaram por conexões Ethernet para transmissão de dados em tempo real via TCP/IP, ideal para ambientes fixos com alta demanda de largura de banda.

O Bluetooth opera em conjunto com a interface UART da FPGA, simplificando a implementação do protocolo de comunicação e reduzindo o overhead de hardware. De acordo com BISWAS et al. (2015), a combinação de Bluetooth e UART permite transmissão sem fio confiável com baixa complexidade de projeto, ideal para sistemas embarcados com restrições de energia. Além disso, o Bluetooth oferece compatibilidade nativa

com dispositivos móveis, como smartphones ou tablets, facilitando o monitoramento em tempo real durante testes de voo, sem a necessidade de infraestrutura adicional.

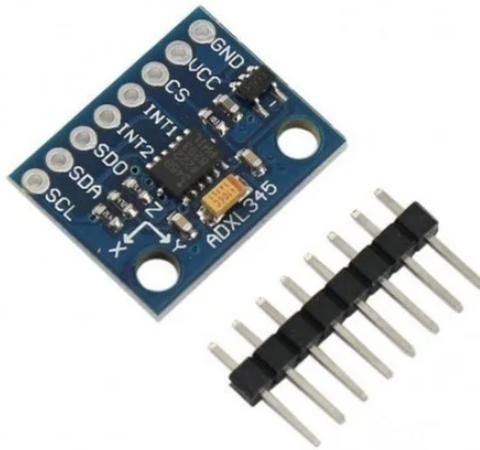
Em contraste, soluções baseadas em Ethernet, como utilizados por PEREZ-CASTILLO e MORALES-CAPORAL (2018), exigem conexão física por cabo, inviabilizando aplicações em drones em movimento livre. Já o RS232, utilizado por BISWAS et al. (2015), embora amplamente utilizado em sistemas legados, também limita-se a comunicação por fio, restringindo a mobilidade. A escolha pelo Bluetooth, portanto, alinha-se às demandas de sistemas aéreos não tripulados, onde a liberdade de movimento e a redução de peso são prioritárias.

## 3 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 3.1 Acelerômetro ADXL345

Como citado anteriormente nesse artigo, o modelo de acelerômetro utilizado no projeto é o ADXL345, um sensor de aceleração de três eixos de alta resolução (13 bits) com comunicação digital com a FPGA realizado por meio do protocolo I2C, visando facilitar a integração com múltiplos dispositivos no mesmo barramento.

**Figura 3: Módulo acelerômetro ADXL345**



Fonte: Página do módulo no site Eletrogate, 2025. Disponível em:  
<https://www.eletrogate.com/modulo-gy-291-acelerometro-3-eixos-adxl345>

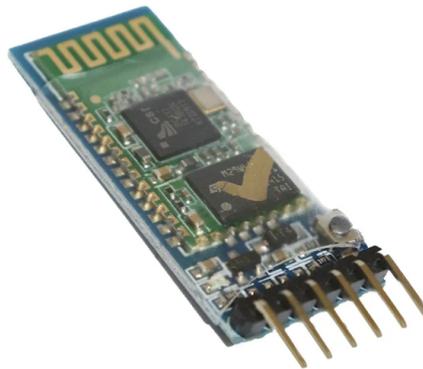
Cada ADXL345 foi configurado para operar com uma faixa de medição de  $\pm 16g$ , valor adequado para a detecção de valores de vibração máxima nos motores onde os testes foram realizados. A taxa de amostragem foi fixada em 400 Hz, permitindo uma aquisição suficientemente rápida para capturar as variações nas vibrações. Os dados coletados foram convertidos diretamente para valores em g, facilitando a análise posterior e a integração com sistemas de monitoramento e diagnóstico.

Na implementação com a FPGA, os acelerômetros foram conectados em uma interface PMOD, onde cada um é conectado a um núcleo MicroBlaze dedicado, responsável por realizar a comunicação via I2C, adquirir e interpretar os dados dos eixos X, Y e Z recebidos do acelerômetro e, por fim, salvá-los na memória BRAM da FPGA.

### 3.2 Módulo Bluetooth HC-05

Para a transmissão sem fio dos dados adquiridos pelos acelerômetros, foi utilizado o módulo HC-05, que envia os dados através de uma conexão Bluetooth em sua versão 3.0, com alcance de até 10 metros. Foi feita a escolha desse módulo, pois, para realizar os testes iniciais em bancada, um alcance maior não seria necessário. Para versões futuras do projeto, será utilizado um módulo com uma versão do Bluetooth mais atualizada, podendo, assim, receber dados a uma distância maior, possibilitando testes com o drone em voo. A comunicação com esse módulo foi realizada por meio de uma interface UART, configurada no Processing System (PS) da FPGA, responsável pelo processamento principal do dispositivo. Tanto a configuração quanto o envio dos dados foram realizados utilizando as funções da biblioteca `xuartlite.h`.

**Figura 4: Módulo Bluetooth HC-05**



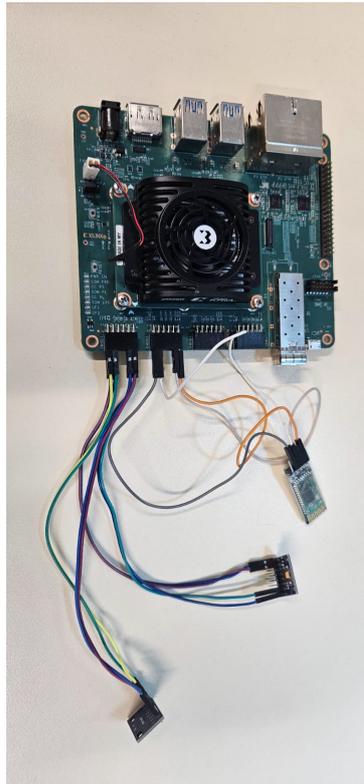
Fonte: Página do módulo no site Eletrogate, 2025. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/modulo-bluetooth-rs232-hc-05>

O PS acessa a memória BRAM, onde os núcleos MicroBlaze armazenam os dados coletados pelos acelerômetros, formata esses dados em uma string no formato apropriado e, em seguida, os transmite pela UART para o módulo Bluetooth.

### 3.3 FPGA Kria Kr260

O desenvolvimento do dispositivo proposto foi realizado utilizando a FPGA Kria KR260 Robotics Starter Kit, uma plataforma voltada para aplicações em visão computacional, robótica e automação, equipada com um System-on-Module (SoM) baseado no Zynq UltraScale+ MPSoC. Essa arquitetura permite a integração de um sistema embarcado completo, com núcleos ARM no Processing System (PS) e lógica programável no Programmable Logic (PL).

**Figura 5: Dispositivo com os Componentes Conectados**



Fonte: Capturado pelo Autor

O projeto foi desenvolvido utilizando o software Vivado 2023.2, ferramenta da Xilinx voltada ao desenvolvimento de sistemas embarcados baseados em FPGA. Por meio dela, foi possível realizar a criação e integração dos blocos lógicos do sistema, bem como a geração da arquitetura de hardware. No ambiente, foi elaborado o diagrama de blocos que interliga os principais módulos da arquitetura: núcleos MicroBlaze, interfaces I<sup>2</sup>C para comunicação com os acelerômetros ADXL345, memória BRAM para troca de dados entre os diferentes núcleos do sistema, e uma interface UART conectada ao PS para envio dos dados via Bluetooth.

Cada acelerômetro foi conectado a um núcleo MicroBlaze independente, responsável por gerenciar a comunicação via I<sup>2</sup>C e armazenar os dados adquiridos em regiões específicas da BRAM. A MicroBlaze é um processador soft-core configurável da Xilinx, implementado na lógica programável da FPGA, que permite executar tarefas específicas de forma independente e paralela dentro do sistema. Essa abordagem modular facilita a escalabilidade do sistema e permite um controle mais preciso sobre cada sensor.

