



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



**Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e
Automação de Processos de Mineração (PROFICAM)
Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)
Associação Instituto Tecnológico Vale (ITV)**

Dissertação

**MANIPULAÇÃO AÉREA: APLICAÇÃO DE DRONES PARA MEDIÇÃO
DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

Matheus Neves Marques

**Ouro Preto
Minas Gerais, Brasil
2021**

Matheus Neves Marques

**MANIPULAÇÃO AÉREA: APLICAÇÃO DE DRONES PARA MEDIÇÃO
DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS**

apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Bruno Nazário Coelho,
D.Sc.

Coorientador: Prof. Gustavo Pessin, D.Sc

Coorientador: Prof. João Pedro Hallack
Sansão, D.Sc

Ouro Preto
2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M357m Marques, Matheus Neves.

Manipulação aérea [manuscrito]: aplicação de drones para medição de vibrações mecânicas. / Matheus Neves Marques. - 2021.
105 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Bruno Nazário Coelho.

Coorientadores: Prof. Dr. Gustavo Pessin, Prof. Dr. João Pedro Hallack Sansão.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Mineraiis.

1. Robótica. 2. Robôs móveis. 3. Sistemas embarcados (Computadores). I. Coelho, Bruno Nazário. II. Pessin, Gustavo. III. Sansão, João Pedro Hallack. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Matheus Neves Marques

Manipulação aérea: aplicação de drones para medição de vibrações mecânicas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação

Aprovada em 31 de agosto de 2021

Membros da banca

Dr. Bruno Nazário Coelho - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Gustavo Pessin - Coorientador (Instituto Tecnológico Vale)
Dr. João Pedro Hallack Sansão - Coorientador (Universidade Federal de São João del-Rei)
Dr. Adilson Rodrigues da Costa (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Armando Alves Neto (Universidade Federal de Minas Gerais)

Bruno Nazário Coelho, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 28/10/2021



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/10/2021, às 17:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0239065** e o código CRC **8A4562EA**.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo, por iluminar meu caminho, fortalecer a minha fé, e por todas as oportunidades a mim ofertadas e concedidas. Aos meus orientadores, sou grato à toda assistência, ensinamentos e tempo investido. Também agradeço a Vale e a todo o pessoal do laboratório do ITV, que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho. Aos meus pais, Mauro e Valéria, agradeço pela assistência, ensinamentos e apoio em todos os momentos da minha vida. Sou grato também à minha namorada, Andréia, pelo companheirismo, carinho e correções. Agradeço ao meu cachorro Volt, fiel companheiro das madrugadas de estudo e escritas. Volt me acompanhou durante toda a graduação e TCC e, agora, também me fez companhia no mestrado e dissertação. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

“Pedi, e dar-se-vos-á; buscai, e encontrareis; batei, e abrir-se-vos-á. Porque, aquele que pede, recebe; e, o que busca, encontra; e, ao que bate, abrir-se-lhe-á.”
(Mateus 7:7-8)

”Failure is an option here. If things are not failing, you are not innovating enough.”
(Elon Musk)

”Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração.”
(Nikola Tesla)

Resumo

Resumo da apresentada ao Programa de Pós Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MANIPULAÇÃO AÉREA: APLICAÇÃO DE DRONES PARA MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Matheus Neves Marques

Agosto/2021

Orientadores: Bruno Nazário Coelho
Gustavo Pessin
João Pedro Hallack Sansão

A Robótica Móvel vem sendo aplicada para solucionar diversos problemas para a indústria, dentre os quais se destacam aqueles que colocam em risco vidas humanas. Atividades em altura, ambientes insalubres e espaços confinados são exemplos de áreas onde robôs vêm substituindo a mão de obra humana. O presente trabalho apresenta um breve estudo sobre Manipulação Aérea e suas possibilidades de aplicação no setor de Mineração, com ênfase na tarefa de medição de vibrações mecânicas de estruturas e máquinas em altura. Manipulação aérea consiste na combinação da versatilidade e agilidade de plataformas aéreas (como drones) com a capacidade de manipulação de braços robóticos. Tais características tornam promissora a aplicação desses robôs móveis em atividades de manutenção e inspeção de estruturas e máquinas em altura, bem como a coleta de amostras em sítios minerais e limpeza de dispositivos de difícil acesso. Em tal trabalho se projetou um dispositivo para ser acoplado a um drone, fornecendo a este a capacidade de realizar a medição de vibrações mecânicas em máquinas e estruturas em altura.

Palavras-chave: Robótica, Manipulação Aérea, Sistemas Embarcados.

Macrotema: Mina **Linha de Pesquisa:** Robótica aplicada à Mineração; **Tema:** Inspeção Automática de Ativos;

Abstract

Abstract of presented to the Graduate Program on Instrumentation, Control and Automation of Mining Process as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

AERIAL MANIPULATION: APPLICATION OF DRONES FOR MEASUREMENT OF MECHANICAL VIBRATIONS

Matheus Neves Marques

August/2021

Advisors: Bruno Nazário Coelho
Gustavo Pessin
João Pedro Hallack Sansão

Mobile Robotics has been applied to solve various problems in industry, among which we highlight those that put human lives at risk. Activities at height, unhealthy environments and confined spaces are examples of areas where human hand replacement occurs. This work presents a brief study on Aerial Manipulation and its application possibilities in the Mining sector, with the task of measure mechanical vibrations to structures and machines at height. Aerial manipulation consists of the combination of versatility and agility of aerial platforms (such as drones) with the ability to manipulate robotic arms. These features make promising the application of these furniture in activities of maintenance and inspection of structures and machines at height, as well as the collection of samples in mineral locations and the cleaning of devices that are difficult to access. In this work, a device was designed to be coupled to a drone, having the capacity to perform the function of mechanical vibrations in machines and structures at height.

Keywords: Robotic, Aerial Manipulator, Embedded Systems.

Macrotheme: Mine **Research Line:** Robotics applied to Mining; **Theme:** Automatic Asset Inspection;

Lista de Figuras

Figura 1.1	Produção Científica de Manipulação Aérea. Fonte: (MUÑOZ, 2017).	15
Figura 1.2	Aplicações da Manipulação Aérea. Coluna da esquerda: inspeção da ponte; coluna central: inspeção e conserto de linhas elétricas de alta tensão; coluna direita: reparação das pás do rotor de uma turbina eólica. Fonte: (RUGGIERO <i>et al.</i> , 2018).	16
Figura 1.3	<i>Flying Hand</i> da Amazon. Fonte: (AMAZON, 2016).	16
Figura 1.4	Exemplo de um UAM. Fonte: (RUGGIERO <i>et al.</i> , 2018).	17
Figura 1.5	Utilização de VANTs para realizações de tarefas ativas. Fonte: (WE-VOLVER, 2020).	17
Figura 3.1	Representação do projeto proposto.	28
Figura 3.2	Fluxograma do projeto proposto.	29
Figura 3.3	Movimento de vibração linear simples. Fonte: (LOONEY, 2017).	30
Figura 3.4	Acelerômetros ADXL355 e ADXL345 respectivamente. Fonte: (MOUSER-ELECTRONICS, 2020) e (FUTURE-ELECTRONICS, 2020).	31
Figura 3.5	Acelerômetros ADXL355 e ADXL345 aplicações e características. Fonte: Murphy (2017).	31
Figura 3.6	Raspberry Pi Zero W (pinout). Fonte: (MINTWITHRASPBERRY, 2021).	32
Figura 3.7	Placa Lilygo T8 com chip ESP32 (pinout). Fonte: (LILYGO, 2020).	34
Figura 3.8	Faixas de frequências e seus respectivos problemas para diagnóstico em máquinas. Fonte: (ADASH, 2019).	34
Figura 3.9	Desbalanceamento mostrando os eixos do rotor, as massas desbalanceadas e as medições de vibração radial e axial nos mancais. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).	35
Figura 3.10	Espectro de frequências característico de um desbalanceamento. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).	35
Figura 3.11	Exemplo dos tipos de desalinhamento. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).	36
Figura 3.12	Espectro de frequência dos dois tipos de desalinhamentos. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).	36

Figura 3.13	Exemplo de um espectro de frequência de um problema de folga mecânica. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).	37
Figura 3.14	Imagem presente na tabela ISO 10816-1 dando limites de vibração recomendados para máquinas rotativas em diferentes classes. Fonte: (RANDALL, 2011).	37
Figura 3.15	Imagem da tabela presente na ISO 10816-6 fornecendo limites de vibração recomendados para máquinas alternativas. Fonte: (RANDALL, 2011).	38
Figura 3.16	Exemplo de um graficos de aceleração versus tempo, FFT e PSD. Dados retirados de testes realizados com a primeira versão do medidor ao aferir a vibração de um motor de um carro.	40
Figura 3.17	Exemplo de um Espectograma. Dados retirados de testes realizados com a primeira versão do medidor ao aferir a vibração de um motor de um carro.	40
Figura 3.18	Algoritmo proposto por Zhu <i>et al.</i> (2015).	41
Figura 3.19	Exemplo do efeito de peneiramento do algoritmo de EEMD, aplicada no sinal de aceleração coletado do motor de um carro.	42
Figura 3.20	Robô FlyCroTug. Fonte: (ESTRADA <i>et al.</i> , 2018).	43
Figura 3.21	PaintCopter dos laboratórios Disney. Fonte: (DISNEY, 2020).	44
Figura 3.22	Drone AeroX de inspeção projetado pela CATEC. Fonte: (TRUJILLO, M.Á. <i>et al.</i> , 2019).	44
Figura 3.23	HandBot e seu funcionamento. Fonte: (BONANI <i>et al.</i> , 2009).	45
Figura 3.24	Drone utilizado para inspeção em árvores. Fonte: (ROBOHUB, 2020).	45
Figura 3.25	Fotografia do drone utilizado para coleta de amostras em árvores. Fonte: (KUTIA <i>et al.</i> , 2018).	46
Figura 3.26	Drone coletor de maçãs, projetado pela startup Tevel (Israel). Fonte: (TEVEL, 2021).	46
Figura 3.27	Representação gráfica do Manipulador (vista isométrica).	47
Figura 3.28	Representação gráfica do Manipulador (vista lateral).	48
Figura 3.29	Representação gráfica do Manipulador (vista explodida).	49
Figura 3.30	Representação gráfica do Guincho e central de comando (vista explodida).	50
Figura 3.31	Representação gráfica do Medidor (vista explodida).	51
Figura 3.32	Filamento PETG. Fonte: Sunlu (2021).	51
Figura 3.33	Tubos de fibra de carbono. Fonte: Ubuy (2021).	52
Figura 3.34	Guincho RC. Fonte: (ALIEXPRESS, 2021a).	52
Figura 3.35	Guincho RC desmontado.	53
Figura 3.36	Drivers populares de ponte H, L298 (a) e HG7881 (b). Fonte: Aliexpress (2021b).	53
Figura 3.37	Conversor lógico bidirecional. Fonte: (USINAINFO, 2020a).	54
Figura 3.38	Eletroímã encarregado de fixar o <i>datalogger</i> na superfície das máquinas. Fonte: (USINAINFO, 2020a).	54

Figura 3.39	Regulador ajustável de tensão MT3608. Fonte: (USINAINFO, 2020b).	55
Figura 3.40	Esquema de funcionamento eletrônico.	55
Figura 3.41	Diagrama esquemático do projeto eletrônico.	56
Figura 3.42	Foto do drone DJI Inspire I. Fonte: (DJI, 2014).	57
Figura 3.43	Foto do drone Asctec Pelican. Fonte: (PRODUCTZ, 2020).	57
Figura 3.44	Desenho do drone com o manipulador projetado, vista isométrica.	58
Figura 3.45	Desenho do drone com o manipulador projetado, vista lateral.	58
Figura 3.46	Desenho do drone com o manipulador projetado, vista superior.	59
Figura 3.47	Desenho do drone com o manipulador projetado, vista frontal.	59
Figura 4.1	Representação gráfica do sensor ADXL355 posicionado no esmeril.	61
Figura 4.2	Sinais coletados mostrando a evolução da aceleração, em cada eixo, do Esmeril (a vazio).	61
Figura 4.3	Corte de 3 segundos dos sinais coletados, mostrando a evolução da aceleração em cada eixo (x,y e z), do Esmeril a vazio.	62
Figura 4.4	FFTs do Esmeril (a vazio).	63
Figura 4.5	Foto do esmeril (a) utilizado para o experimento, e a abraçadeira (b) usada para o desbalanceamento.	63
Figura 4.6	Acelerações do Esmeril (desbalanceado).	64
Figura 4.7	Acelerações do Esmeril (desbalanceado).	64
Figura 4.8	FFT dos dados coletados durante o funcionamento do esmeril na condição "desbalanceado".	65
Figura 4.9	Gráfico do Espectrograma eixo x.	65
Figura 4.10	Aceleração no eixo X (3 segundos).	66
Figura 4.11	Aceleração após filtragem de média zero.	67
Figura 4.12	Integração no domínio da frequência.	68
Figura 4.13	Aplicação de filtro de média zero no sinal integrado no domínio da frequência.	68
Figura 4.14	IMF 1 e respectivo espectro de frequência.	69
Figura 4.15	IMF 2 e respectivo espectro de frequência.	69
Figura 4.16	IMF 3 e respectivo espectro de frequência.	70
Figura 4.17	IMF 4 e respectivo espectro de frequência.	70
Figura 4.18	IMF 5 e respectivo espectro de frequência.	71
Figura 4.19	IMF 6 e respectivo espectro de frequência.	71
Figura 4.20	IMF 7 e respectivo espectro de frequência.	72
Figura 4.21	IMF 8 e respectivo espectro de frequência.	72
Figura 4.22	IMF 9 e respectivo espectro de frequência.	73
Figura 4.23	IMF 10 e respectivo espectro de frequência.	73
Figura 4.24	IMF 11 e respectivo espectro de frequência.	74

Figura 4.25	Resultado do cálculo da correlação cruzada distância euclidiana.	74
Figura 4.26	Velocidade antes e depois da reconstrução.	75
Figura 4.27	Espectro de frequência do sinal reconstruído.	75
Figura 4.28	Peças impressas e tubos de fibra de carbono.	76
Figura 4.29	Guincho aberto.	76
Figura 4.30	Guincho fechado.	77
Figura 4.31	Motor, bateria e placas eletrônicas.	77
Figura 4.32	Peso do protótipo confeccionado.	78
Figura 4.33	Drone Inspire antes do encaixe do braço.	78
Figura 4.34	Drone com o protótipo acoplado.	79
Figura 4.35	Manipulador montado detalhando o guincho.	80
Figura 4.36	Manipulador montado vista lateral.	80
Figura 4.37	Detalhe do encaixe do manipulador no Inspire.	81
Figura 4.38	Manipulador Aéreo pronto para teste de voo.	81
Figura 4.39	Imagens do voo realizado com o instrumento.	82
Figura 4.40	Dados do voo realizado com o instrumento.	83
Figura 4.41	Velocidades do voo realizado com o instrumento.	83
Figura 4.42	Distância percorrida, e ângulos de "roll" e "pitch", durante o voo realizado com o instrumento.	84
Figura 4.43	Imagens do voo realizado com a retirada do instrumento medidor.	85
Figura 4.44	Dados do voo realizado sem o instrumento.	85
Figura 4.45	Registro das velocidades do voo realizado sem o instrumento.	86
Figura 4.46	Distância percorrida, e ângulos de "roll" e "pitch", durante o voo realizado com o instrumento.	86
Figura 4.47	Representação gráfica dos eixos do sensor no medidor de vibração.	87
Figura 4.48	Acelerações captadas pelo instrumento do manipulador, aferidas no Inspire 1 durante um voo teste.	88
Figura 4.49	Espectro de frequências captadas pelo instrumento do manipulador, coletadas no Inspire 1 durante um voo teste.	88
Figura 4.50	Desenho representativo sobre o teste de bancada elaborado.	89
Figura 4.51	Foto do teste de de transmissibilidade de vibração.	89
Figura 4.52	Acelerações: Fonte de ruído ligada, medidor acoplado ao manipulador.	90
Figura 4.53	FFTs: Fonte de ruído ligada, medidor acoplado ao manipulador.	91
Figura 4.54	Teste transferência de vibração: acelerações eixo x.	92
Figura 4.55	Teste transferência de vibração: acelerações eixo y.	92
Figura 4.56	Teste transferência de vibração: acelerações eixo z.	93
Figura 4.57	Teste transferência de vibração - FFTs eixo x.	93
Figura 4.58	Teste transferência de vibração - FFTs eixo y.	94
Figura 4.59	Teste transferência de vibração - FFTs eixo z.	94

Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Drones disponíveis no ITV	56
------------	-------------------------------------	----

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Motivação	13
1.2	Objetivos	16
1.3	Estrutura do trabalho	18
2	Referencial Teórico e Fundamentação Científica	19
2.1	Robótica, VANTs e Manipulação Aérea	19
2.2	Sistemas Embarcados	22
2.3	Instrumentação e Vibrações Mecânicas	23
3	Materiais e Métodos	27
3.1	Projeto proposto	27
3.2	Instrumentação e Análise Vibracional	29
3.3	Análise de Sinais e Algoritmos de Tratamento de Dados	38
3.4	Manipulador	42
3.5	Drone	56
4	Resultados e Discussão	60
4.1	Testes do Instrumento e Análise de Vibrações	60
4.1.1	Teste de Vibração em um motor (a vazio)	60
4.1.2	Teste de Vibração em um motor (desbalanceado)	62
4.1.3	Tratamento do Sinal	66
4.2	Manipulador Aéreo: Montagem e Testes	72
4.2.1	Montagem	75
4.2.2	Teste de voo com o instrumento	79
4.2.3	Teste de voo sem o instrumento	84
4.2.4	Teste de transmissibilidade de vibração	86
5	Conclusões	96
	Referências Bibliográficas	98

1. Introdução

A Robótica, nas últimas décadas, tem crescido muito em sua aplicação industrial, tanto no que tange aos manipuladores robóticos (os populares braços robóticos) e os robôs móveis (drones, por exemplo). Tais avanços, aliados à grande produção e queda no preço de dispositivos e componentes eletrônicos, fazem com que aplicações utilizando-se de robôs cresça, visando solucionar principalmente problemas que envolvam riscos a atividade humana.

A Manipulação Aérea surge da união dos drones (robôs móveis) com manipuladores robóticos. Tal junção possui como principal característica o fato de os drones deixarem de ser objetos passivos (em relação ao meio) e se tornarem ativos, adquirindo a capacidade de interagir com o ambiente. Assim surgem possibilidades diversas para solução de problemas recorrentes do cotidiano industrial, civil e até militar. Para solucionar tais problemas, o cenário ideal seria realizar a substituição da mão de obra humana em trabalhos executados em altura, mitigando assim os riscos envolvidos.

Na Mineração existem diversos equipamentos e estruturas de grande porte, uma vez que as características desse setor assim o exigem. Para a inspeção e manutenção destes equipamentos, geralmente demanda-se um grande esforço dos trabalhadores, que colocam suas vidas em risco, dado que em muitos casos as atividades em altura estão envolvidas. Neste trabalho, será proposta a inspeção de tais equipamentos por meio da medição de suas respectivas vibrações mecânicas, utilizando-se de um Manipulador Aéreo para a execução de tal atividade.

1.1 Motivação

O interesse por Manipuladores Aéreos, compostos por Veículos Aéreos Não-Tripulados (VANTs) vem crescendo dia-a-dia, não só pelo meio acadêmico em si, como também pelos setores civil, industrial e militar. Um dos grandes fatores que possibilitaram tal crescimento é o advento da grande produção industrial de eletrônicos e equipamentos na China, que tornou menos custosa a aquisição desses robôs móveis. Um claro exemplo da popularização dos VANTs consiste no fato de uma das maiores empresas de comércio eletrônico estar planejando e testando o uso de drones para realizar a entrega de suas encomendas, como é o caso da (AMAZON, 2016). Outro fato que corrobora tal afirmação consiste em governos de nações de relevante papel mundial estarem investindo grandes valores em pesquisa com VANTs, como é o caso do governo dos (E.U.A, 2016) e das nações européias com o projeto Aeroarms (2019). Os VANTs já são aplicados para inspeção e monitoramento de estruturas físicas, como auxílio em desastres, na agricultura e também na meteorologia. Assim sendo, as aplicações que se utilizam de veículos aéreos não tripulados vem crescendo com o passar do tempo e ganhando espaço também no setor de Mineração.

Em paralelo, nos últimos anos surge um novo conceito dentro do setor de Mineração, o de Mina Autônoma. Tal denominação tem, por definição, trocar a ação humana por máquinas inteligentes, visando maximizar a produção e eliminar riscos em ambientes nos quais operários convivem lado a lado com maquinário pesado e de grande porte. Máquinas inteligentes utilizam sensores (como GPS e LIDAR, por exemplo), algoritmos de inteligência artificial e são geralmente integradas a sistemas de controle em tempo real (LORENA, 2019). A mina de Brucutu da empresa Vale tem por objetivo tornar-se completamente autônoma, e já vem utilizando-se de caminhões autônomos desde 2018. Dado tal conceito já se encontram drones sendo aplicados dentro desta filosofia como, por exemplo, no fornecimento de mapas 3D de sítios e imagens aéreas em tempo real, monitoramento de tráfego e condições de estradas, e inspeção de estruturas (BHP, 2019).

Os veículos aéreos não tripulados podem ser classificados de várias formas, dependendo do ponto de vista a ser adotado. Essa divisão é feita em classes de acordo com o tamanho, aplicação ou a combinação de ambos. O mais usual é classificá-los por tamanho. Os drones a serem citados nesse projeto são do tipo Micro-UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*), que se caracterizam por poderem ser operados apenas por um piloto, possuem propulsão elétrica, são fabricados com materiais de baixo custo, e também são de uso civil, possuindo autonomia de voo de cerca de 30 minutos. Ainda podem ser classificados quanto a sua função aerodinâmica em três classes distintas, sendo estas: aeronaves de asa fixa, aeronaves de asa rotativa e aeronaves de asa articulada. O presente trabalho trata de aeronaves em configurações de asa rotativa do tipo VTOL (do inglês, *vertical take off and landing*) ou seja, aeronaves capazes de pousar e decolar verticalmente. Um VANT basicamente é composto por dois elementos, sendo estes um componente que voa (o veículo em si) e uma estação terrestre (uma central de comandos), segundo MUÑOZ (2017).

Dadas as afirmações acima citadas, é notável o grande desenvolvimento da robótica no momento atual. Os drones estão migrando de agentes de tarefas passivas, como inspeção, monitoramento e sensoriamento remoto, para agentes de tarefas ativas, como manipulação e apreensão. Essa tendência permite o surgimento dos UAM (do inglês, *Unmanned Aerial Manipulator*), ou Manipulador Aéreo Não-Tripulado. Os UAM consistem basicamente na junção de um VANT com um braço robótico, permitindo assim que estes possam interagir com o ambiente. Os manipuladores aéreos são caracterizados por poderem executar tarefas como transporte, apreensão, montagem e desmontagem de partes de máquinas, manipulação de instrumentos de medição, etc. Podem ser divididos em dois grupos, os FH (do inglês, *flying hand*) e UAM. Os FH são drones com garras simples, capazes apenas de apreensão, sem o poder de manipulação característico de um braço robótico. Já os UAM, como já citado anteriormente, são drones equipados com manipuladores robóticos, como mostra Ruggiero *et al.* (2018).

Os manipuladores aéreos surgiram primeiramente com o intuito de auxiliar em traba-

lhos em altura, quando estes levam riscos aos operários. Robôs móveis aéreos são mais baratos e mais seguros em uma série de cenários nos quais a atividade humana estaria em constante perigo. Ao tratar-se do setor de Mineração, riscos a vidas humanas são iminentes em várias partes do processo. Portanto, o tema proposto desse projeto tem por objetivo estudar as possíveis aplicações de manipuladores aéreos para a solução de problemas cotidianos dessa área, tais como a manutenção e inspeção de estruturas e máquinas em altura, auxílio na coleta de amostras e sensoriamento remoto ativo.

Na figura 1.1 tem-se um estudo demonstra que a linha de pesquisa sobre manipulação aérea é relativamente recente e bastante promissora.

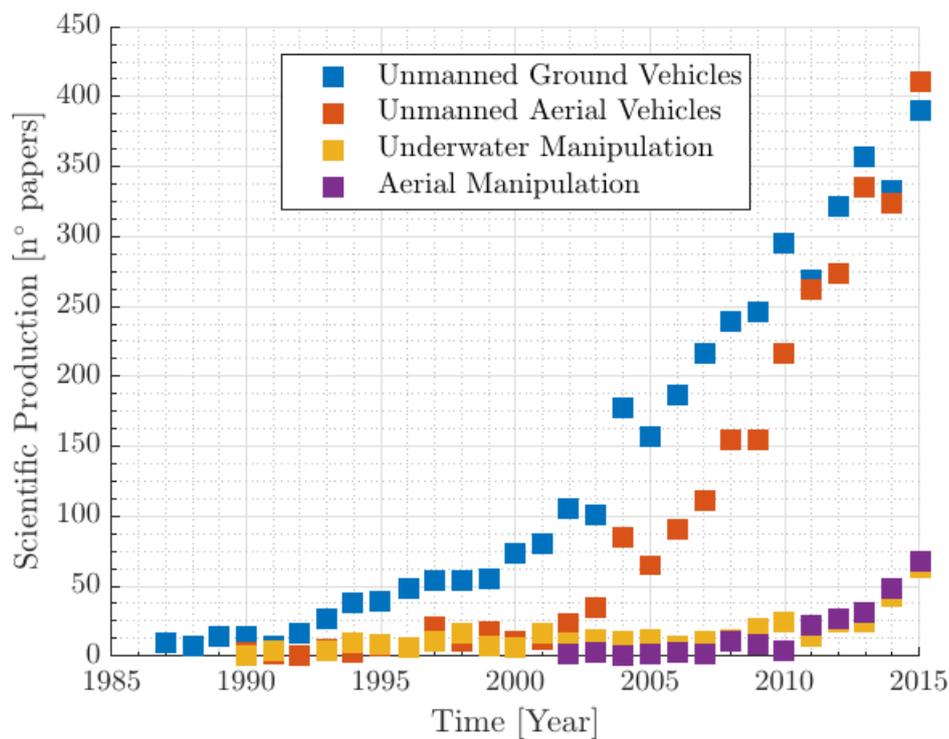


Figura 1.1: Produção Científica de Manipulação Aérea. Fonte: (MUÑOZ, 2017).

Já na Figura 1.2 tem-se um exemplo das possibilidades de aplicação dos Manipuladores Aéreos, mostrando trabalhos que envolvem riscos em altura que poderiam ser substituídos por tais robôs. Na Figura 1.3 têm-se um exemplo de um drone do tipo FH (*Flying Hand*), usado pela Amazon. E na figura 1.4 tem-se um exemplo de um Manipulador Aéreo. Como citado anteriormente, os robôs móveis utilizados na manipulação aérea podem solucionar diversos problemas. Um artigo Wevolver (2020) fomenta tal afirmação, mostrando que existem pesquisas recentes em outros países que pretendem utilizar drones com manipuladores robóticos acoplados, visando realizar tarefas ativas. Em tal artigo, um manipulador aéreo (Figura 1.5) realiza a digitalização de paredes de navios de carga, utilizando-se de sensores ultra-sônicos.



Figura 1.2: Aplicações da Manipulação Aérea. Coluna da esquerda: inspeção da ponte; coluna central: inspeção e conserto de linhas elétricas de alta tensão; coluna direita: reparação das pás do rotor de uma turbina eólica. Fonte: (RUGGIERO *et al.*, 2018).



Figura 1.3: *Flying Hand* da Amazon. Fonte: (AMAZON, 2016).

1.2 Objetivos

Nesse trabalho, tem-se por objetivo primário a construção de um Manipulador Aéreo capaz de realizar a medição de vibrações mecânicas em máquinas e estruturas em altura, com o intuito de automatizar a realização de tais inspeções. Tal projeto também visa minimizar os riscos de trabalhadores envolvidos em tais processos de inspeção em altura, uma vez que tal atividade será realizada por um dispositivo robótico teleoperado.

Como objetivos secundários, pode-se citar a confecção de três dispositivos distintos,

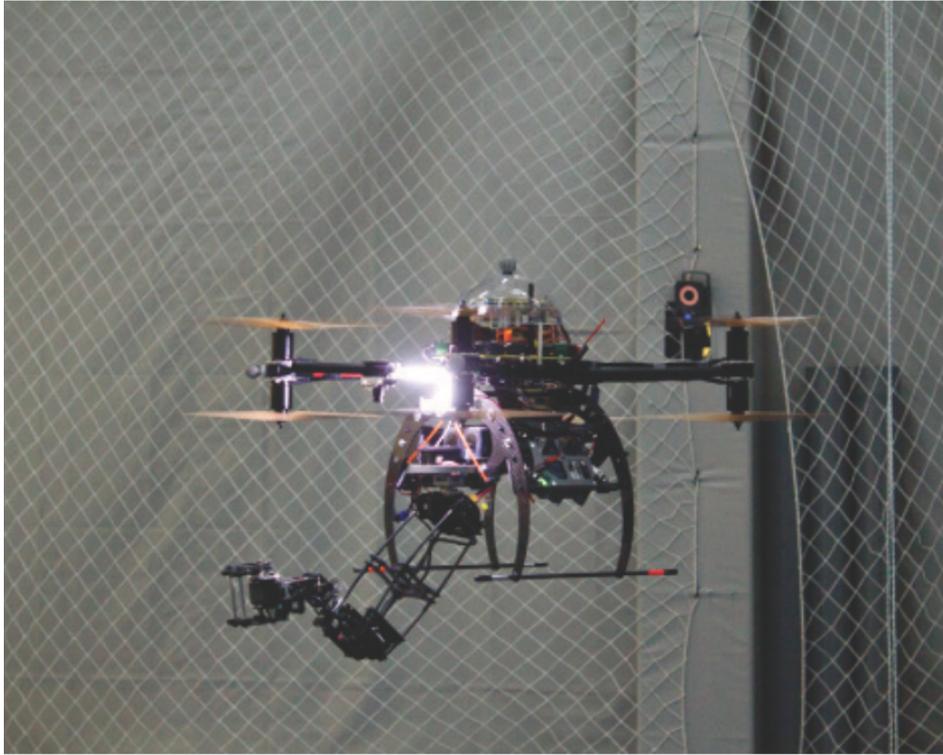


Figura 1.4: Exemplo de um UAM. Fonte: (RUGGIERO *et al.*, 2018).



Figura 1.5: Utilização de VANTs para realizações de tarefas ativas. Fonte: (WEVOLVER, 2020).

sendo estes:

- Instrumento: Nessa etapa do projeto, tem-se por objetivo elaborar um instrumento capaz de medir vibrações mecânicas, por meio de um sensor acelerômetro, capaz de atingir taxas de amostragem de aproximadamente 4 kHz. Este dispositivo ainda precisará possuir pouco peso para poder ser transportado por um drone, e também possuir sistema de comunicação para ser acessado de forma remota.

- Manipulador: Objetiva-se elaborar um manipulador robótico simples, capaz de manipular o instrumento medidor de vibração durante o acoplamento/desacoplamento deste nas estruturas e máquinas a serem monitoradas. Este manipulador além de ter peso inferior a 700 g, deverá possuir um guincho para recolher o dispositivo após a aferição das vibrações.
- Drone: Por fim, objetiva-se unir o braço robótico e o dispositivo medidor projetado com um drone capaz de suportar o peso dos mesmos.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho é composto por 5 capítulos, além das referências bibliográficas.

No Capítulo 1 é feita a contextualização do tema proposto, apresentados os motivos que levaram a escolha do mesmo, os objetivos que almejam-se alcançar e a estrutura organizacional proposta.

O Capítulo 2, apresenta o referencial teórico e a fundamentação científica, no qual optou-se pela subdivisão em três macrotemas, sendo estes sobre Robótica, Sistemas embarcados, Instrumentação e Vibrações Mecânicas.

Em seguida no Capítulo 3, são discutidos os métodos propostos para confecção e execução do projeto, bem como os materiais utilizados.

No Capítulo 4, é exposta a discussão dos resultados obtidos, estando estes divididos entre testes do instrumento e testes do manipulador aéreo.

No Capítulo 5, é apresentada uma conclusão sobre o projeto proposto, bem como uma discussão sobre possibilidades de trabalhos futuros e possíveis melhorias.

2. Referencial Teórico e Fundamentação Científica

Neste capítulo são expostos o referencial teórico e a fundamentação científica, orientados por diversos artigos, teses, livros e sites. Os temas abordados contemplam as áreas de controle de sistemas dinâmicos, controle multivariável, eletrônica aplicada, sistemas embarcados, manipuladores robóticos, robótica móvel (em específico a robótica aérea), projetos de sistemas mecânicos, veículos aéreos não tripulados, instrumentação, redes de computador e vibrações mecânicas.

2.1 Robótica, VANTs e Manipulação Aérea

Segundo Ruggiero *et al.* (2018), os UAM (ou Manipuladores Aéreos Não-Tripulados) podem ser considerados uma evolução natural dos robôs móveis aéreos, uma vez que estes recebem a adição de capacidades de manipulação, as já conhecidas versatilidade e agilidade características dos VTOL UAV (veículos aéreos não tripulados com decolagem e pouso verticais), podendo estes melhorar a qualidade e segurança de muitos tipos de tarefas e trabalhos em ambientes de alto risco. Também afirma que tanto os FH quanto os UAM possuem grandes desafios a serem enfrentados do ponto de vista da mecatrônica (como a harmonia entre design mecânico e controle, por exemplo). Além disso, os manipuladores aéreos podem ser modelados através de duas abordagens, sendo uma centralizada, no qual o drone e o braço robótico são tratados com uma entidade apenas, e a descentralizada, no qual o drone e o braço são modelados separadamente, e a malha de controle de ambos enxerga o outro como uma perturbação (RUGGIERO *et al.*, 2018).

Ghadiok *et al.* (2011) em seu trabalho propõem um quadrotor autônomo *indoor* usando uma garra simples, com o intuito de capturar um objeto através de um algoritmo visual via SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*). Em tal trabalho também se discute sobre controladores PID para a estabilização do veículo e a utilização de uma câmera para determinar a posição e criar o mapa para o alvo.

O trabalho de Heredia *et al.* (2014) apresenta um projeto de design e controle de um VANT com manipulador para tarefas *outdoor*, com um veículo aéreo que possui 8 motores e um considerável *payload*. O manipulador em questão possui 7 DoF (graus de liberdade) e sensores para realizar a tarefa proposta. Em tal trabalho foca-se na questão de projeto do controlador e aspectos intrínsecos a implementação proposta. O modelo dinâmico implementado é considerado acoplado, ou seja, o drone e o braço são tratados como um único objeto.