A etapa de desenvolvimento de software foi realizada utilizando o Vitis 2023.2, outro ambiente de desenvolvimento integrado da Xilinx voltado à criação de aplicações embarcadas para sistemas baseados em FPGA. Com ele, foi possível programar o núcleo de

processamento do Processing System (PS) utilizando linguagem C/C++, além de integrar o software ao hardware previamente gerado no Vivado. Nesse ambiente, foi implementada a aplicação embarcada executada no PS, cuja função principal é ler os dados gravados na BRAM pelos núcleos MicroBlaze, realizar a formatação das informações e enviá-las por meio da UART para o módulo Bluetooth HC-05.

Essa divisão entre hardware, desenvolvida no Vivado, e software, desenvolvido no Vitis, permitiu a construção de uma solução flexível, eficiente e adaptável às necessidades do projeto, com um fluxo de desenvolvimento baseado na separação clara entre as responsabilidades de aquisição, processamento e transmissão de dados.

### **3.4 Projeto**

A arquitetura do sistema proposto foi desenvolvida com base em uma estrutura modular, visando garantir organização, escalabilidade e facilidade de manutenção. O projeto foi implementado por meio do ambiente Vivado 2023.2, onde foi criado o diagrama de blocos que representa a interconexão dos principais componentes utilizados na lógica programável da FPGA Kria KR260.



O projeto conta com múltiplos núcleos MicroBlaze, cada um responsável pela comunicação com um acelerômetro ADXL345 por meio do protocolo I<sup>2</sup>C. Os dados adquiridos por cada núcleo são armazenados em endereços específicos da memória BRAM, configurada para funcionar como uma área de troca entre o Programmable Logic (PL) e o Processing System (PS) da plataforma.

---

**Algorithm 1** Coletar e armazenar os dados dos acelerômetros na BRAM

---

**Require:** Acelerômetro ADXL345 conectado

**Ensure:** Dados de aceleração gravados na BRAM

- 1: Inicializar acelerômetro ADXL345
  - 2: Coletar  $N$  amostras para calibração
  - 3: Calcular médias:  $meanX$ ,  $meanY$ ,  $meanZ$
  - 4: **while** verdadeiro **do**
  - 5:   Ler valores do acelerômetro:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$
  - 6:   Calcular valores ajustados subtraindo médias
  - 7:   Separar partes inteiras e fracionárias dos valores
  - 8:   Armazenar valores na BRAM
  - 9: **end while**
- 

O PS do SoM Zynq UltraScale+ MPSoC presente na Kria KR260 é composto por núcleos ARM Cortex-A53, sendo um deles responsável pela execução da aplicação embarcada desenvolvida no ambiente Vitis 2023.2. Essa aplicação realiza a leitura dos dados gravados na BRAM, formata os valores em strings e os transmite via UART ao módulo Bluetooth HC-05, estabelecendo a interface de comunicação sem fio do sistema.

---

**Algorithm 2** Código principal

---

**Require:** BRAM com dados dos acelerômetros, interface UART configurada

**Ensure:** Dados de aceleração enviados via Bluetooth

- 1: Inicializar interface UART
  - 2: **if** inicialização falhar **then**
  - 3:   **return** falha
  - 4: **end if**
  - 5: **while** verdadeiro **do**
  - 6:   Ler dados do acelerômetro 1 da BRAM ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )
  - 7:   Ler dados do acelerômetro 2 da BRAM ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )
  - 8:   Formatar dados como string CSV
  - 9:   Enviar dados formatados pela interface UART
  - 10: **end while**
- 

### 3.5 Banco de dados

Para a construção do banco de dados, foram conduzidos experimentos com um drone MARK4 de 10 polegadas, em seis diferentes classes de operação, sendo uma correspondente à condição saudável e as demais associadas a diferentes falhas. Para cada uma

das classes, foram realizadas cinco coletas de 10000 pontos, cada uma contendo os valores dos eixos X, Y e Z , totalizando um volume suficiente de dados por condição de voo.

Durante a execução dos testes, os dados de aceleração foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 400 Hz. Para a validação do funcionamento dos acelerômetros ADXL345, foi utilizada a faixa de medição de  $\pm 16g$ . Essa abordagem permitiu verificar o comportamento de vibração do drone em altas amplitudes de vibração. Os valores lidos pelos acelerômetros foram transmitidos via Bluetooth para um dispositivo receptor.

As coletas foram realizadas com o drone operando a uma rotação constante de 1200 rpm nas hélices, de modo a manter um padrão de funcionamento durante os experimentos. O acelerômetro utilizado foi posicionado em um dos braços do frame do drone, a uma distância de 8 cm do motor, conforme ilustrado na Figura 7. Esse posicionamento foi adotado com o objetivo de captar as vibrações provenientes da região de maior concentração de esforços mecânicos, sem interferir na estabilidade do voo.

**Figura 7: Posicionamento do Acelerômetro no Drone**



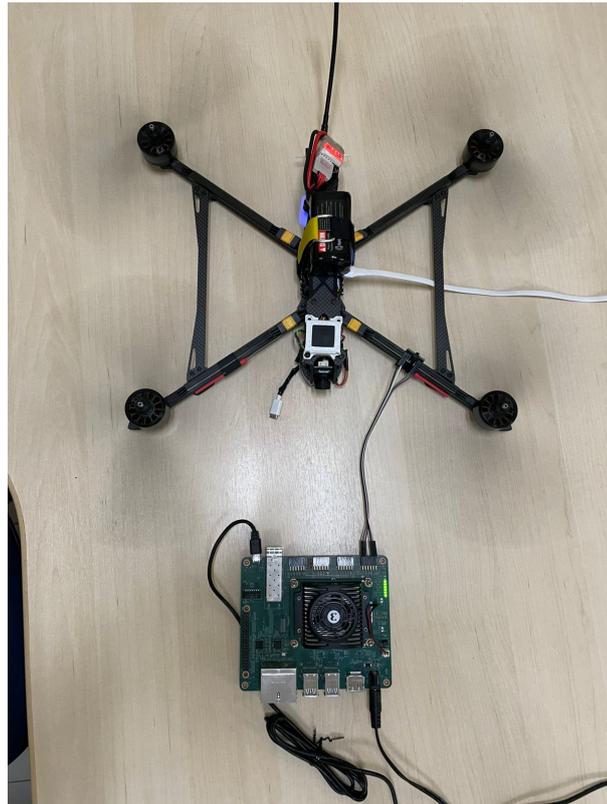
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 4.1 Sem Falhas

Como primeira classe de dados obtidos, foi feito o experimento com os motores do drone operando em condição saudável e na velocidade padrão definida em 1200 rpm.

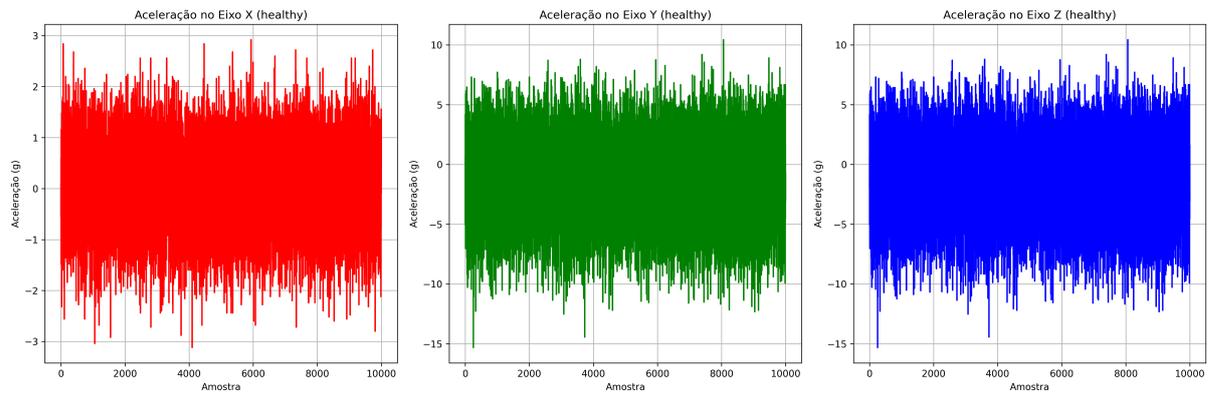
**Figura 8: Motor Operando em Condição Saudável**



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 9 a seguir apresenta os sinais dos três eixos obtidos pelo acelerômetro ADXL345 durante a operação do motor em condição saudável.

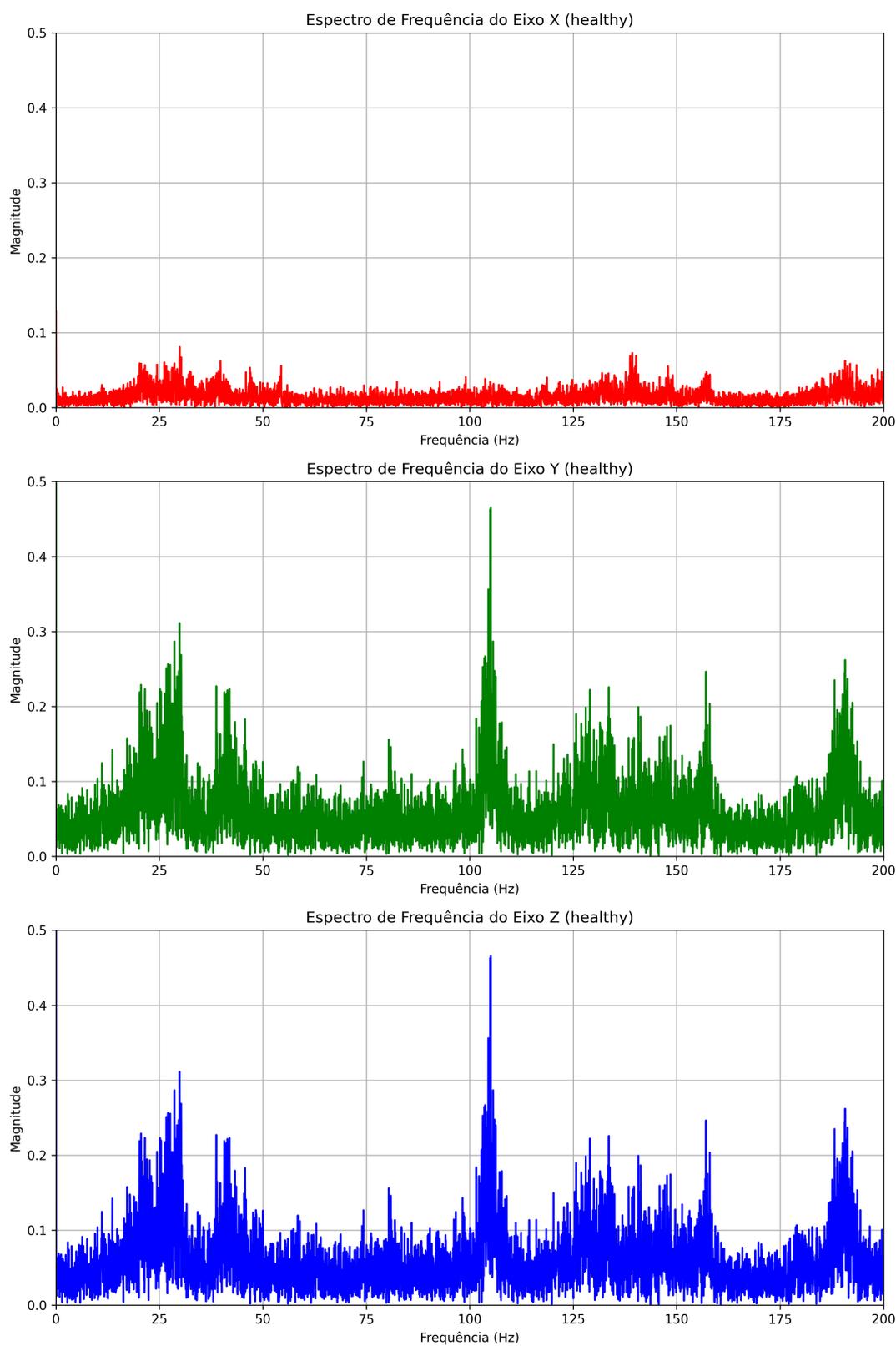
**Figura 9: Eixos X, Y e Z do Motor Saudável**



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, a Figura 10 apresenta a Transformada Rápida de Fourier desses eixos.