Jimenez-Cano *et al.* (2013) apresenta métodos para controlar VANTs considerando o movimento do manipulador acoplado. Ele demonstra como um controlador *Backstepping* de parâmetro integral variável supera os resultados obtidos em relação a controladores PID, através de simulações e experimentos *outdoor*, para compensação do efeito do mo-

vimento do braço.

O artigo de Kondak *et al.* (2013) é apresentado um controlador para robôs aéreos interagirem fisicamente com objetos no ambiente e também outros robôs aéreos. OS autores utilizam um pequeno helicóptero equipado com um braço robótico para validar seus experimentos. Dois tipos de influências são impostos ao helicóptero por um manipulador: coerente e influência não coerente. No primeiro caso, as forças e torques impostos ao helicóptero pela mudança do manipulador com frequências próximas às do movimento de helicóptero. As interações de pequenas forças geradas pela interação do braço com o helicóptero geram pequenas frequências de instabilidade e oscilações, chamadas pelo autor de círculos de fase.

O artigo de Lippiello e Ruggiero (2012) através do formalismo de Euler-Lagrange analisa e projeta um controlador para um veículo aéreo não tripulado acoplado com um braço robótico com 3 DoF. Os autores fizeram uma análise da dinâmica e relação das forças atuantes, os distúrbios externos e um estudo de caso via simulação é executado.

Mohammadi *et al.* (2016) propõem um sistema bilateral de teleoperação cooperativa entre um manipulador aéreo com um operador humano, através da utilização de um VtoL (classificação de drones que pousam e decolam verticalmente), que agarra um objeto e devolve ao operador um feedback de força, dependendo do estado do sistema. Este trabalho propôs um modelo de manipulação aérea quando destreza é necessária na tarefa a ser manipulada.

Kim *et al.* (2013) apresentam um quadrirrotor com um braço de 2 DoF, no qual a modelagem da cinemática e dinâmica considera o sistema como acoplado (ou seja, o drone e o braço é considerado como apenas um). Um controlador adaptativo é elaborado e um experimento no qual o robô é autônomo e realiza tarefas de coleta e transporte de objetos. Os resultados obtidos são satisfatórios e o autor indica a utilização do trabalho em tarefas de inspeção, manipulação e transporte.

Já Tognon *et al.* (2017) apresenta uma metodologia de controle para um manipulador aéreo sub-atuado com fácil implementação para sistemas reais e capazes de alcançar comportamentos altamente dinâmicos. Tal método é composto de duas partes, um gerador de trajetórias que leva em consideração a dinâmica acoplada do sistema, e a segunda um controle descentralizado que age nos graus de liberdade atuados, conferindo assim robustez ao sistema em malha fechada.

David *et al.* (2016) demonstram uma nova proposta de um manipulador aéreo sendo este composto por um braço com 4 DoF acoplado a um hexacóptero, capaz de interagir fisicamente com o ambiente. Tal robô recebe o nome de CARMA (sigla em inglês para *Compact Aerial Manipulator*) e segundo os autores é caracterizado por gerar baixos distúrbios na dinâmica de voo do robô, seu manipulador possui espaço de trabalho amplo (podendo este se retrair). O controle dinâmico do sistema proposto se dá através da utilização de um algoritmo de cinemática inversa, e o controle de posição das juntas é ela-

borado separadamente. Nesse artigo os autores apresentam detalhadamente o protótipo do braço confeccionado, acompanhado de alguns testes realizados em laboratório.

No que tange a hexacópteros, Chen *et al.* (2019) apresentam uma robusta estratégia de controle para hexacópteros voando em baixas altitudes, ficando estes sujeitos então a distúrbios como ventos e operações incorretas. Os autores propõem uma nova modelagem dinâmica do sistema, onde o rastreamento de posição é traduzido para altitude e rastreo de ângulos de rotação. Um esquema de controle é criado para lidar com tais desafios. Além disso, um planejador de altitude de voo aprimorado e um planejador de atitude para condições de baixa altitude são projetados para evitar o risco de capotamento, devido ao grande torque de reação e distúrbios externos. Em seguida, um controlador de rastreamento de altitude baseado em modo deslizante e um controlador de rastreamento de atitude são projetados para reduzir os erros de rastreamento e melhorar a robustez do sistema. Por fim, o esquema de controle proposto é testado em plataformas de simulação e um experimento com um hexacóptero é realizado.

I. N. *et al.* (2018) discutem em seu artigo o controle de hexacópteros para a interação ativa e manipulação de objetos. O movimento do manipulador com carga útil desconhecida foi analisado do ponto de vista da geração de perturbações (força e momento) e sua influência na distribuição de massa e do centro de gravidade do sistema. Um modelo dinâmico do hexacóptero é formulado, sendo extraído o modelo estocástico de espaço de estados para a posterior construção de controladores anti-perturbação. Um modelo de pêndulo composto é inserido no modelo estocástico para simular as perturbações no sistema. O artigo ainda estuda dois modelos de controladores para averiguar a estabilidade do hexacóptero, sendo estes a aplicação do método de Ackermann e a abordagem via LQR (regulador quadrático linear).

Tavora *et al.* (2019) projetam um controlador de força e torque para um manipulador aéreo não tripulado interagir próximo ou com uma superfície vertical (como uma parede, por exemplo). O controle de manipuladores aéreos interagindo com o ambiente é uma tarefa desafiadora devido às interações dinâmicas entre veículos aéreos, braços robóticos e ambiente. Para isso, segundo os autores, a modelagem de manipuladores aéreos é primeiramente investigada e apresentada em seguida considerando a interação com o ambiente. Modelos não lineares de manipuladores aéreos genéricos, bem como de um protótipo de manipulador aéreo composto de um hexacóptero com um braço robótico de três articulações é apresentado e utilizado para testes. Um controlador de força e torque baseado em equilíbrio é desenvolvido para realizar tarefas que exijam que o manipulador aéreo exerça forças e torques sobre parede. Simulações e experimentos validam o desempenho do controlador, obtendo esse sucesso na aplicação de forças e torques desejados a um objeto fixado em uma parede enquanto voa perto desta.

Por fim, Trujillo, M.Á. *et al.* (2019) informam que existe uma grande demanda da indústria de óleo e gás para o desenvolvimento de alternativas à inspeção manual. Para

sanar tal fato, os autores apresentam o AeroX, um manipulador aéreo que fornece inspeção por contato físico. Tal drone é um octocóptero com operação semi-autônoma, possuindo design simples e eficiente, alta estabilidade, capacidade de manobra e robustez. Ele pode realizar inspeção de contato em superfícies em qualquer orientação, incluindo vertical, inclinado, horizontal superior ou horizontal inferior, e sua operação pode ser facilmente integrada às operações de manutenção atuais em muitos setores. Ele foi amplamente validado em experimentos ao ar livre, incluindo uma refinaria, e recebeu o Prêmio de Radar de Inovação da UE 2017.

2.2 Sistemas Embarcados

Segundo o livro de Manuel Jiménez (2014), um sistema embarcado pode ser definido como um dispositivo que contém componentes de software e hardware, fortemente acoplados para realizar uma única função, fazendo este parte de um sistema maior e possuindo o seu funcionamento de forma independente (ou minimamente) da interferência de usuários. Outras duas características importantes de tais sistemas, são a operação reativa e fortemente restringida. A maioria dos sistemas embarcados interage diretamente com os processos ou com o ambiente, tomando decisões dinâmicas com base nas entradas que este recebe. Além disso, esses sistemas operam em ambientes restritos, onde a memória, a capacidade de computação e a fonte de alimentação são limitadas (MANUEL JIMÉNEZ, 2014).

Os sistemas embarcados podem ser vistos como minúsculos, rápidos e inteligentes, podendo estes serem encontrados em basicamente todos os lugares, variando de eletrônicos comerciais, como telefones celulares, câmeras, sistemas portáteis de monitoramento de saúde, controladores de automóveis, robôs, dispositivos de segurança inteligentes a infraestrutura crítica, como redes de telecomunicações, redes de energia elétrica, instituições financeiras e plantas nucleares. Ainda segundo o autor, esses sistemas são construídos para diversos fins, estimando-se que há cerca de bilhões deles pelo mundo. O autor também informa que tais sistemas de computação são geralmente embutidos em algum dispositivo eletrônico maior, executando certas rotinas de funções repetidamente (MEIKANG QIU, 2011).

Ferdoush e Li (2014) afirmam que após mais de uma década de pesquisas e desenvolvimento intensivo, a tecnologia de redes de sensores sem fio vem se mostrando promissora para a solução de diversos problemas, proporcionando assim soluções inovadoras. Em tal artigo, os autores descrevem o projeto de uma rede de sensores sem fio utilizando-se de plataformas de hardware *open source*, sendo estas Arduino e Raspberry Pi. Tal projeto possui baixo custo e alta escalabilidade, de acordo com o sensor utilizado para o monitoramento do ambiente. Os autores também demonstram os detalhes do hardware proposto, bem como os resultados que validam tal proposta.

Merendino *et al.* (2011) propõem um sistema embarcado voltado para analisar vibrações e diagnosticar falhas em máquinas rotativas. Este sistema utiliza-se de ferramentas de análise espectral, tais como transformadas Wavelet e Fourier. Os autores ressaltam que o sistema proposto suporta integração com diversas máquinas automáticas industriais, uma vez que este é customizável e adaptativo.

2.3 Instrumentação e Vibrações Mecânicas

Vibração mecânica pode ser definida como o movimento de oscilação de um corpo sobre uma determinada posição de referência. O número de vezes que um ciclo completo de movimento ocorre no tempo de um segundo é chamado de frequência, sendo medido em hertz (Hz). O movimento pode consistir em um único componente ocorrendo em uma única frequência, como em um diapasão, ou em vários componentes ocorrendo em diferentes frequências simultaneamente, como por exemplo, o movimento de pistão de um motor de combustão interna. Os sinais de vibração na prática geralmente consistem em muitas frequências ocorrendo ao mesmo tempo. Esses componentes podem ser revelados traçando a amplitude da vibração em relação à frequência. A quebra dos sinais de vibração em componentes de frequência individuais é chamada de análise de frequência, uma técnica que pode ser considerada vital para o diagnóstico via medições de vibração (BRÜEL e KJAER, 1982).

Em seu livro intitulado *Vibration-based Condition Monitoring*, Randall (2011) afirma que acelerômetros (sensores que medem aceleração) são preferencialmente utilizados para aferição de vibrações mecânicas. O autor define acelerômetro como transdutores que produzem um sinal proporcional à aceleração. De longe, os tipos mais comuns para uso no monitoramento de condições de máquinas são os acelerômetros piezoelétricos, que utilizam as propriedades piezoelétricas de certos cristais e cerâmicas. Esses elementos piezoelétricos geram uma carga elétrica proporcional à deformação.

Varanis *et al.* (2018) em seu artigo, apresenta um estudo sobre medição de vibração mecânica via acelerômetros do tipo MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*, ou Sistemas Microeletromecânicos). Nessa revisão, os autores concluem que esse tipo específico de acelerômetro é utilizado em diversas aplicações (como em monitoramento de processos, para fins didáticos e até em coleta de energia). As principais características dos acelerômetros MEMS são que estes possuem baixo consumo de energia, baixo custo e tamanho reduzido. Em tal estudo os autores realizam 2 experimentos. O primeiro acelerômetro é excitado por uma onda senoidal, no qual varia-se as frequências através de um dispositivo excitador (via vibrações) comparando-se os resultados no final. Já no segundo são realizadas 3 coletas de dados com acelerômetros diferentes (e analisadas nos domínios do tempo e da frequência), no qual o objeto de medição é uma estrutura excitada por um motor DC desbalanceado. Para melhor análise do resultado de tal experimento, a

transformada *wavelet*, a coerência *wavelet* e a densidade espectral (PSD) são utilizados.

Monitorar a condição de máquinas vem se tornando uma tendência no que tange a manutenção de equipamentos. No trabalho de Weddell *et al.* (2012) é feita a descrição da especificação, design e implementação de um novo sistema (*wireless*) de sensoriamento de vibração de motores, utilizando-se de acelerômetros piezoelétricos. Um sistema que também possui a capacidade de coletar energia de tais vibrações para alimentar o próprio circuito.

Vineetha *et al.* (2013) demonstram a importância da medição de vibrações para a detecção de falhas e posterior diagnóstico de motores trifásicos de indução. Através da utilização de acelerômetros do tipo MEMS, os autores mostram que essa tecnologia surge como uma alternativa em relação à realização de tais medições. Os autores ressaltam que o objetivo primário do estudo é detectar e diagnosticar problemas em motores de indução, sendo tais problemas de origem mecânica ou elétrica. Tendo como base a premissa de que falhas provocam mudanças nas forças mecânicas e elétricas atuantes no motor, os autores propõem um método de análise do espectro de frequência, através dos dados de aceleração coletados.

Zheng *et al.* (2015) ressaltam primeiramente a dificuldade em questões como fiação entre os nós e ruído nas medições de vibração em sistemas tradicionais de aquisição de dados, no que tange o monitoramento de máquinas-ferramenta. Para tanto, os autores propõem um novo sistema de monitoramento de falhas baseado na Internet das Coisas (IoT). Partindo de características da topologia estrela de redes de comunicação, um protocolo *wireless* ad hoc é desenhado tendo como princípios básicos o protocolo *handshaking* e o tempo de absoluto de sobrevivência. Em tal trabalho, os autores também se utilizam de um algoritmo simplificado com filtro de Kalman, tendo como finalidade a diminuição do ruído para posterior análise em tempo real do monitoramento das falhas. Para contextualizar tal proposta, um exemplo de aplicação é demonstrado, através da implementação de tal sistema em uma máquina CNC.

O monitoramento de máquinas é definido como uma técnica de inspeção (e posterior manutenção) pelo qual um ativo operacional é monitorado através da coleta de dados de sensores, com o intuito de analisar e detectar falhas (e suas causas), sinais de degradação, reduzindo assim os custos de manutenção, por Jaber e Bicker (2016). Os autores afirmam que análises por meio de sinais de vibração são bastante usados para detectar e diagnosticar falhas em várias aplicações industriais. Dados os recentes avanços da eletrônica e computação, a criação de dispositivos sem fio capazes de realizar tais tarefas aumentou consideravelmente, trazendo grandes benefícios e robustez. O objetivo de tal trabalho é projetar e desenvolver um sistema *wireless* de monitoramento de falhas (via sinais de vibração), tendo como foco os sistemas de transmissão (engrenagens e rolamentos) de juntas de robôs industriais.

Monitorar as condições do maquinário industrial é uma abordagem importante para

garantir a confiabilidade das mesmas. No artigo de Huang *et al.* (2014) é ressaltado que sistemas de monitoramento que utilizam fios para a sua comunicação têm grandes limitações de aplicação, principalmente quanto a medição de vibrações. Em contrapartida, as redes de sensores sem fio se mostram bastante satisfatórias para a solução de tais medições, porém, ainda apresentam certos problemas (tais como coleta de dados a uma alta taxa de amostragem, bem como a aquisição síncrona destes). Nesse estudo, os autores propuseram e desenvolveram um sistema de redes de sensores para o monitoramento de vibrações em máquinas. Primeiramente desenvolveu-se o hardware de tal rede de sensores, e em seguida uma solução para a eficácia da aquisição síncrona é demonstrada. Por fim, tal sistema é testado e validado através de experimentos.

A detecção de danos em estruturas por meio de sensores vem ganhando espaço e importância nos últimos tempos, dado o avanço tecnológico. Em Liao *et al.* (2016) é apresentado um modelo autoregressivo que é definido como coeficiente de uma função DSF (*damage sensitive features*) que utiliza-se de leituras de velocidade angular fornecidas por um giroscópio. Este algoritmo foi validado através de testes em uma estrutura onde são aplicadas pequenas oscilações.

Lisowski *et al.* (2016) propõem uma plataforma *wireless* e livre de baterias (trabalhando com coleta de energia, ou *harvesting energy*) para monitoramento de danos em estrutura. Tal plataforma utiliza-se da tecnologia RFID, e os dados coletados são transmitidos para uma estação (um computador). Um dos pontos a se ressaltar em tal trabalho consiste no fato de se aproveitar o campo magnético gerado pela antena RFID para a geração de energia para o circuito. A plataforma demonstrada em tal artigo possui suporte para diferentes tipos de sensores, podendo essa ser inserida em locais remotos. Os autores validam o funcionamento de tal plataforma testando-a através da medição de vibração e temperatura.

Yan *et al.* (2014) propõem uma revisão da utilização da transformada *wavelet* em aplicações para o diagnóstico por falhas de máquinas rotativas.

Swathy e Abraham (2015) afirmam que as vibrações produzidas pelas máquinas são vitais para o diagnóstico de sua saúde, uma vez que estas determinam as condições do seu estado atual, especificando assim a causa, local do possível problema e sua respectiva solução (reduzindo assim os custos). Ainda segundo os autores, o monitoramento constante das vibrações de tais máquinas ao longo do tempo permite a previsão de problemas antes que esses venham a acontecer. O artigo se baseia em analisar as vibrações de sensores do tipo MEMS com os do tipo acústico, comparando-os com os sensores piezoelétricos.

Son *et al.* (2016) ressaltam que nos últimos anos os sensores MEMS se mostraram bem promissores no que tange a detecção de falhas em máquinas, uma vez que estes possuem baixo consumo de energia, baixo custo, flexibilidade e tamanho pequeno. Nesse artigo os autores apresentam um esquema para detecção de falhas em máquinas (em específico os motores de indução) através da utilização de acelerômetros MEMS e sensores de corrente.

Primeiramente os autores verificam a confiabilidade desses sensores através da análise do espectro de frequência e dos valores de corrente dos dados coletados, validando e adequando estes para o uso em detecção de falhas em máquinas.

Na reportagem publicada pelo site Wevolver (2020), o professor Matteo Fumagalli (DTU *Electrical Engineering*) junto com outros pesquisadores já são capazes de fazer com que um drone realize pequenas tarefas e interações com o ambiente, através da utilização de um manipulador robótico acoplado ao mesmo. Tais tarefas podem ser exemplificadas como a realização de medições através de sensores localizados em tal braço robótico. Ainda em tal publicação citada, os pesquisadores utilizaram-se de um manipulador aéreo para inspecionar as paredes dos porões de navios de carga, através da utilização de sensores ultrassom. É possível observar o protótipo utilizado na figura 1.5.

3. Materiais e Métodos

O presente capítulo aborda sobre a metodologia de pesquisa utilizada, bem como os materiais envolvidos. A princípio, por meio de um fluxograma, são renúidas e expostas todas as etapas da construção do projeto, bem como os principais problemas abordados e posteriormente solucionados em cada uma delas.

3.1 Projeto proposto

O método utilizado consiste em experimentações baseadas em estudos exploratórios experimentais. O projeto apresentado neste trabalho tem como objetivo o estudo e implementação de um veículo aéreo não tripulado acoplado a um manipulador robótico simples capaz de realizar interações com o meio ambiente, tendo como função primária medir vibrações de estruturas e máquinas em altura.

Primeiramente, optou-se por direcionar o foco do trabalho para a aprendizagem e aumento de destreza para com ferramentas que poderiam ser úteis no decorrer do desenvolvimento do mesmo. Tais ferramentas são sistemas operacionais específicos, softwares de integração, projeto e simulação, sendo estes:

- SOLIDWORKS
- MATLAB
- PROTEUS
- CoppeliaSim
- ROS
- Raspberry Pi OS (Lite)

Na figura 3.1 tem-se a uma demonstração simplificada da ideia proposta nesse projeto. Nela pode-se observar uma sequência de movimentos que o manipulador aéreo a ser construído realizará para efetuar a medição de vibração em estruturas e máquinas em altura. O desacoplamento do dispositivo aferidor de vibração (por meio de um cabo) tem por finalidade separar as vibrações intrínsecas do drone das que pretende-se medir (como dito anteriormente, das máquinas e estruturas).

O fluxograma apresentado na figura 3.2 foi definido com o intuito de proporcionar certo grau de clareza aos elementos presentes no trabalho proposto, separando-se assim as diversas questões a serem tratadas no projeto. O trabalho então foi fragmentado em três partes, sendo estas: o projeto do Hexacóptero (drone), o do manipulador robótico e o do instrumento medidor de vibração mecânica. Em seguida, foram listadas as tarefas

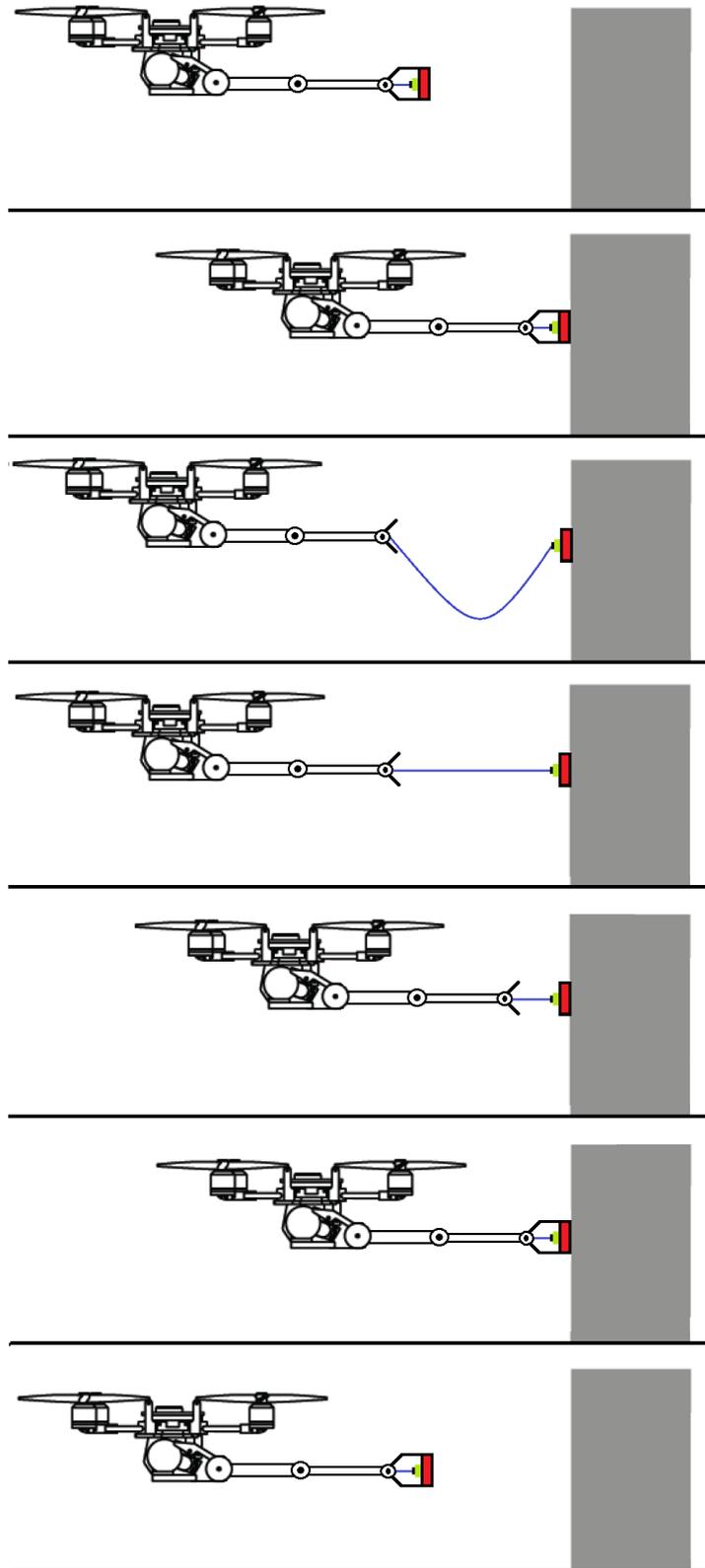


Figura 3.1: Representação do projeto proposto.

relacionadas a cada parte citada anteriormente, bem como os maiores problemas a serem enfrentados. Cada uma das partes será abordada com maior detalhamento a seguir.

Novamente ressalta-se que tal sistema consiste em um veículo aéreo não tripulado com um manipulador robótico simples acoplado. O intuito de tal pesquisa foi encontrar um modelo matemático eficaz capaz de gerar uma simulação robusta, visando posteriormente ajustar os parâmetros de controle de tal sistema, fazendo com que este seja capaz de suportar as intemperes físicas características de sua morfologia, tornando o mesmo estável.

É importante ressaltar que por motivos temporais e econômicos, descartou-se a hipótese de projetar um hexacóptero, optando-se então pela utilização de drones presentes no laboratório do ITV.

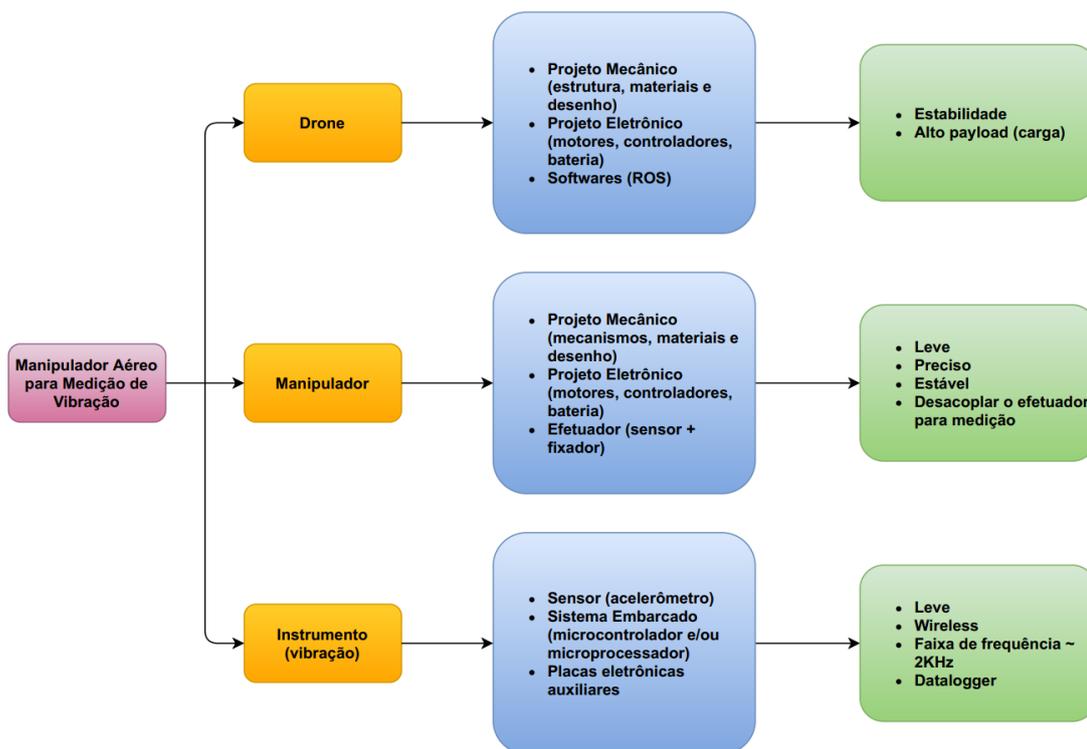


Figura 3.2: Fluxograma do projeto proposto.

3.2 Instrumentação e Análise Vibracional

O dispositivo responsável pela aferição da vibração no projeto precisa atender a certos requisitos, sendo o principal deles possuir pouco peso para assim poder ser transportado e manipulado pelo drone. Partindo dessa premissa, foi realizada uma pesquisa para encontrar uma classe de sensores que fossem leves o suficiente para atender a tais premissões. Sensores acelerômetros do tipo MEMS atendem a tais exigências, uma vez que possuem tamanho reduzido, baixo consumo de energia, e preço acessível (VARANIS *et al.*, 2018). Tais características fazem com que acelerômetros MEMS venham sendo aplicados em processos de *Harvesting Energy* (coleta de energia), monitoramento de máquinas (*Condition*

Based-Monitoring ou CBM) e monitoramento da saúde de estruturas (*Structural Health Monitoring* ou SHM). No que tange o CBM, diversos problemas podem ser descobertos através da análise do espectro de frequência obtido pela aferição da vibração, tais como desalinhamento, desequilíbrio, defeitos de rolamento e de engrenagens (SOPCIK, 2019).

Para começar a avaliar a capacidade de um acelerômetro MEMS, a vibração (do ponto de vista de movimento inercial) deve ser entendida como uma oscilação mecânica que possui deslocamento médio zero (LOONEY, 2017), como mostrada na figura 3.3. Para quantificar a capacidade de detecção, alguns atributos são importantes quanto a capacidade dos MEMS, sendo estes: faixa de medição, faixa de frequência (largura de banda) e resolução. Vale ressaltar que a quantificação do valor medido pode vir em termos de velocidade linear (mm/s) ou expressa na métrica referenciada pela aceleração da gravidade (g).

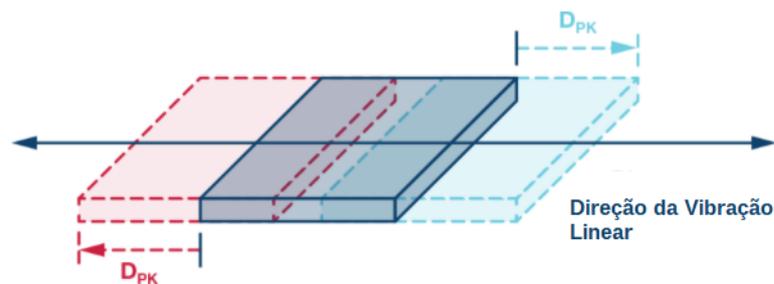


Figura 3.3: Movimento de vibração linear simples. Fonte: (LOONEY, 2017).

Para testes iniciais escolheram-se dois acelerômetros MEMS da fabricante *Analog Devices*, sendo estes o ADXL345 e o ADXL355, mostrados na figura 3.5. Estes acelerômetros são chamados de triaxiais, uma vez que medem a aceleração nos 3 eixos (x, y e z).

A figura 3.4 demonstra as diferenças básicas entre ambos os sensores. Como pode-se observar, enquanto o ADXL345 é um acelerômetro de aplicações gerais, o ADXL355 é recomendado para aplicações industriais e para IoT. O ponto forte do ADXL345 é o baixo custo, enquanto o do ADXL355 é seu baixo ruído. Durante os experimentos e testes, observou-se que o parâmetro densidade de ruído encontrado nos datasheets é de extrema relevância para o dimensionamento de um acelerômetro, uma vez que este informa o quão ruidoso é o sinal fornecido. O ADXL355 possui densidade de ruído 16 vezes menor que o ADXL345.

Uma outra parte importante do instrumento medidor de vibração é a placa de aquisição de dados. Inicialmente, foi utilizada uma Raspberry Pi Zero W. Tal placa surgiu em meados de 2017 com o intuito de fomentar projetos *wireless* para IoT (RASPBerryPI.ORG, 2020). As duas grandes vantagens da mesma são o seu tamanho reduzido e a capacidade de permitir conexões Wifi e Bluetooth. Ela pode ser considerada um pequeno computador, uma vez que esta utiliza-se de um sistema operacional baseado em Linux e periféricos

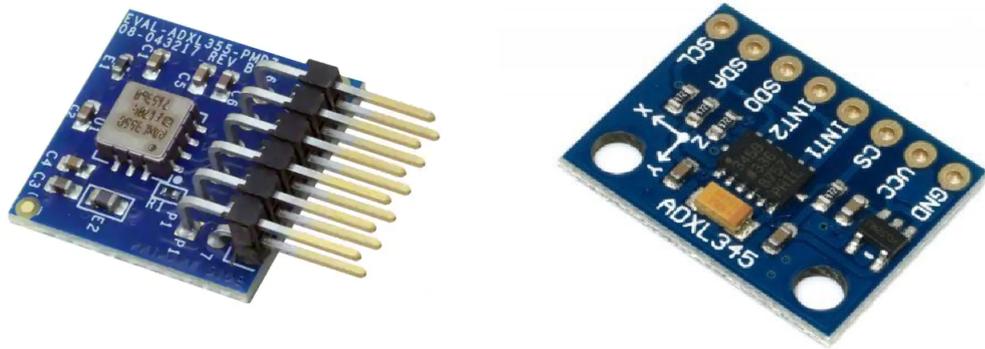


Figura 3.4: Acelerômetros ADXL355 e ADXL345 respectivamente. Fonte: (MOUSER-ELECTRONICS, 2020) e (FUTURE-ELECTRONICS, 2020).

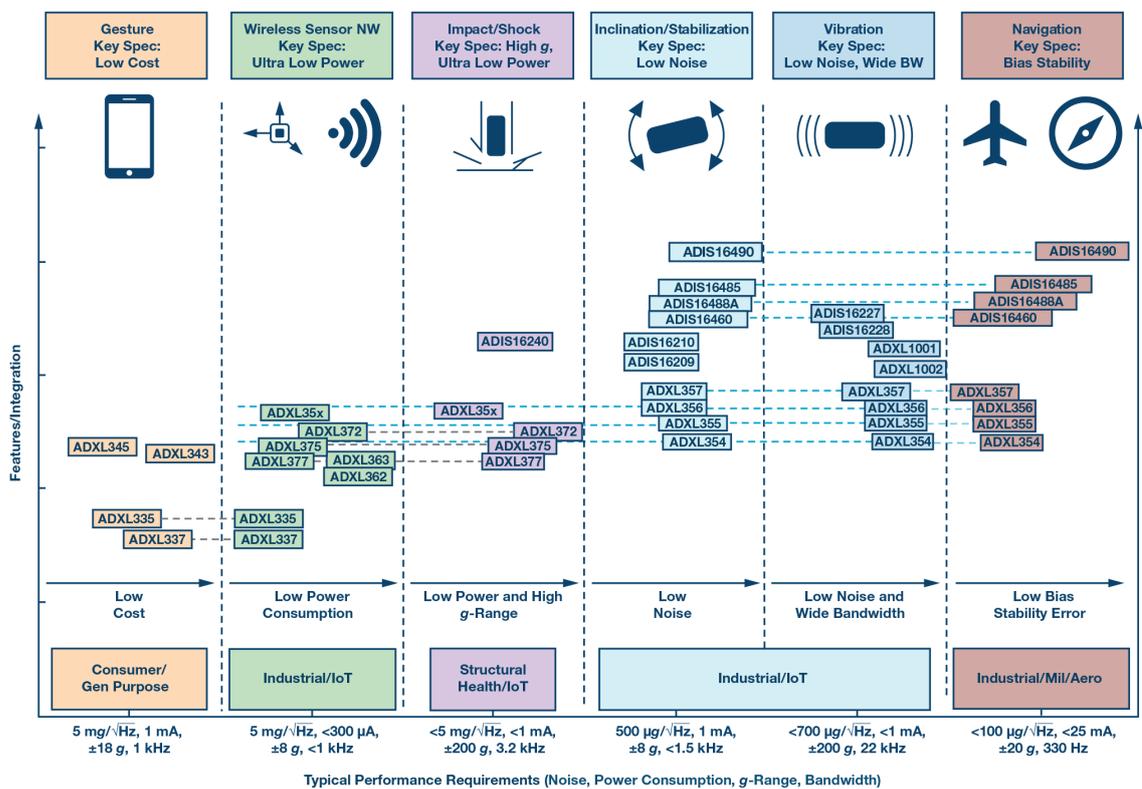


Figura 3.5: Acelerômetros ADXL355 e ADXL345 aplicações e características. Fonte: Murphy (2017).