Figura 10: Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor Saudável

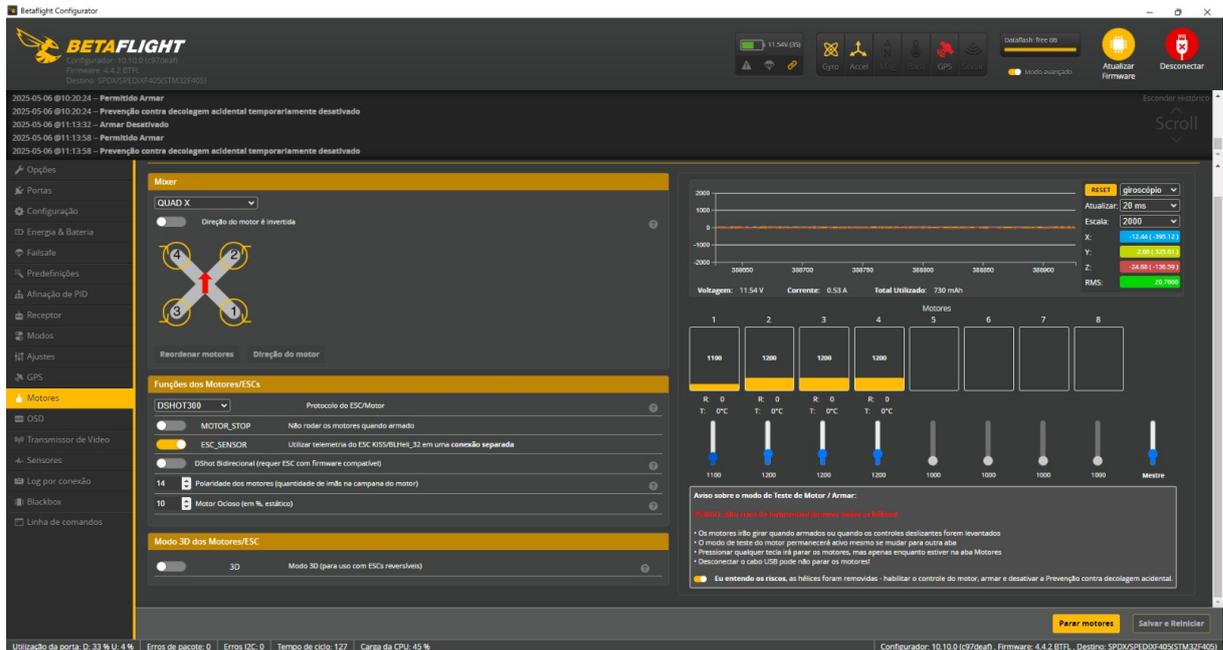


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Falha 1

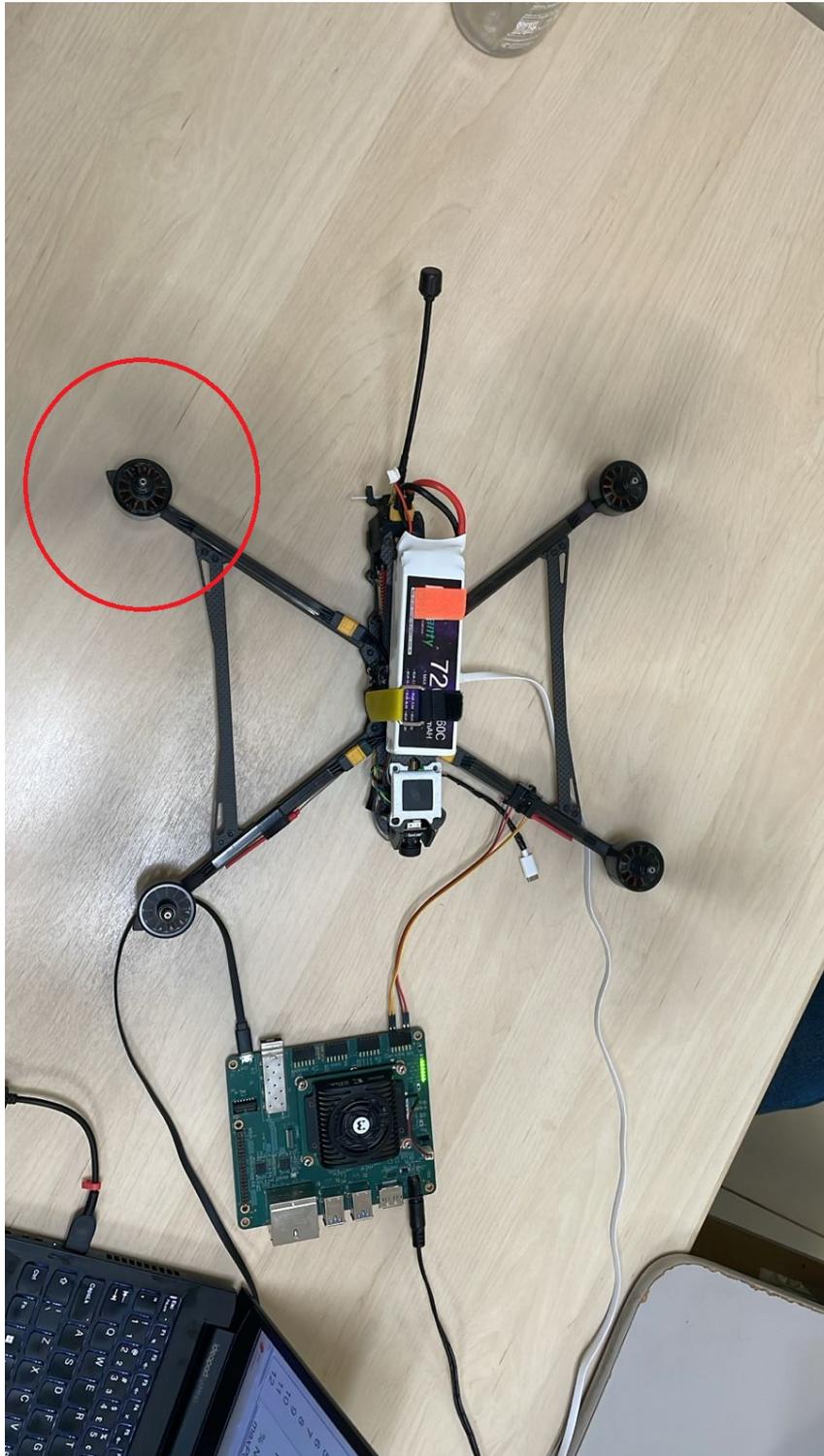
Como segunda classe de dados, foi feito o experimento com o motor operando na primeira condição de falha, onde o motor 1 opera em uma velocidade 8.4% menor que o restante dos motores ( 1100 rpm ), dessa forma simulando a primeira falha. O motor com falha está sinalizado pelo círculo vermelho na Figura 12.

Figura 11: Configurações do Drone na Falha 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

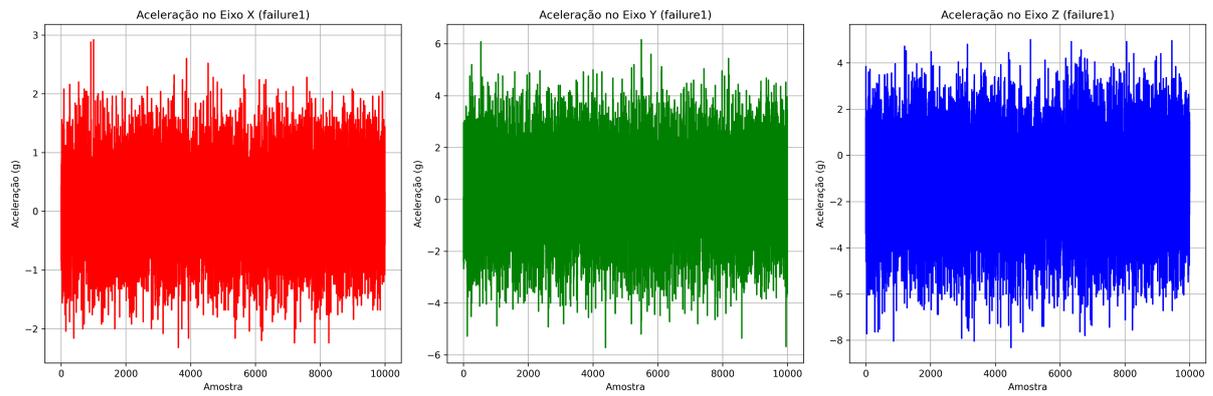
Figura 12: Drone Operando em Condições da Falha 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 13 a seguir apresenta os sinais dos três eixos obtidos pelo acelerômetro.

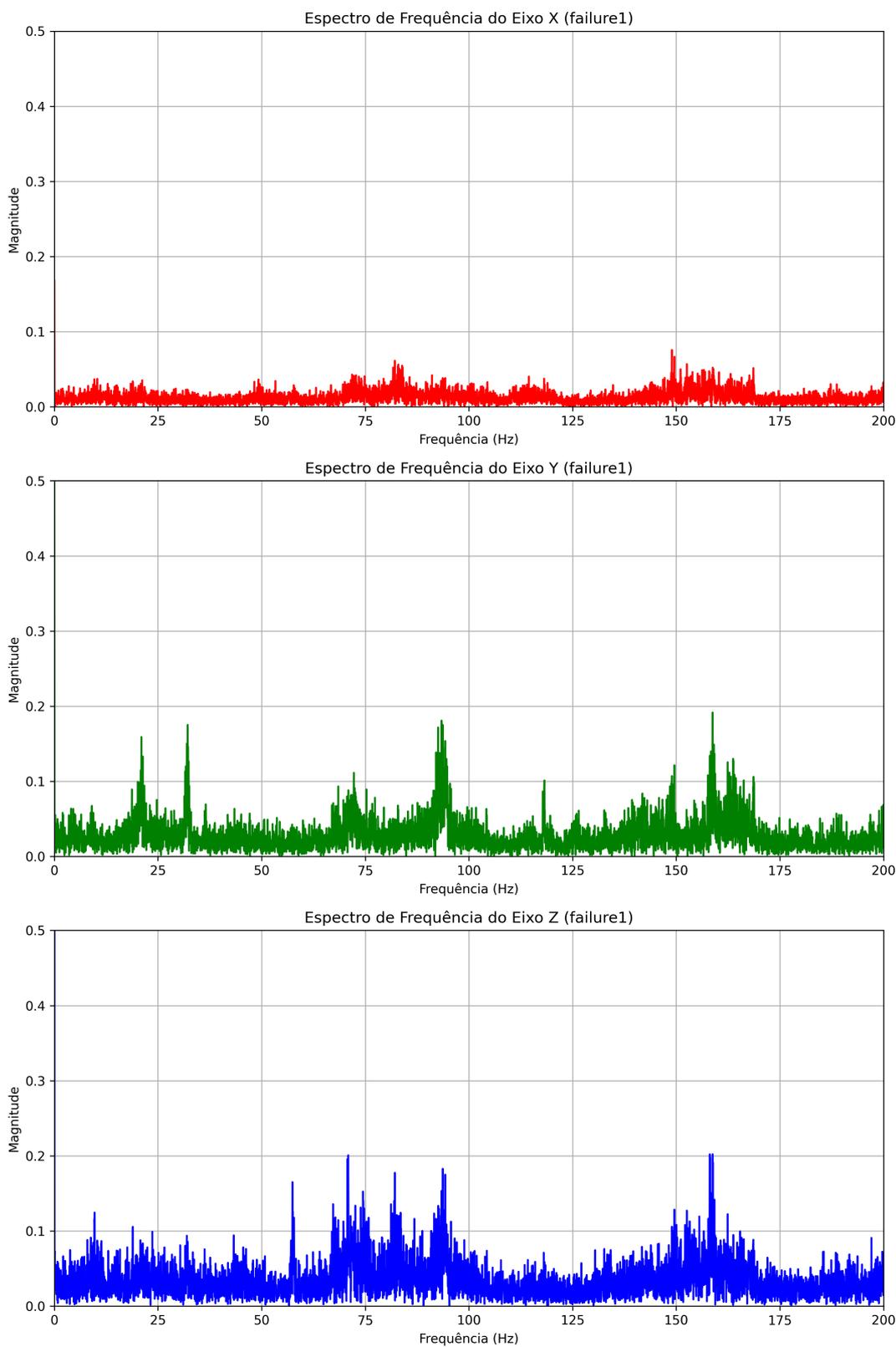
**Figura 13: Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 1**



Fonte: Elaborado pelo autor.