(teclado, mouse, monitor, etc). Possui um processador ARM11 de 32 bits com um single-core de 1GHz, e disponibiliza 512MB de memória RAM. Em sua configuração eletrônica oferece 40 GPIOs, além de uma entrada para cartão micro SD onde é rodado o sistema operacional, além de diversas entradas para periféricos e alimentação. Possui também

compatibilidade direta de sua pinagem com os protocolos de comunicação I2C, SPI e UART. As linguagens de programação aceitas são: C, C++ e Python. Na figura 3.6 é apresentado um exemplo de um Raspberry Pi Zero W.

Em seguida, foi realizada uma busca por um sistema operacional compatível com o Raspberry Pi, e que fosse o mais robusto possível. Optou-se então pelo Raspberry Pi OS Lite, um sistema que não possui interface gráfica e nem a clássica arquitetura com Desktop, sendo que seu acesso se dá exclusivamente via terminal de comandos. A configuração foi feita de forma que fosse possível trabalhar em modo de ponto de acesso, a placa gera uma rede wifi e permite que computadores e outros dispositivos se conectem a ela, com o intuito de acessá-la remotamente pelo protocolo SSH.

Dadas as características intrínsecas de fabricação das placas eletrônicas, que contém os respectivos sensores, o ADXL345 utiliza-se do protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*) para sua comunicação com o Raspberry. Tal protocolo, segundo Sparkfun (2013), é destinado a permitir que vários circuitos integrados digitais "escravos" ("chips") se comuniquem com um ou mais chips "mestres", através de um único barramento, onde cada escravo possui um endereço específico. Sua velocidade de comunicação pode ser de 100KHz ou 400KHz. Já o sensor ADXL355 se comunica através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*) que se difere do I2C pelo fato do barramento possuir apenas um dispositivo mestre, e sua velocidade de comunicação é de 2 MHz (sendo 5 vezes mais rápida que o I2C) (SPARKFUN, 2013).

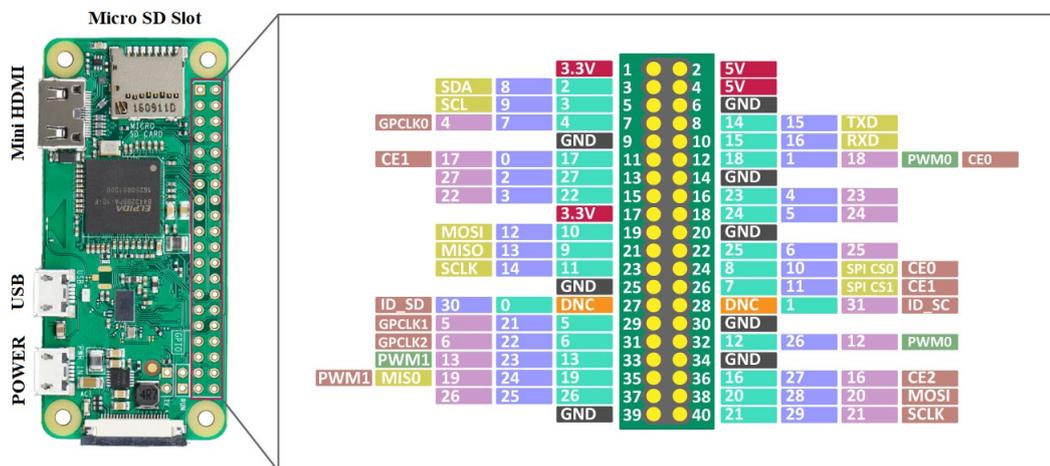


Figura 3.6: Raspberry Pi Zero W (pinout). Fonte: (MINTWITHRASPBERRY, 2021).

Após a configuração das bibliotecas dos sensores e seus respectivos códigos, foram realizados os testes para averiguar a máxima taxa de amostragem (amostras por segundo) possível. Ressaltando que, a intenção dessa parte do projeto é a criação de um dispositivo *datalogger*, ou seja, um dispositivo capaz não só de coletar a leitura do sensor, mas também de gravá-la em um formato de arquivo (txt, csv ou bin). No caso de ADXL345 via

protocolo I2C, conseguiu-se uma média de 560 Hz. Já no caso do ADXL355, via protocolo SPI, conseguiu-se por volta de 2150 Hz.

Com o intuito de diminuir o tamanho do hardware e aumentar a taxa de amostragem, optou-se então por testar uma segunda versão de placa de captura de dados. Fundamentado no projeto desenvolvido por Koene *et al.* (2020), implementou-se então uma nova versão, utilizando-se de um ESP32. Assim, foi possível atingir uma taxa de amostragem de 4 kHz. A ESP32 é fabricada pela ESPRESSIF (2020) e foi lançada em meados de 2017, trazendo consigo inúmeras inovações. Foi a primeira plataforma embarcada a trazer em um único chip um microcontrolador com conexões do tipo Wifi e Bluetooth já embutidas. Além de possuir baixo consumo de energia e considerável poder de processamento, esta plataforma também pode ser programada utilizando-se a interface da família Arduino.

O Esp32, segundo Kolban (2018), é uma placa que possui como microprocessador o Xtensa LX6 Dual-core de 32 bits. Seu clock é de 160MHz (podendo chegar até 240MHz), e este possui 34 GPIOs que podem ser configuradas tanto como analógicas, quanto digitais. Seu diferencial consiste em possuir embutido no encapsulamento do seu microcontrolador CIs específicos, que permitem conexões Wifi e Bluetooth (tanto o Bluetooth 4.2 padrão quanto o Bluetooth Low Energy). Possui um sensor touch embutido (de até 10 canais), um sensor de temperatura interno, 18 ADCs (conversores analógicos-digitais) e 2 DACs (conversores digitais-analógicos). Além de permitir conexões pelos protocolos I2C, SPI e UART, ele também é compatível com o I2S (Inter-IC Sound) e com o CAN (Controller Area Network). Nessa versão utilizada, (Lilygo T8) a placa eletrônica já vem com um slot de cartão de memória (micro SD) embarcado, fato que a torna ainda mais propícia para a tarefa (uma vez que os dados são armazenados no mesmo). Na figura 3.7 tem-se o modelo da placa utilizada.

Após a realização dos testes e para melhor compreensão das faixas de frequências necessárias a se atingir para realizar o diagnóstico de problemas em máquinas, iniciou-se uma nova pesquisa com o intuito de maximizar a taxa de amostragem disponível, e quais problemas essa nova taxa conseguiria diagnosticar.

A medição de vibrações mecânicas em máquinas podem ser divididas em dois grupos: medição em máquinas rotativas (motores, como exemplo), e a medição em máquinas específicas de grande porte (como por exemplo as recuperadoras).

A fabricante de instrumentos de medição ADASH (2019), resume com excelência problemas relacionados a máquinas rotativas, como demonstrado na figura 3.8.

Como se pode observar na figura acima citada, para problemas relacionados a desalinhamento, desbalanceamento e folga mecânica, a faixa de frequência exigida é de 10 Hz a 1000 Hz (ADASH, 2019). Pelo teorema de Nyquist, a faixa de frequência medida pelos instrumentos confeccionados atende perfeitamente a tais problemas. Já para diagnóstico de falhas em rolamentos e engrenagens, até o presente momento o mesmo não é capaz de aferir.

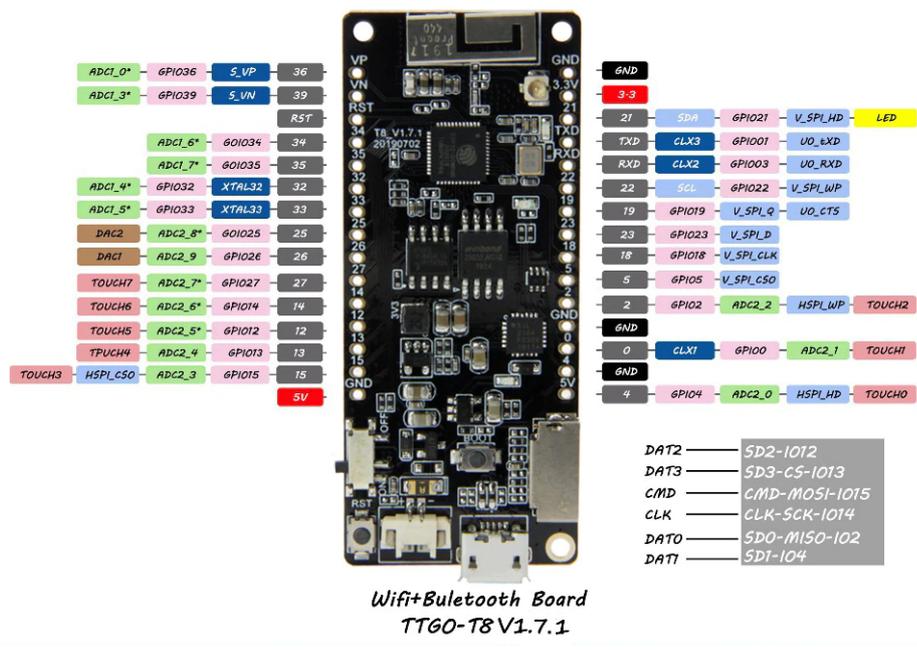


Figura 3.7: Placa Lilygo T8 com chip ESP32 (pinout). Fonte: (LILYGO, 2020).

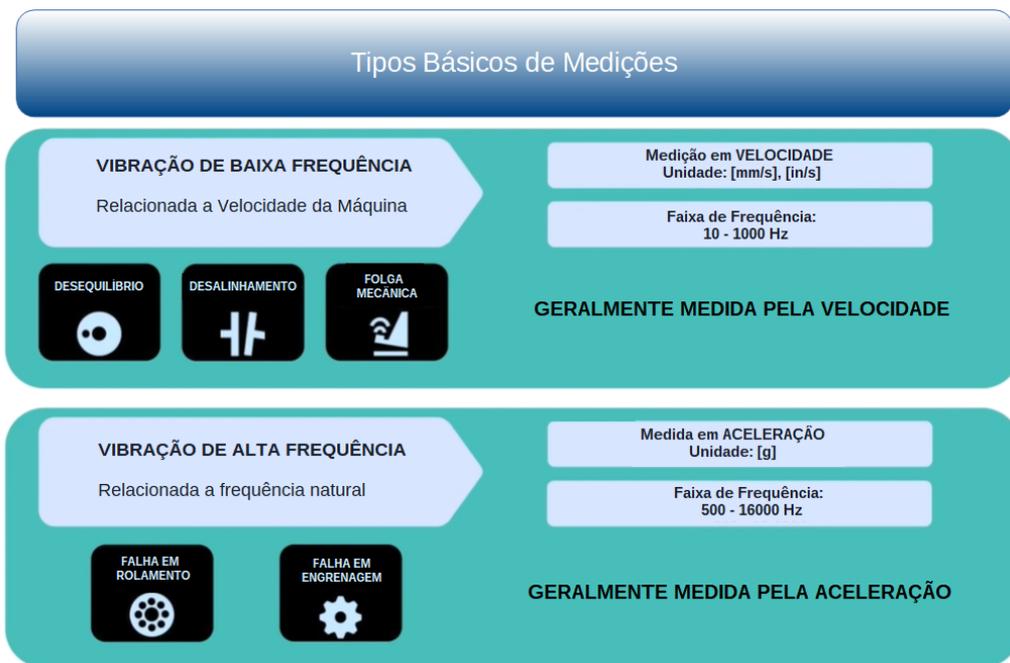


Figura 3.8: Faixas de frequências e seus respectivos problemas para diagnóstico em máquinas. Fonte: (ADASH, 2019).

Desbalanceamento é definido pela *International Standards Organization* (ISO) como sendo a condição que existe no rotor quando vibração, força ou movimento é transmitido aos mancais como resultado de forças centrífugas. De uma forma simplificada, o desbalanceamento pode ser definido como uma distribuição desigual de massas ao longo do eixo do

centro de massa do rotor. O eixo do centro de massa é o eixo sobre o qual o rotor deveria girar se ele não fosse restringido pelos mancais, também conhecido como eixo principal de inércia. O rotor estará balanceado quando o eixo do centro de massa do rotor coincidir com o eixo físico do rotor (eixo geométrico), segundo (MAIS, 2002) e de Jesus Silva (2013). Podem ser classificados em três tipos: estático, dinâmico e acoplado.

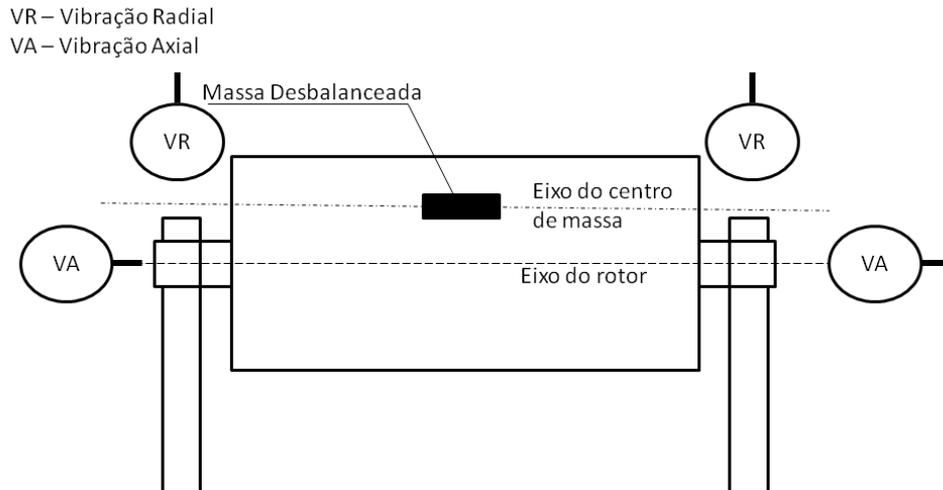


Figura 3.9: Desbalanceamento mostrando os eixos do rotor, as massas desbalanceadas e as medições de vibração radial e axial nos mancais. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).

O diagnóstico de desbalanceamento, segundo Looney (2017) e Mais (2002), se dá através da observação do primeiro harmônico (frequência de rotação da máquina) no espectro de frequência, onde este apresentará um pico com o valor mais alto que o normal. A amplitude de pico varia proporcionalmente ao quadrado da velocidade de rotação da máquina, como demonstrado na figura 3.10.

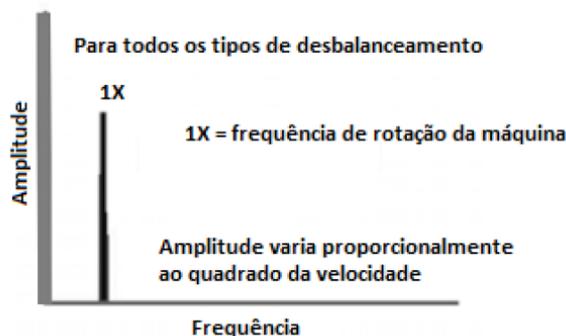


Figura 3.10: Espectro de frequências característico de um desbalanceamento. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).

Já o desalinhamento é um problema relacionado ao acoplamento entre dois eixos em

uma máquina. Basicamente existem dois tipos: o angular e o paralelo, como mostrado na figura 3.11 (LOONEY, 2017).

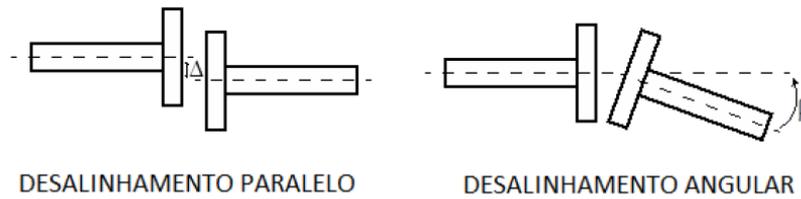


Figura 3.11: Exemplo dos tipos de desalinhamento. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).

Na figura 3.12 pode-se observar as características do espectro de frequência referentes ao desalinhamento paralelo e angular. Para o diagnóstico através do espectro, Looney (2017) e Mais (2002) informam que o desalinhamento paralelo apresenta vibrações radiais mais elevadas. Esse desalinhamento raramente ocorre separado do desalinhamento angular, fato que provoca picos no primeiro e segundo harmônicos. A relação da magnitude do segundo harmônico para com o primeiro geralmente informa a presença do desalinhamento. Casos graves de desalinhamento podem excitar até o décimo harmônico.

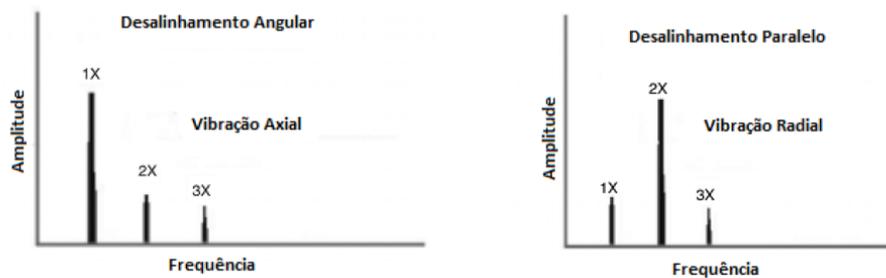


Figura 3.12: Espectro de frequência dos dois tipos de desalinhamentos. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).

Folgas mecânicas geralmente são consequências de estágios avançados de desgaste nos mancais. Normalmente produzem harmônicos da frequência de rotação com amplitudes altas e anormais, podendo chegar até o décimo harmônico (MAIS, 2002). Na figura 3.13 é apresentado um exemplo de um espectro de frequência relacionado a folga mecânica.

As medições de vibrações mecânicas são regidas pelas normas internacionais ISO, como demonstrado por de Jesus Silva (2013) e Randall (2011). Pode-se citar como exemplo a ISO 10816 que trata da avaliação de vibrações em máquinas por meio das medições em suas partes estacionárias. Um outro exemplo consiste na ISO 7919 que trata da medição de vibração em eixos rotativos e seus respectivos critérios de avaliação.

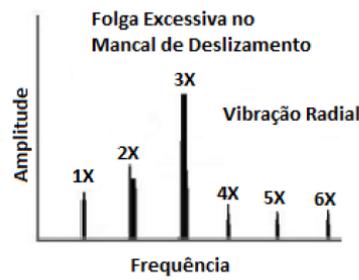


Figura 3.13: Exemplo de um espectro de frequência de um problema de folga mecânica. Fonte: (DE JESUS SILVA, 2013).

R.m.s vibration velocity mm/s	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.8				
2.8	C	C	C	C
4.5				
7.1	D	D	D	D
11.2				
18				
28				
45				

Figura 3.14: Imagem presente na tabela ISO 10816-1 dando limites de vibração recomendados para máquinas rotativas em diferentes classes. Fonte: (RANDALL, 2011).

Na figura 3.14 tem-se uma tabela retirada da ISO 10816 demonstrando os limites de vibração recomendadas para máquinas rotativas de diferentes classes. De acordo com o valor aferido, compara-se o mesmo com a classe da máquina, obtendo-se assim um índice (que pode variar de A até D). Tal índice tem a função de classificar a condição aferida dentro de uma determinada zona, visando diagnosticar a qualidade da vibração transmitida pela máquina. Nesta figura, as classes podem ser definidas como:

- Classe I - pequenas máquinas e componentes (até 15 kW).
- Classe II - máquinas médias sem fundações especiais (15 –75 kW).
- Classe III - grandes máquinas em fundações rígidas e pesadas.
- Classe IV - máquinas de grande porte sobre fundações flexíveis (turbomáquinas).

E os índices, podem ser definidos como:

- A - boa.
- B - permitido.
- C - apenas tolerável.
- D - não permitido.

A 3.15 é uma tabela também retirada da ISO 10816-6, que rege limites de vibração para máquinas ditas alternativas (compressores e bombas, por exemplo) com potência por volta de 100 KW. É possível observar que os valores aferidos podem ser averiguados nos três parâmetros possíveis, sendo estes: deslocamento, velocidade e aceleração.

Vibration severity grade	Maximum values of overall vibration measured on the machine structure			Machine vibration classification number						
	Displacement μm (r.m.s)	Velocity mm/s (r.m.s)	Acceleration m/s^2 (r.m.s)	1	2	3	4	5	6	7
				Evaluation zones						
1,1	17,8	1,12	1,76	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B	A/B
1,8	28,3	1,78	2,79							
2,8	44,8	2,82	4,42							
4,5	71,0	4,46	7,01							
7,1	113	7,07	11,1	C	D	D	D	D	D	D
11	178	11,2	17,6							
18	283	17,8	27,9							
28	448	28,2	44,2							
45	710	44,6	70,1	D	D	D	D	D	D	D
71	1125	70,7	111							
112	1784	112	176							
180										

Figura 3.15: Imagem da tabela presente na ISO 10816-6 fornecendo limites de vibração recomendados para máquinas alternativas. Fonte: (RANDALL, 2011).

3.3 Análise de Sinais e Algoritmos de Tratamento de Dados

A análise de sinais e o conseqüente tratamento de dados consistem em uma etapa vital para a correta compreensão das vibrações dos sistemas. Após o dimensionamento dos sensores e posterior coleta de dados, a escolha dos filtros e/ou algoritmos a serem aplicados nos dados irá proceder de acordo com aquilo que se pretende observar ou obter dos mesmos.

Em se tratando da análise de condições em máquinas, como se demonstrou na seção anterior, muitos dos casos exigem a necessidade da integração (simples ou dupla) do sinal de aceleração coletado, visando assim extrair informações para o correto diagnóstico de

determinada falha. Como já é bem explicitado na literatura, o processo de integração numérica gera uma constante de erro, que em se tratando de séries temporais, causam grandes descaracterizações no sinal (caso esta seja aplicada de forma isolada) após a sua integração.

Para determinados diagnósticos, a observância do espectro de frequência do próprio sinal já se mostra suficiente. Para tal fato, a aplicação da transformada rápida de Fourier (FFT, sigla para *Fast Fourier Transform*) basta. A FFT plota a amplitude do sinal versus a frequência (dada em Hz). Vale ressaltar que o sinal coletado é constituído de aceleração por tempo.

Já o Espectrograma é um tipo de gráfico tridimensional, caracterizado por plotar a aceleração, a frequência e o tempo juntos. Segundo HANLY (2019), este tipo de gráfico tem sua aplicação recomendada quanto o perfil de vibração (ou seja, a frequência) do sistema aferido muda com o tempo.

O método de análise denominado de PSD (*Power Spectral Density*, ou Densidade Espectral de Potência, ainda segundo HANLY (2019), são mais usadas para comparar e quantificar diferentes ambientes de vibração, uma vez que a vibração de sistemas reais contém frequentemente muitos componentes aleatórios. No PSD leva-se em consideração a energia do sinal, e este possui grandes vantagens em relação a outras abordagens (como a FFT), uma vez que este permite a suavização via ajuste de largura de banda, e permite certa facilidade em relação a integração do sinal (para a obtenção de velocidade e deslocamento).

Na figura 3.16 tem-se um exemplo de um sinal de aceleração no tempo, a FFT e o PSD. Já na figura 3.17, pode se observar um exemplo de um Espectrograma.

Como anteriormente mencionado, dado o problema da descaracterização dos sinais pós processo integração direta, eis então que surgiram algoritmos visando minimizar e solucionar tal questão. Um deles é proposto por Zhu *et al.* (2015), consistindo numa evolução do algoritmo elaborado por Wu e Huang (2009). Nesse trabalho os autores propõem um método de integração para sinais de vibração, baseado este em recursos de extração de informação. Segundo os mesmos, tal método é capaz de minimizar o erro gerado pelo processo de integração, através de uma serie de passos a serem executados, como demonstrado na figura 3.18.

Para a melhor compreensão das etapas mostradas na figura anterior, estas são explicitadas abaixo.

- **Processamento via média-zero:** Este filtro tem por finalidade anular o componente dc do sinal, eliminando assim o item de tendência no resultado da integral.
- **Integração no Domínio da Frequência:** Ao invés de se integrar no domínio do tempo, o sinal é integrado no domínio da frequência.

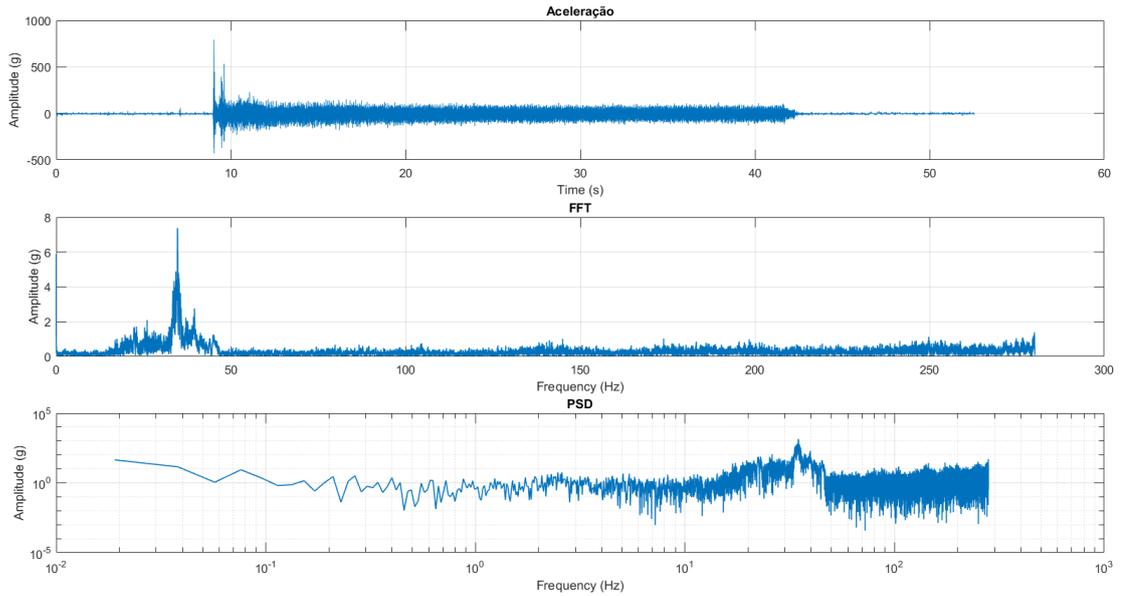


Figura 3.16: Exemplo de um graficos de aceleração versus tempo, FFT e PSD. Dados retirados de testes realizados com a primeira versão do medidor ao aferir a vibração de um motor de um carro.

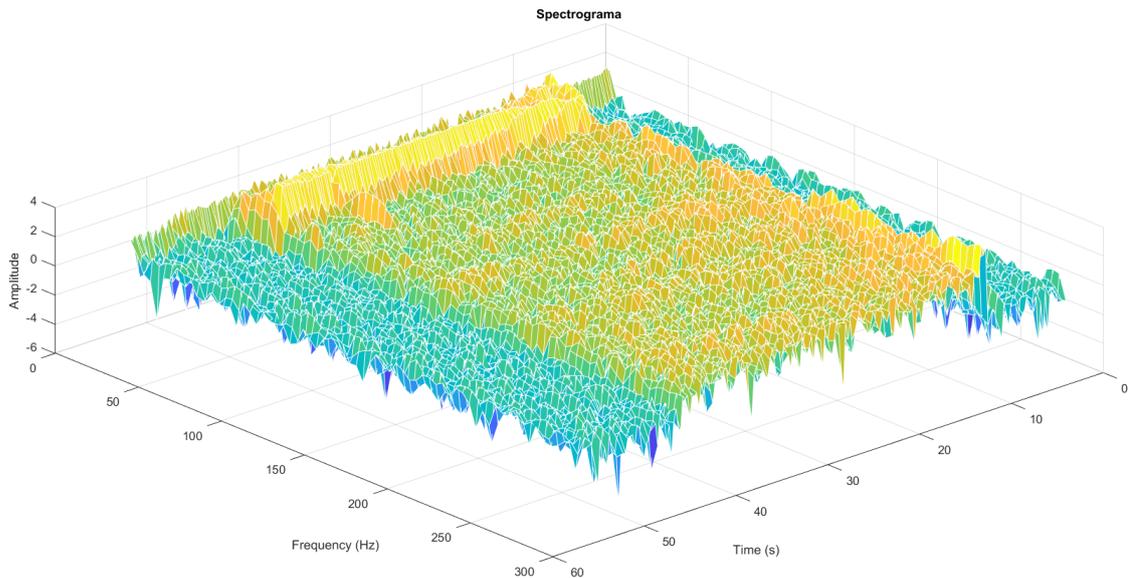


Figura 3.17: Exemplo de um Espectograma. Dados retirados de testes realizados com a primeira versão do medidor ao aferir a vibração de um motor de um carro.

- **EEMD**: Nessa etapa, um método denominado de *Ensemble Empirical Mode Decomposition*, é aplicado ao sinal, onde este decompõe o mesmo em funções de denominadas de funções de modo intrínseco (IMF), com diferentes faixas de frequência. Esse algoritmo é em sua essência um processo de peneiramento com duas grandes vantagens, sendo a primeira a de remover ondas sobrepostas, e a segunda a de tor-

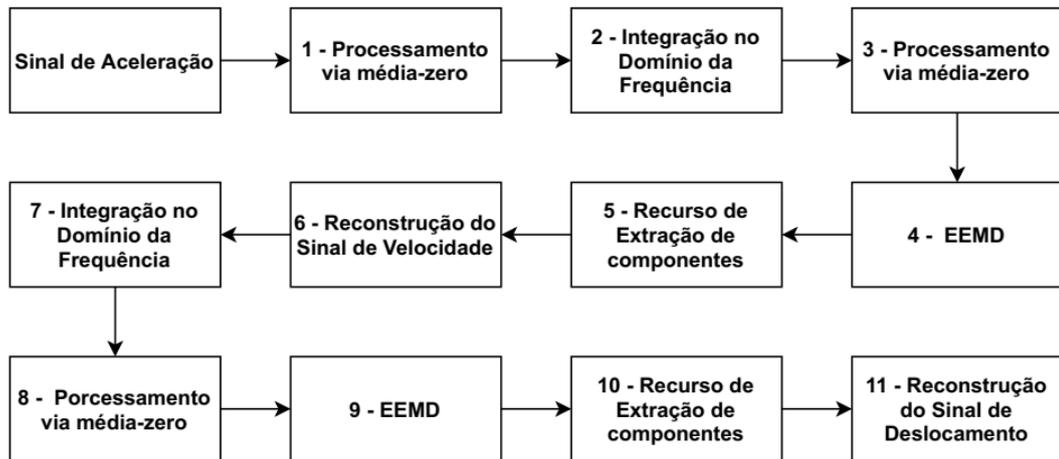


Figura 3.18: Algoritmo proposto por Zhu *et al.* (2015).

nar as formas de ondas mais simétricas. Essa separação em IMFs é de extrema utilidade, uma vez que separa-se o ruído da parte útil do sinal.

- **Recurso de Extração de Componentes:** Nessa etapa, primeiramente são extraídos quatro características de cada IMF obtida no passo 4, bem como do sinal de velocidade obtido no passo 3. O primeiro parâmetro é o número de curtose (mede a concentração ou dispersão dos valores de um conjunto de valores em relação às medidas de tendência central), que reflete a distribuição característica do sinal de vibração. O segundo é erro quadrático médio (MSE), que tem por função descrever quantitativamente a precisão de medição. O terceiro é a energia do sinal, que pode refletir a força do conjunto de dados, assim como a diferença de energia de diferentes formas de onda. O último parâmetro é o SVD (decomposição de valor singular), que reflete a distribuição da energia do sinal útil, e a do ruído misturado no sinal. Após tal extração, estes valores são armazenados em vetores, sendo em seguida utilizados para o cálculo da distância euclidiana, através da diferença entre os valores obtidos no passo 3, com os das IMFs obtidas no passo 4. Por fim, a IMF com os valores mais próximos dos obtidos no passo 3 é escolhida para a reconstrução do sinal.
- **Reconstrução do sinal:** O sinal é reconstruído com a IMF que possuiu a menor distancia euclidiana calculada no passo da extração de recursos, bem como a maior correlação cruzada.

Ressalta-se que tal algoritmo a primeira vista se mostrou de bastante utilidade dentro do ponto de vista do projeto proposto. Na figura 3.19 tem-se um exemplo do efeito causado pela aplicação da etapa do algoritmo EEMD acima citado. Observa-se que o sinal é quebrado em diversos outros, denominados de IMFs.

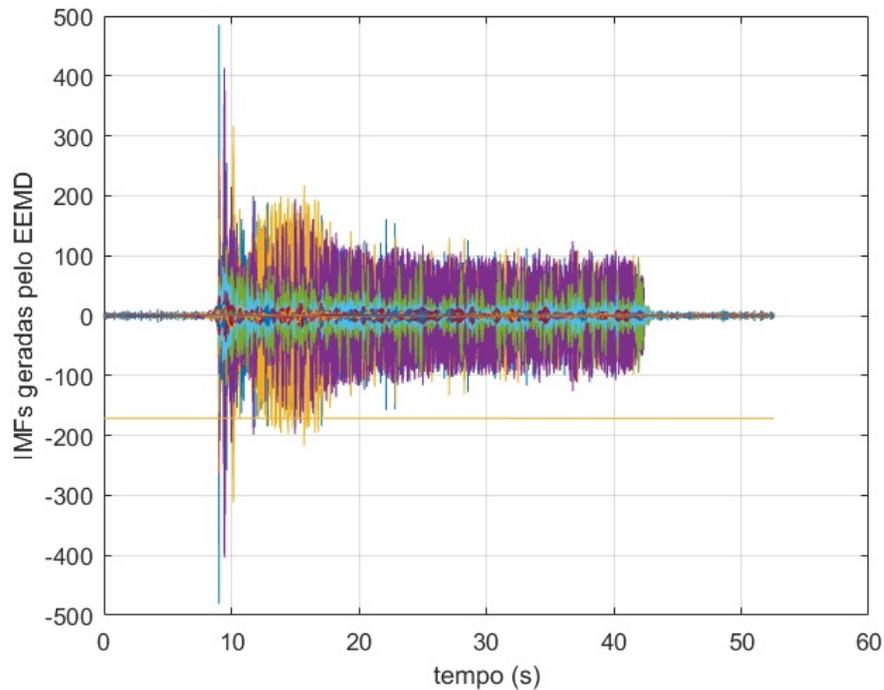


Figura 3.19: Exemplo do efeito de peneiramento do algoritmo de EEMD, aplicada no sinal de aceleração coletado do motor de um carro.