E em seguida, na Figura 14, a Transformada Rápida de Fourier dos três eixos.

Figura 14: Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 1



Fonte: Elaborado pelo autor.

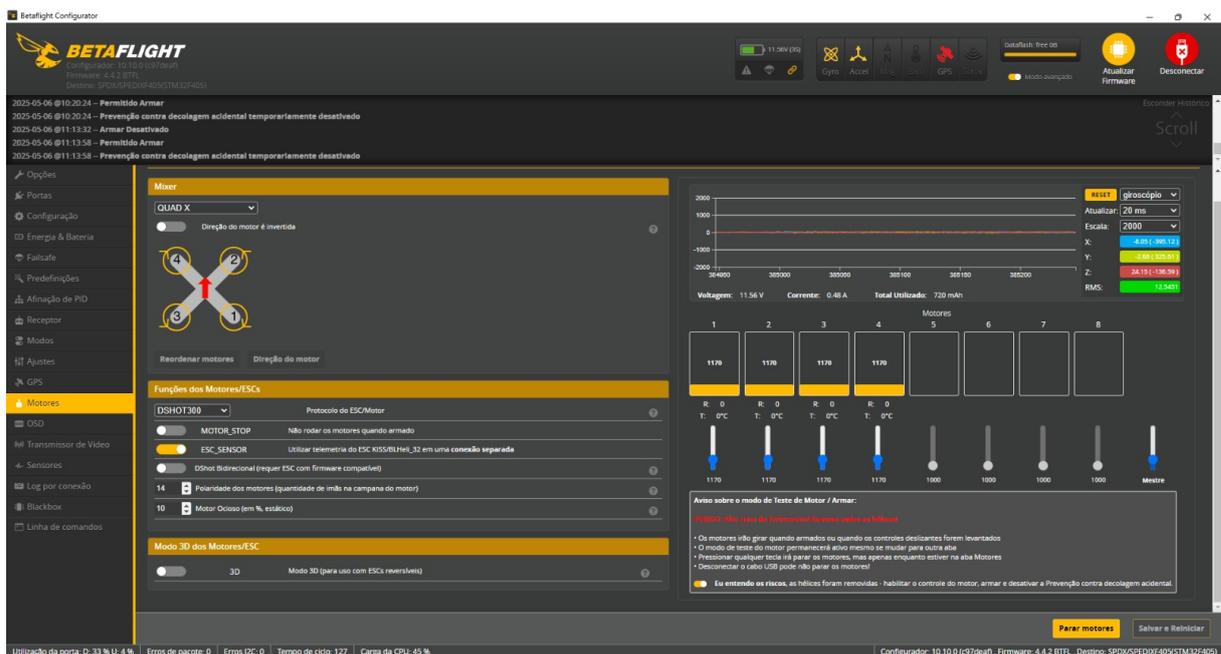
Por meio da análise da Figura 14 no domínio da frequência, é possível identificar padrões vibracionais característicos do comportamento dinâmico do sistema em condição de falha.

Observa-se que, no eixo Z, o pico que aparece em 100 Hz na Figura 10, aparece no gráfico acima mais largo e deslocado para perto de 90 Hz. O alargamento pode indicar que nem todas as fontes de vibração estão sincronizadas. O que é o caso dessa falha.

### 4.3 Falha 2

Para a segunda falha, foi adicionada uma fita de 20mm posicionada a uma distância de 75mm do centro do motor 2. Para realizar esse experimento, foi necessário reduzir a velocidade do motor em 2,5% como medida de segurança, pois o drone começou a apresentar muita instabilidade na velocidade total analisada, operando assim com uma rotação de 1170 rpm.

Figura 15: Configurações do Drone na Falha 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

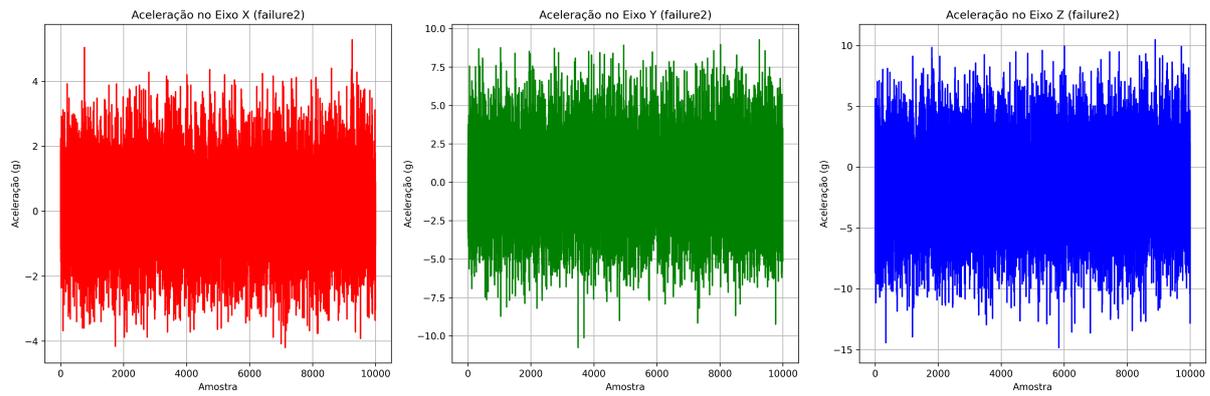
Figura 16: Drone com a Falha Aplicada na Hélice 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 a seguir apresenta os sinais dos três eixos obtidos pelo acelerômetro.

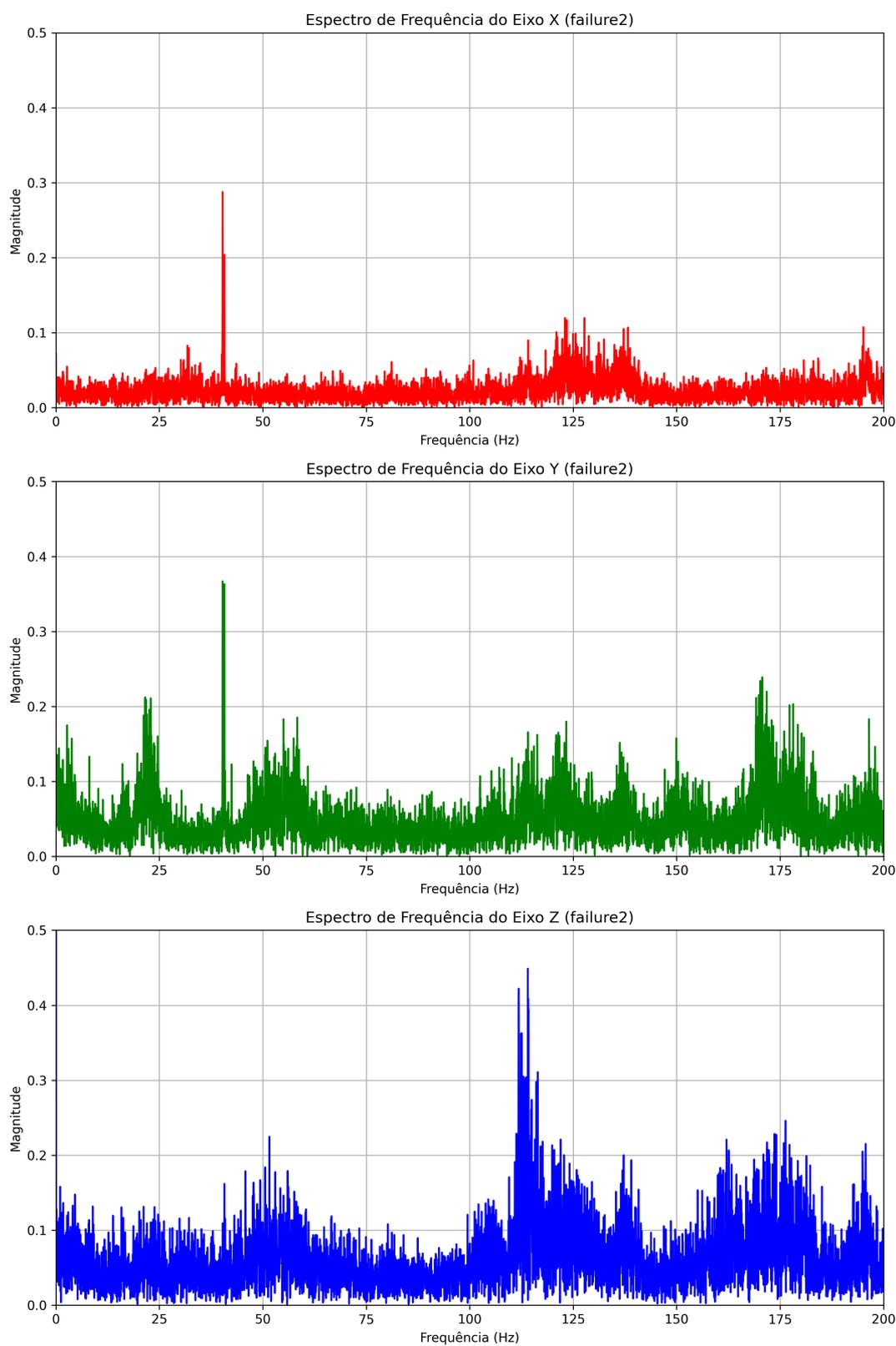
Figura 17: Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 2



Fonte: Elaborado pelo autor.

E em seguida, na Figura 18, a Transformada Rápida de Fourier dos três eixos.

Figura 18: Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 2



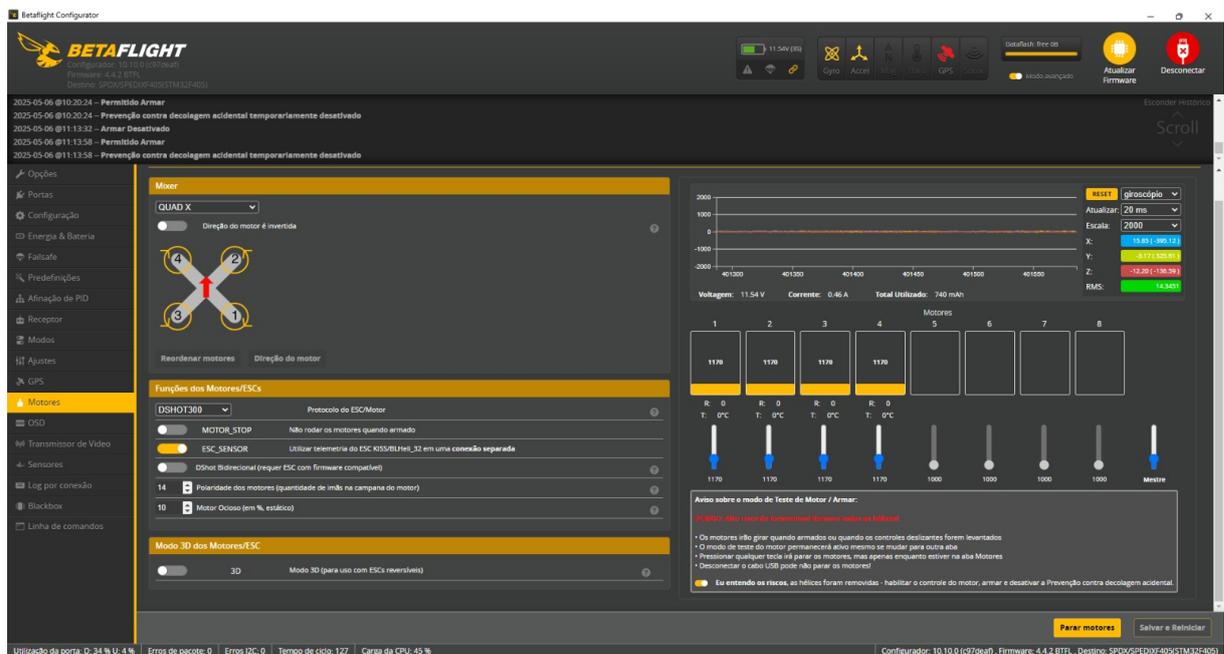
Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico acima, podemos observar o surgimento de um novo pico em torno de 40 Hz, tanto no eixo X quanto no Y. Também é possível observar no eixo Z, que o pico que antes era presente em torno do 100 Hz, sofre um deslocamento para a direita, evidenciando o desbalanceamento causado pela carga aplicada.

#### 4.4 Falha 3

Para a terceira falha, removido um pedaço de uma das hélices do motor 3, mantendo a carga adicionada no experimento da falha 2. Para realizar esse experimento, os motores continuaram a operar com a redução de 2,5% em sua velocidade como medida de segurança, pois o drone ainda apresentava muita instabilidade na velocidade total analisada, operando assim com uma rotação de 1170 rpm.

Figura 19: Configurações do Drone na Falha 3



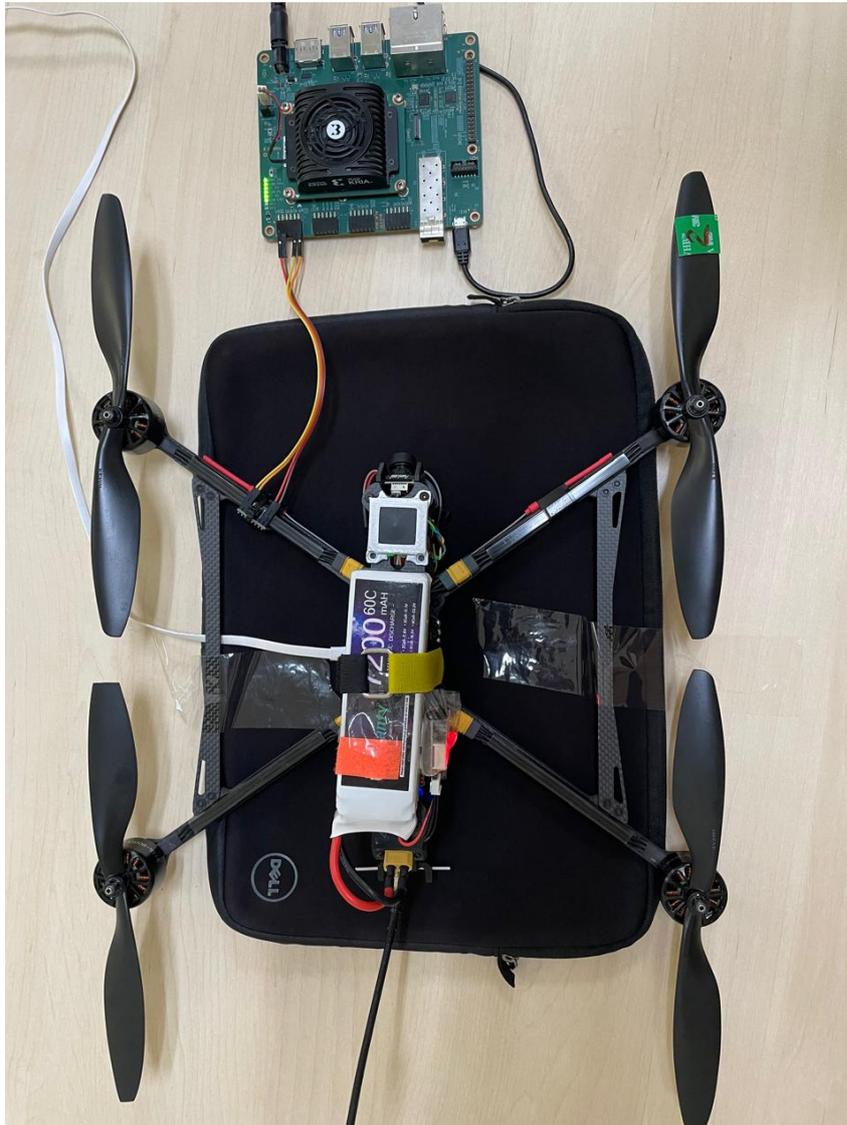
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 20: Hélice Cortada do Motor 3**



Fonte: Elaborado pelo autor.