Uma outra ferramenta poderosa no auxílio de análise de vibrações, consiste no toolbox confeccionado por Irvine (2018) para o MATLAB. Neste, pode-se encontrar mais de 60 funções (FFT, PSD, Filtros diversos, etc) além da compatibilidade de diversos formatos de arquivos (csv, txt, mat). Uma outra vantagem dessa ferramenta, consiste no fato dos resultados das aplicações poderem ser exportados.

Ressalta-se então que para o presente trabalho foram utilizados o *toolbox* e o algoritmo proposto por Zhu *et al.* (2015), uma vez que estes abrangem por completo os objetivos relacionados ao tratamento e análise do sinal de aceleração coletado.

3.4 Manipulador

A ideia central dessa parte do projeto consiste em criar um manipulador robótico simples, capaz de manipular o dispositivo medidor de vibração, fazendo com que este possua a função de se acoplar e desacoplar corretamente na superfície da máquina ou estrutura em que se deseja aferir a vibração.

Os desafios apresentados nessa parte do projeto foram grandes do ponto de vista da mecatrônica, uma vez que tal braço teria de ser leve, robusto e suave para interferir minimamente na dinâmica do drone. Para tanto, iniciou-se então uma pesquisa do estado da arte para buscar exemplos de robôs móveis e seus respectivos mecanismos capazes de

contribuir com tal ideia.

Na figura 3.20 o robô projetado por Estrada *et al.* (2018) consiste em um pequeno drone capaz de se aderir a determinadas superfícies, sendo este possuidor também de um guincho capaz de puxar objetos pesados até 40 vezes a sua massa. Tal trabalho contribuiu como referência em design e mecanismos do guincho no drone. Como é possível observar na figura 3.20, após o robô se prender no objeto que se deseja arrastar, este se fixa em alguma superfície e aciona o guincho. Ainda segundo os autores, uma das possíveis aplicações para o mesmo seria no resgate de outros robôs.

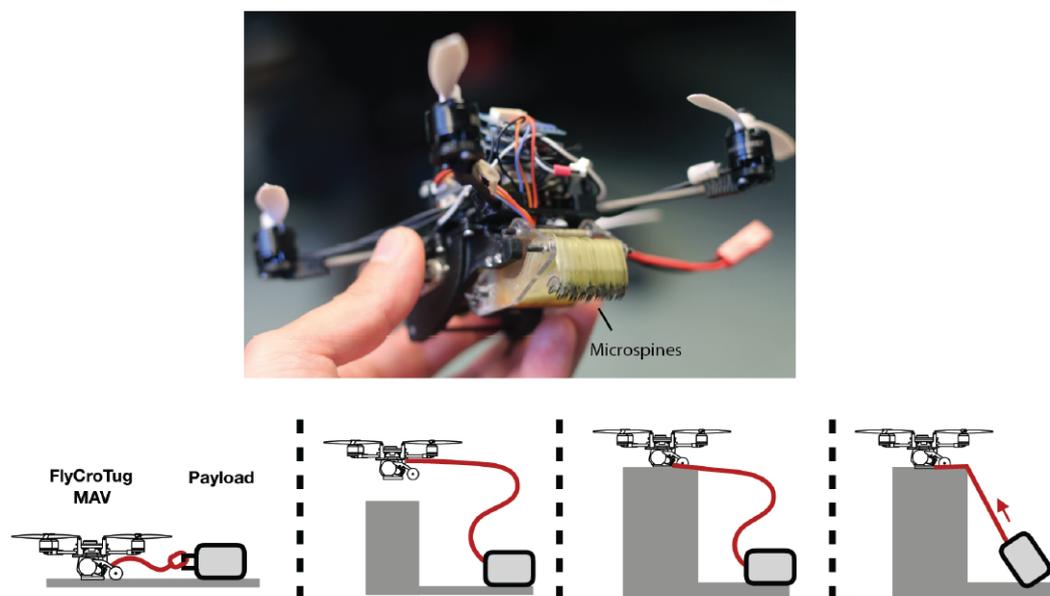


Figura 3.20: Robô FlyCroTug. Fonte: (ESTRADA *et al.*, 2018).

A figura 3.21 apresenta um drone projetado por Disney (2020) em parceria com ETH Zürich, denominado de *PaintCopter*. Esse robô móvel foi confeccionado com o objetivo de poder realizar o processo de pinturas em superfícies planas e tridimensionais. Este drone possui um braço com um mecanismo de pulverização como efetuator. Em tese, a contribuição desse projeto para o presente trabalho consiste no desenho de sua estrutura e nos detalhes do mecanismo de pulverização.

O drone pertencente ao projeto europeu AEROARMS é apresentado na figura 3.22 . Demonstrado por BATURONE *et al.* (2018) e projetado por Trujillo, M.Á. *et al.* (2019), este drone tem por função realizar inspeção por contato em dutos e tubulações da indústria de óleo e gás. Sua contribuição para a criação do manipulador robótico proposto neste trabalho consiste no seu design inovador, mecanismo simples e robusto (no que tange o conjunto braço-efetuator), bem como o material utilizado para a confecção deste (fibra de carbono).

Na figura 3.23 o dispositivo robótico projetado por Bonani *et al.* (2009), consiste em um robô capaz de escalar estruturas através de um guincho eletromagnético e suas duas



Figura 3.21: PaintCopter dos laboratórios Disney. Fonte: (DISNEY, 2020).



Figura 3.22: Drone AeroX de inspeção projetado pela CATEC. Fonte: (TRUJILLO, M.Á. *et al.*, 2019).

garras. A principal colaboração desse projeto para o trabalho consistiu no sistema do guincho, seu mecanismo e funcionamento.

O VANT demonstrado por Robohub (2020) pode ser observado na figura 3.24. Tal drone foi criado com o intuito de inspecionar e executar a reconstrução 3D de cavidades

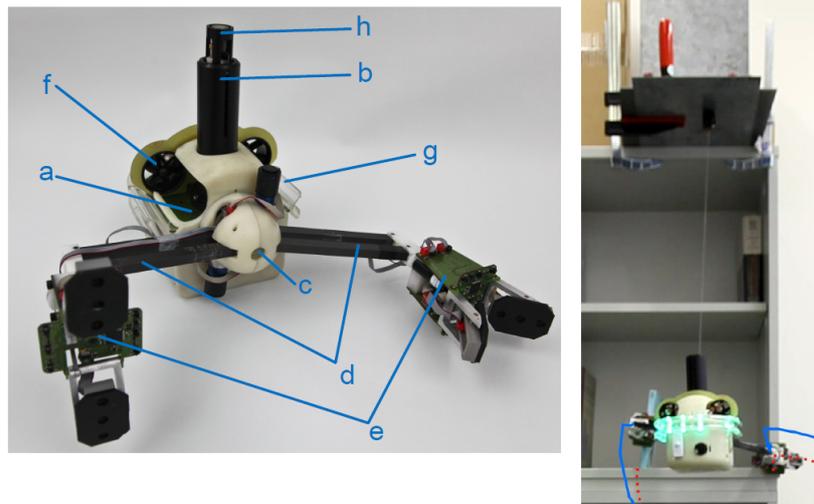


Figura 3.23: HandBot e seu funcionamento. Fonte: (BONANI *et al.*, 2009).

arbóreas, usadas por animais como abrigo para seus ninhos. A colaboração de tal projeto para este trabalho consistiu na arquitetura da haste que carrega o sensor principal, que se apresenta de forma simples e aparenta ser eficaz.



Figura 3.24: Drone utilizado para inspeção em árvores. Fonte: (ROBOHUB, 2020).

Em se tratando de manipuladores aéreos, o contrapeso é um fator primordial para o equilíbrio na dinâmica do sistema drone-manipulador. Kutia *et al.* (2018) em seu trabalho projetam um manipulador aéreo capaz de coletar amostras de árvores. A contribuição deste projeto para o presente trabalho consiste na disposição da estrutura responsável por

fornecer suporte ao contrapeso (utilizando-se da realocação das baterias do drone para tal fim).

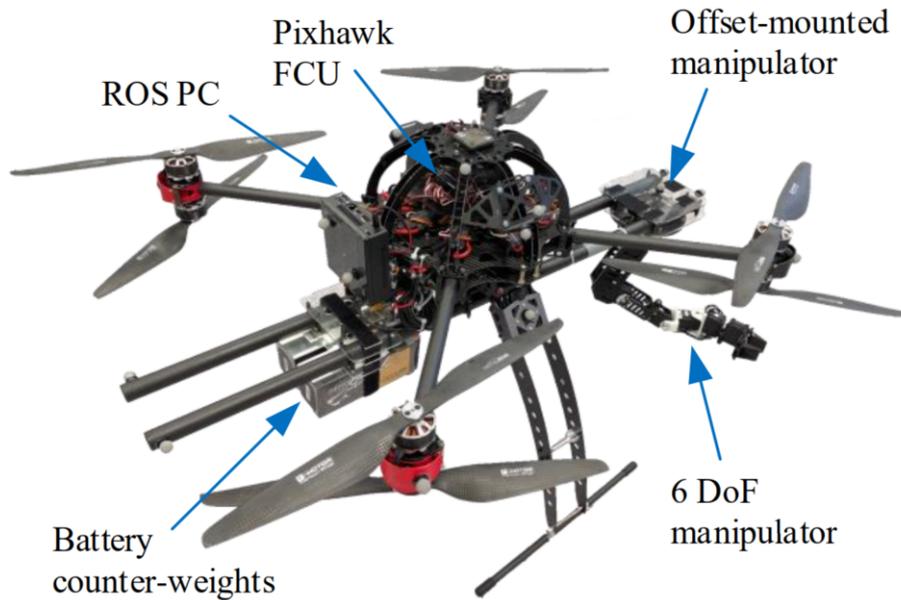


Figura 3.25: Fotografia do drone utilizado para coleta de amostras em árvores. Fonte: (KUTIA *et al.*, 2018).

A utilização de robôs aéreos para manipular objetos já é uma realidade. Uma *startup* de Israel, de nome Tevel, vem demonstrando isso. Ela projetou um drone capaz de coletar frutas em plantações, como demonstrado na figura 3.26. A contribuição deste robô para este projeto consistiu na simplicidade do braço manipulador.



Figura 3.26: Drone coletor de maçãs, projetado pela startup Tevel (Israel). Fonte: (TEVEL, 2021).

Após minuciosa análise das estruturas e mecanismos dos projetos acima citados, e tendo como base o planejamento exibido no fluxograma da figura 3.2, iniciou-se então o

projeto do braço manipulador. Utilizando o software SOLIDWORKS foram esboçadas algumas versões, até que todos os problemas intrínsecos ao projeto proposto fossem, a primeira vista, solucionados.

Idealizou-se também que o braço manipulador a ser projetado fosse universal, podendo este então ser acoplado em qualquer drone (desde que este possua um *payload* adequado dadas as características do projeto).

Na figura 3.27 têm-se a vista isométrica do manipulador projetado. Apesar do design simples, este possui algumas características que o tornam bastante versátil. Em 1 tem-se a parte denominada de medidor, tendo como funções portar o instrumento aferidor de vibração, bem como o eletroímã responsável pelo acoplamento temporário do mesmo nas máquinas e/ou estruturas em altura. Já em 2 tem-se o guincho, responsável por realizar a separação (e posterior junção) temporária do conjunto drone-manipulador do medidor, isolando-se assim as vibrações intrínsecas do drone das que se pretende aferir. Em 3 tem-se a localização da central eletrônica de comandos, composta essa basicamente por um microcontrolador (ESP32) e placas eletrônicas auxiliares. A bateria nesse projeto além de fornecer energia para o sistema, realiza a importante função de ser o contrapeso do braço (ajudando na anulação do peso do medidor), como pode ser visto em 4.

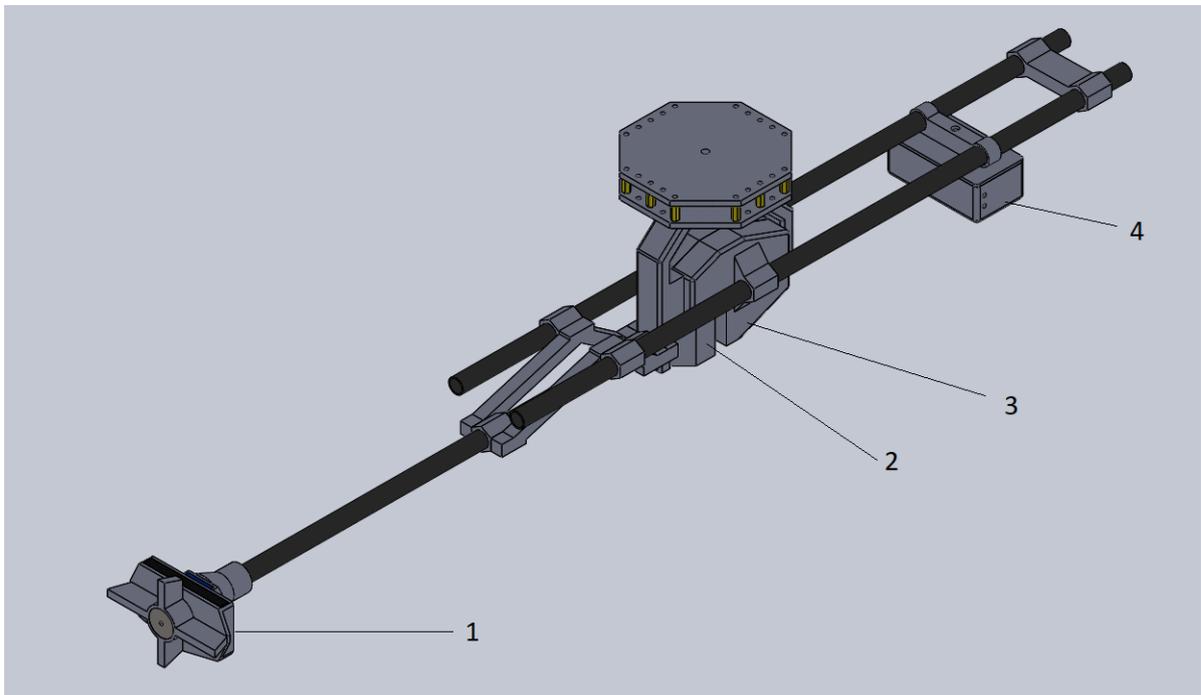


Figura 3.27: Representação gráfica do Manipulador (vista isométrica).

Um das características que fomentam a versatilidade deste manipulador, consiste no fato do mesmo permitir o ajuste linear do contrapeso de uma forma simples, bem como a regulagem do comprimento dos tubos (formadores estes da região traseira do braço). Na figura 3.28 pode-se observar que as peças 5 e 6 permitem o deslizamento dos tubos laterais,

com o intuito de regular o tamanho do braço de acordo com o drone a ser utilizado. Já em 7 nota-se uma peça que possui a função de acoplar o contrapeso nos tubos de suporte, bem como permitir o ajuste ideal do contrapeso, através do deslizamento do mesmo.

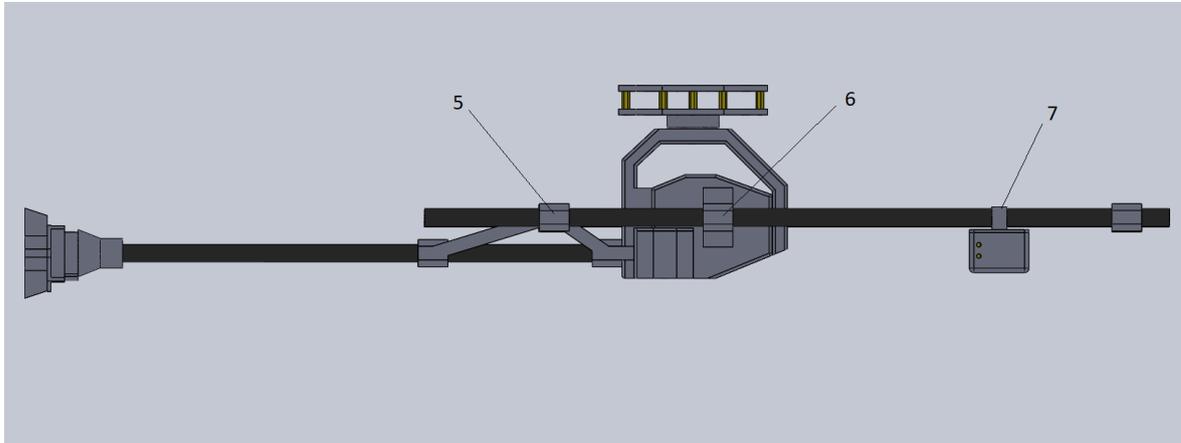


Figura 3.28: Representação gráfica do Manipulador (vista lateral).