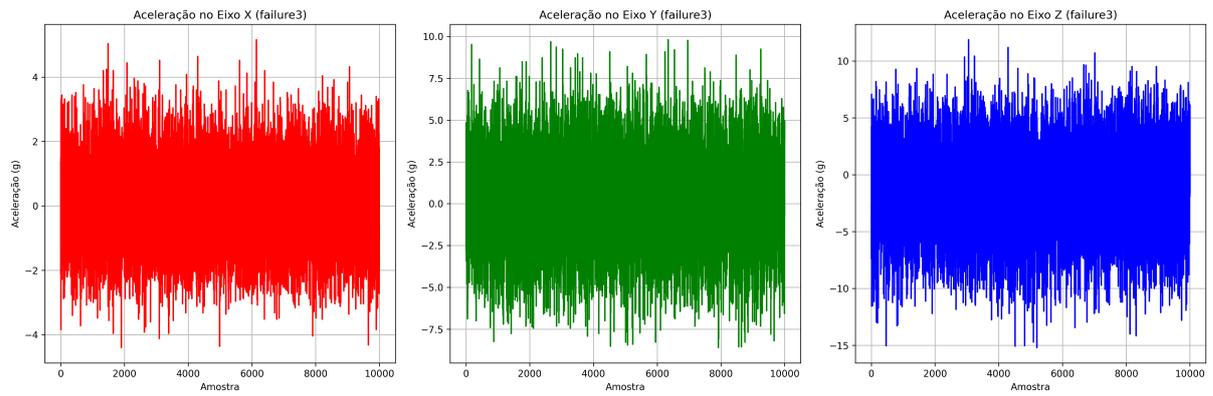
Figura 21: Drone com a Falha Aplicada na Hélice 3



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 a seguir apresenta os sinais dos três eixos obtidos pelo acelerômetro.

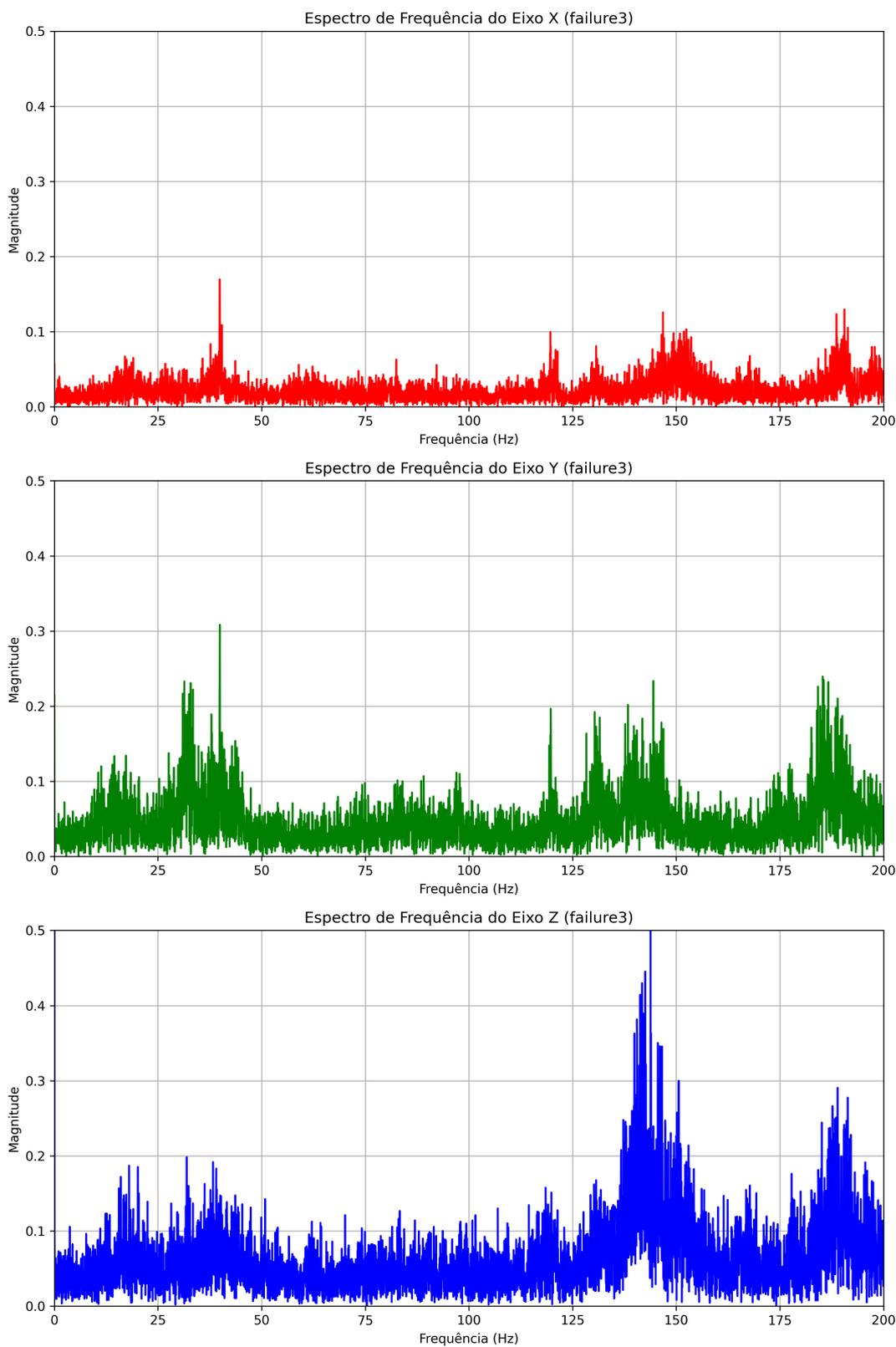
**Figura 22: Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 3**



Fonte: Elaborado pelo autor.

E em seguida, na Figura 23, a Transformada Rápida de Fourier dos três eixos.

Figura 23: Transformada Rápida de Fourier dos Eixos X, Y e Z do Motor com a Falha 3

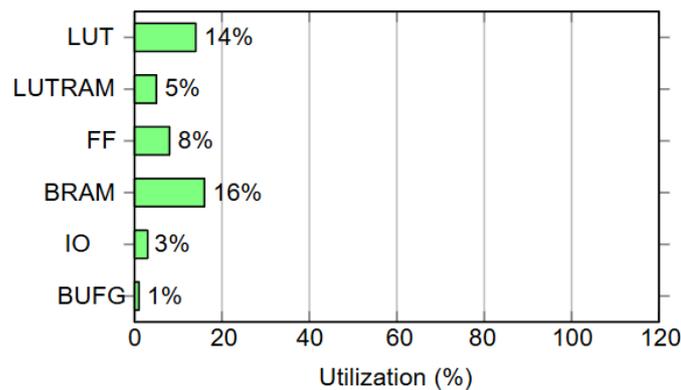


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que houve persistência do pico em 40 Hz, que foi herdado da falha anterior, e um deslocamento ainda maior do pico do eixo Z para a direita, em comparação com a Falha 2, o que evidencia ainda mais o desbalanceamento causado pela adição da falha.

#### 4.5 Utilização de Recursos da FPGA

Figura 24: Recursos Utilizados pela FPGA



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 24 apresenta o consumo de cada recurso da placa FPGA, com destaque à BRAM, que é a memória interna compartilhada entre o núcleo principal de processamento e as MicroBlazes, utilizada para armazenar os dados adquiridos do ADXL345, que foram utilizados apenas 16% de sua capacidade máxima, e LUT, que indica a utilização da lógica combinatória disponível pela placa, seu valor de 14% indica que o projeto possui um design simples e otimizado, uso eficiente dos recursos alternativos e possui um espaço significativo para adicionar novas funcionalidades.

## 4.6 Consumo de Energia

Tabela 1: Consumo de energia da FPGA por subsistema

Grupo do Componente	Energia (W)	Função no Sistema
microblaze (0, 1)	0,012 (< 2%)	Accelerometers
local_memory (microblaze_0, 1)	0,008 (< 2%)	Accelerometers
DMA/Data controllers (axi_dma_0)	0,003 (< 1%)	Accelerometers
Communication interfaces (axi_iic_0, 1)	0,002 (< 1%)	I2C Communication
Peripheral controllers (microblaze_axi_periph, axi_uartlite)	< 0,001 (< 1%)	Bluetooth
I/O buffers (som240_1_connector_*group)	< 0,001 (< 1%)	Accelerometers

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 1 apresenta a energia que cada componente do projeto está consumindo da fonte de energia. De acordo com os dados apresentados, podemos observar que os componentes estão consumindo pouca energia, o que é ideal para o contexto desse projeto.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O sistema desenvolvido demonstrou ser uma solução viável e eficiente para a coleta de dados de vibração em drones, com potencial de aplicação em estratégias de manutenção preditiva. A estrutura modular com múltiplos núcleos MicroBlaze permitiu paralelismo na aquisição de dados e boa escalabilidade, enquanto a transmissão via Bluetooth mostrou-se adequada para coletas remotas em ambientes dinâmicos.

A realização dos testes em diferentes condições operacionais validou o funcionamento do dispositivo e comprovou sua capacidade de capturar variações sutis nas vibrações dos motores. A utilização de todas as faixas de medição do ADXL345 permitiu adaptar o sistema a utilizar uma faixa de vibração adequada, evitando saturações e mantendo a integridade e precisão dos dados.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a expansão do sistema para múltiplos sensores distribuídos no drone, além da implementação de um módulo responsável por executar algoritmos para detecção automática de falhas. Com esses avanços, o sistema pode evoluir de uma ferramenta de aquisição para uma solução completa de monitoramento e diagnóstico em tempo real, contribuindo de forma significativa para aplicações na Indústria 4.0 e na confiabilidade de sistemas embarcados autônomos.

Além disso, vale destacar que a plataforma Kria KR260 possui aceleradores integrados, como unidades de processamento vetorial e suporte a IPs de inteligência artificial otimizados para FPGAs, o que a torna ideal para a execução de modelos de inferência embarcada. Essa característica abre espaço para futuras integrações com algoritmos de aprendizado de máquina diretamente no dispositivo, permitindo que a análise e a detecção de falhas possam ser realizadas em tempo real, sem a necessidade de comunicação com plataformas externas. Tal evolução pode transformar o sistema em uma solução autônoma de diagnóstico embarcado baseada em IA.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABDELHEDI, Sahar et al. Vivado HLS-based implementation of a fall detection decision core on an FPGA platform. In: INTERNATIONAL DESIGN & TEST SYMPOSIUM (IDT), 11., 2016, Hammamet. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2016. p. 115–120. DOI: 10.1109/IDT.2016.7835666.
- [2] ABDELLILAH, Fidma Mohamed; HAMOUR, Nora; OUCHANI, Samir; BENSLIMANE, Sidi Mohamed. Predictive maintenance approaches in Industry 4.0: a systematic literature review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENABLING TECHNOLOGIES: INFRASTRUCTURE FOR COLLABORATIVE ENTERPRISES (WETICE), 2023, Paris. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2023. p. 1–6. DOI: 10.1109/WETICE57085.2023.10477802.
- [3] ABOUELGHIT, Fady A. et al. Motor failure detection in FPGA-based fault-tolerant quadcopters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRONICS (ICM), 32., 2020, Aqaba, Jordan. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2020. p. 1–6. DOI: 10.1109/ICM50269.2020.9331764.
- [4] AGNOL, Cleiton Dal. **Comparação entre microcontroladores e aplicação do FPGA no controle do conversor Boost**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2018.
- [5] ANALOG DEVICES. ADXL345 3-Axis Digital Accelerometer Datasheet. [S.l.]: Analog Devices, s.d. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL345.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2025.
- [6] BISWAS, D.; DAS, S.; MONDAL, S.; SAHA, S.; DEY, S. S. Real-time arm movement recognition using FPGA. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CIRCUITS AND SYSTEMS (ISCAS), 2015, Lisboa. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1498–1501. DOI: 10.1109/ISCAS.2015.7168746.
- [7] CARDOSO, Marcelo de Oliveira. **Indústria 4.0: a quarta revolução industrial**. 2016. Monografia (Curso de Especialização em Automação Industrial) – Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- [8] FONTOURA, Felipe Michels; DO NASCIMENTO, Leandro Piekarski; GIOPPO, Lucas Longen. Robô hexápode controlado por FPGA. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em:

[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8138/2/CT\\_COENC\\_2012.2\\_02.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8138/2/CT_COENC_2012.2_02.pdf).  
Acesso em: 15 mar. 2025.

- [9] FREITAS, Ariane Carvalho de; MENDES, Marcelle Ferreira. Drones como protagonista na Indústria e Logística 4.0. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CIÊNCIAS INTEGRADAS DA UNAERP – CAMPUS GUARUJÁ, 18., 2021, Guarujá. **Anais...** Guarujá: UNAERP, 2021.
- [10] GHAZALI, Mohamad Hazwan Mohd; RAHIMAN, Wan. An investigation of the reliability of different types of sensors in the real-time vibration-based anomaly inspection in drone. *Sensors*, [S.l.], v. 22, n. 16, p. 6015, 2022. DOI: 10.3390/s22166015.
- [11] GURURAJAN, Srikanth; MITCHELL, Kyle; EBEL, William. Flights of a multirotor UAS with structural faults: failures on composite propeller(s). *Data*, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 1–11, 2019. DOI: 10.3390/data4030128.
- [12] LIMA, Faíque Ribeiro; GOMES, Rogério. Conceitos e tecnologias da Indústria 4.0: uma análise bibliométrica. *Revista Brasileira de Inovação*, Campinas, v. 19, e0200023, p. 1–30, 2020. DOI: 10.20396/rbi.v19i0.8658766.
- [13] MELLAL, Idir; LAGHROUCHE, Mourad; BUI, Hung Tien. Field programmable gate array (FPGA) respiratory monitoring system using a flow microsensor and an accelerometer. *Measurement Science Review*, v. 17, n. 2, p. 61–67, 2017. DOI: 10.1515/msr-2017-0009.
- [14] PEREZ-CASTILLO, Alfredo Jesus; MORALES-CAPORAL, Roberto. Real time monitoring of 3-axis accelerometer using an FPGA Zynq®-7000 and embedded Linux through Ethernet. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, COMPUTING SCIENCE AND AUTOMATIC CONTROL (CCE), 15., 2018, Cidade do México. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2018. p. 1–6. DOI: 10.1109/ICEEE.2018.8533973.
- [15] SILVA, Isac Gonçalves; DIAS, José Flávio. Detecção de falhas em motores por análise de vibração. In: SIMPÓSIO DE TCC DAS FACULDADES FINOM E TECSOMA, 3., 2020. **Anais...** [S.l.]: Faculdades FINOM e Tecsoma, 2020. p. 1075–1088.