Na figura 3.29 tem-se a vista explodida do desenho do braço. Nela observa-se o detalhamento de cada peça que compõe o referido projeto. Em 8 tem-se bocal responsável por se acoplar e segurar o medidor, através da tração cabo do guincho (21). Em 9 e 13, observa-se os tubos que dão suporte ao medidor e contrapeso, respectivamente. É importante ressaltar que os tubos laterais (13) além da darem suporte ao contrapeso, são responsáveis também por conectar o peso dianteiro e traseiro, equilibrando assim o sistema. As peças 10, 11 e 12 têm por função conectar os tubos, realizando assim a transmissão das forças envolvidas (torques traseiro e dianteiro). Em 21, tem-se o carretel do guincho, local onde o cabo do mesmo é recolhido. As peças laterais 22, tem por função prender a central de processamento (20), nos tubos (13). A haste 14 tem a importante função de juntar a central de processamento (20), com o suporte de conexão universal (peças 16 e 15), bem como as peças relacionadas ao tubo central (10, 11 e 12). Os elementos 18 e 19 estão relacionados com o contrapeso, onde 18 se conecta aos tubos traseiros, permitindo assim o deslizamento para ajustes de equilíbrio, e 19 consiste simplesmente em uma caixa para armazenar a bateria. Por fim, 17 é uma peça cujo objetivo é fornecer estabilidade de conexão entre os dois tubos traseiros.

Na figura 3.30 tem o desenho do guincho e da central de processamento. Em 23 tem-se o elemento que da base para o carretel (32) do guincho, seguido pela tampa (31). Pode-se observar o motor (30), parte vital do guincho. As peças laterais (24), dão suporte e proteção aos componentes eletrônicos da central de processamento. Ainda em tal figura, uma das possíveis configurações da central de processamento é mostrada. Em 29 tem-se placa responsável pelo controle e acionamento do motor (popularmente conhecida pelo nome de Ponte H). Em 25 tem-se o microcontrolador (ESP32) responsável pelo guincho

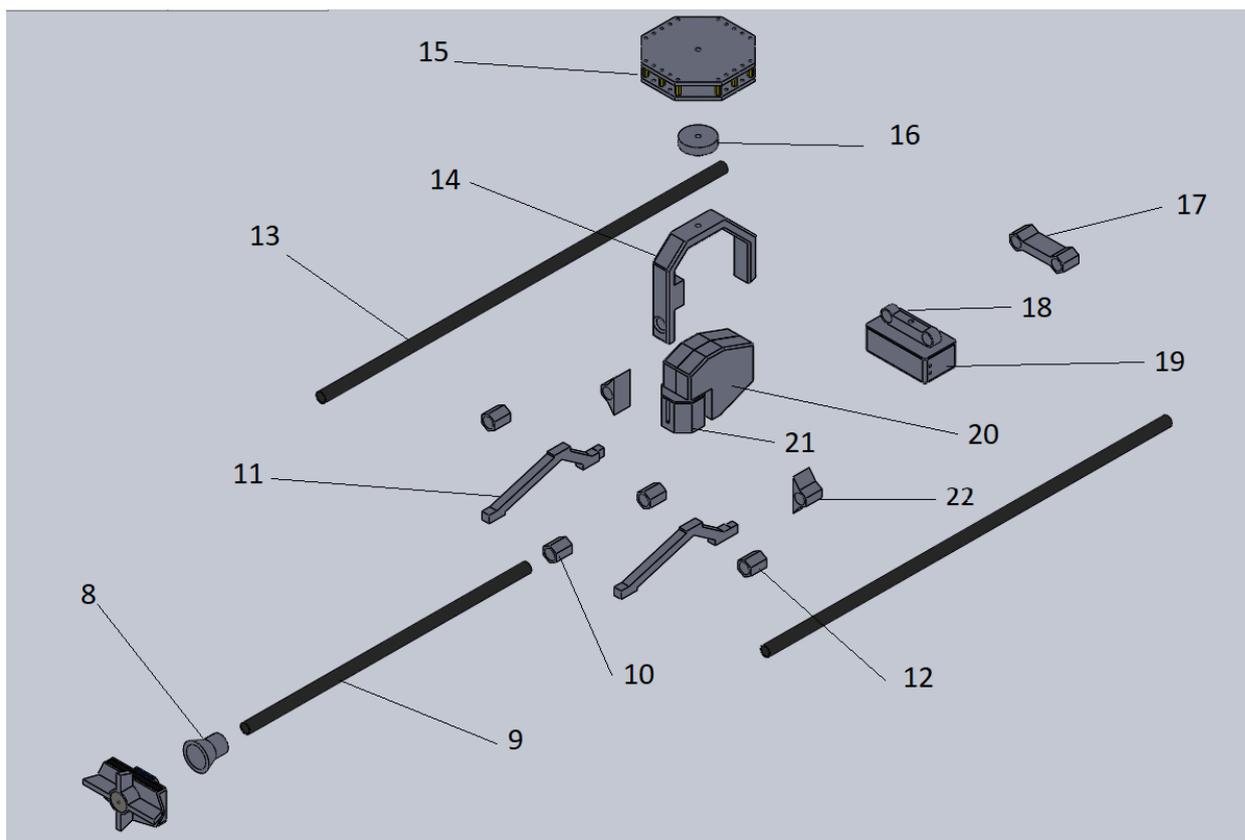


Figura 3.29: Representação gráfica do Manipulador (vista explodida).

e pelo eletroímã. A placa eletrônica de acionamento do eletroímã é representada em 28. Já em 26 e 27, observa-se conversores step-up, que tem por função ajustar (elevando) a tensão da bateria para o correto funcionamento do motor do guincho, eletroímã e microcontrolador.

O desenho do esquemático do medidor é mostrado na figura 3.31. O eletroímã é representado em 33. As peças 34 e 35 têm por função dar forma ao medidor e suporte ao sensor (37) e microcontrolador (36).

Após então a confecção do projeto, partiu-se então para a escolha do material a ser utilizado na impressão 3D. Definiu-se então o PETG (Polietileno Tereftalato de Etileno Glicol) como a melhor opção. Segundo a fabricante de filamentos 3Dlab (2021), o PETG reúne excelentes características, sendo estas: alta resistência ao desgaste; alta resistência a corrosão e agentes oxidantes; alta resistência ante impactos; facilidade para imprimir e compatibilidade com diversas impressoras (inclusive abertas); baixa deformação durante a impressão; ausência de odor forte e boa resistência térmica. É mais indicado quando necessita-se de peças com certo grau de flexibilidade, alta resistência mecânica e química, razoável resistência térmica (próximo a 85°C), e que serão sujeitas a certas pressões.

Os tubos utilizados são de um material compósito denominado de Fibra de Carbono, amplamente conhecido pela literatura. Segundo Bhatt e Goe (2017), este material é

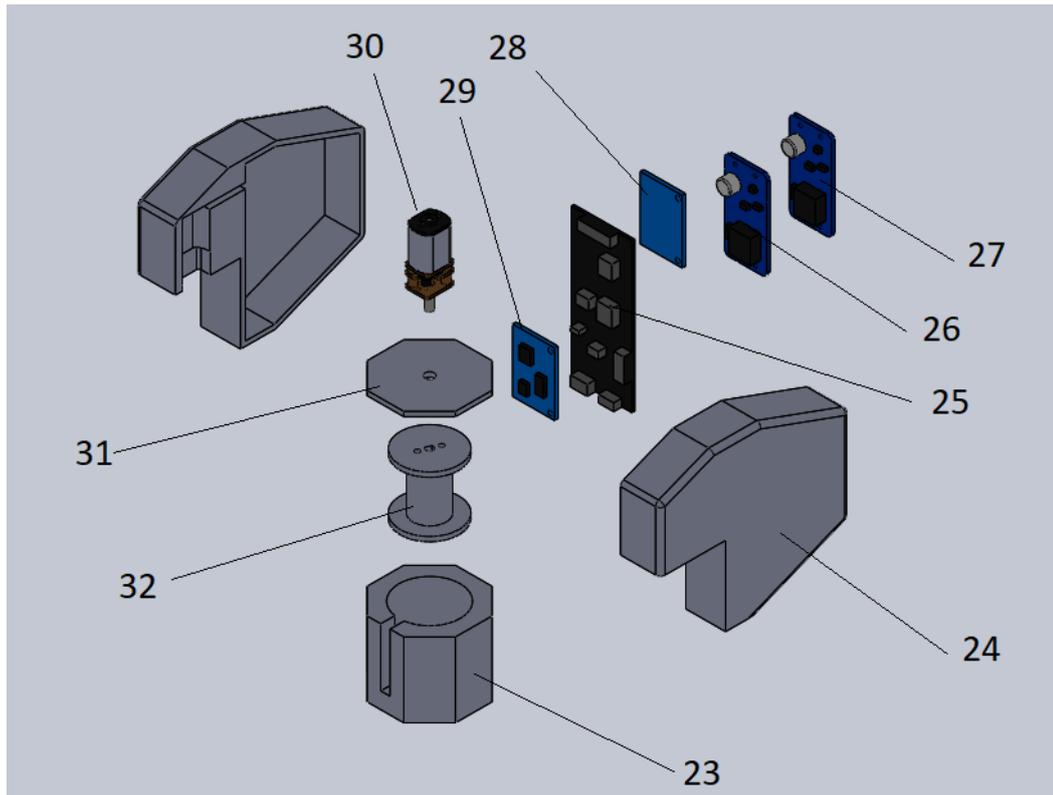


Figura 3.30: Representação gráfica do Guincho e central de comando (vista explodida).

extremamente forte, leve e rígido. As propriedades de uma peça confeccionada em fibra de carbono são próximas às propriedades de uma feita em aço, e o seu peso é bem próximo a uma confeccionada em plástico. Assim sendo, a relação resistência/peso (bem como a relação rigidez/peso) de tal material é muito maior do que aço ou plástico. Na figura 3.33 tem-se exemplos de tubos de fibra de carbono.

Após o projeto mecânico do manipulador, partiu-se então para o dimensionamento dos componentes a serem utilizados no projeto eletrônico do mesmo. Primeiramente iniciou-se uma pesquisa para escolher um microcontrolador/microprocessador que mais se adequasse a tarefa de compor a central de controle (comandar o guincho e o eletroímã).

Na confecção da primeira versão do instrumento, utilizou-se de um Raspberry Pi Zero W, rodando o sistema operacional conhecido por Raspberry Pi O.S Lite (antigo Raspian), onde o último termo (Lite) informa que tal sistema não possui interface gráfica (apenas comandos via terminal). Como a tarefa exigida para o controle do manipulador é de relativa simplicidade, uma vez que este precisaria apenas de controlar o guincho e o eletroímã, optou-se então por não usar o Rasp Zero, e sim um ESP32 (versão LilyGo T8 V1.7).

Um dos grande desafios presente neste trabalho está em projetar um sistema que permita separar as vibrações intrínsecas do drone, das vibrações que se almejam aferir (ou seja, de alguma máquina ou estrutura). Para isso, definiu-se então que o desacoplamento

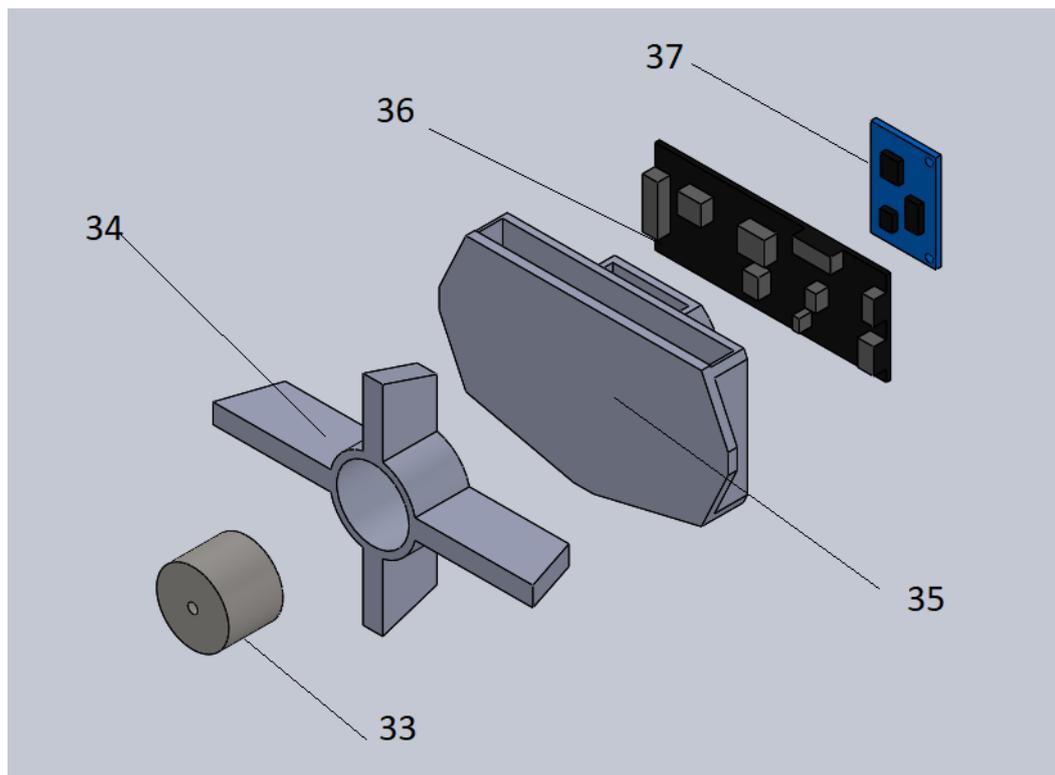


Figura 3.31: Representação gráfica do Medidor (vista explodida).



Figura 3.32: Filamento PETG. Fonte: Sunlu (2021).

temporário (e posterior acoplamento) do instrumento de medição em relação ao sistema do manipulador se tornaria necessário. Para isso, idealizou-se a utilização de um guincho para realizar tal movimento.



Figura 3.33: Tubos de fibra de carbono. Fonte: Ubuy (2021).

Foi iniciada então um pesquisa visando projetar um guincho que atendesse aos requisitos do projeto. Optou-se inicialmente por adquirir um modelo utilizado em veículos de brinquedos radiocontrolados, para assim executar seu desmonte e adequar o mesmo para o projeto. Na figura 4.29 tem o modelo adquirido, e o seu desmonte é mostrado na imagem 3.35.



Figura 3.34: Guincho RC. Fonte: (ALIEXPRESS, 2021a).

Em relação aos métodos de controle e acionamento do motor do guincho, definiu-se pela utilização de uma ponte H (nome popular para um tipo de conversor CC/CC denominado de Chopper de Quatro Quadrantes). Basicamente, o circuito eletrônico de uma ponte H possibilita a escolha/controle do sentido de rotação do motor de uma forma segura. A mesma ainda geralmente possui em sua configuração circuitos auxiliares para proteção do sistema eletrônico em questão, de eventos danosos como: correntes reversas (ou de fuga), picos de tensões e sobrecargas.

O dois drivers de ponte H de baixa potência mais populares são mostrados na figura 3.36. Ambas as placas possuem circuitos integrados com pontes H duplas, ou seja, cada uma consegue controlar dois motores de corrente contínua. A placa HG7881 possui tensão de operação entre 2.5 V a 12 V, fornecendo até 800 mA por motor. Já o L298, pode operar com tensões de até 48 V, e fornecer correntes de até 4 A.

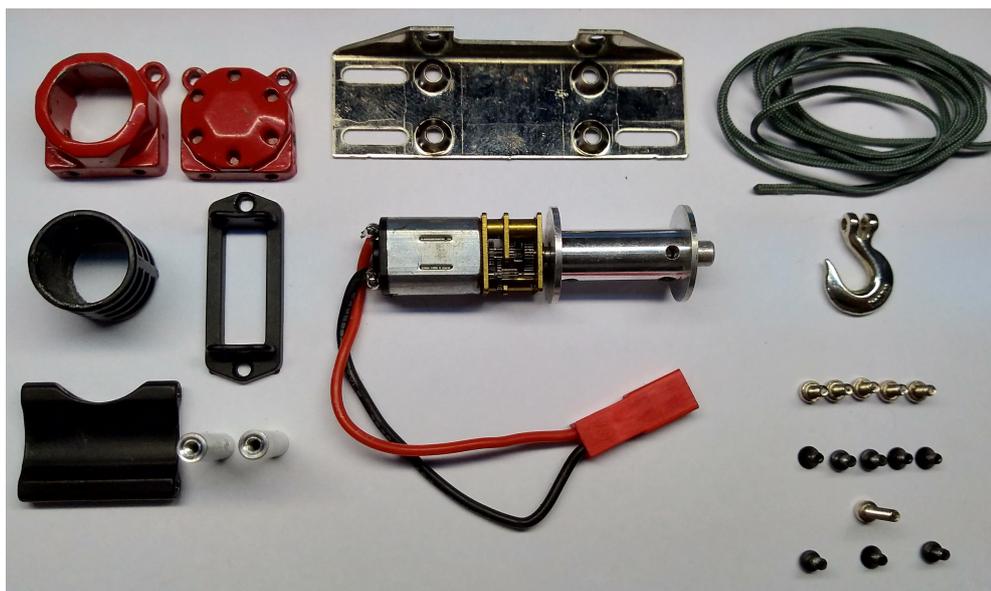


Figura 3.35: Guincho RC desmontado.

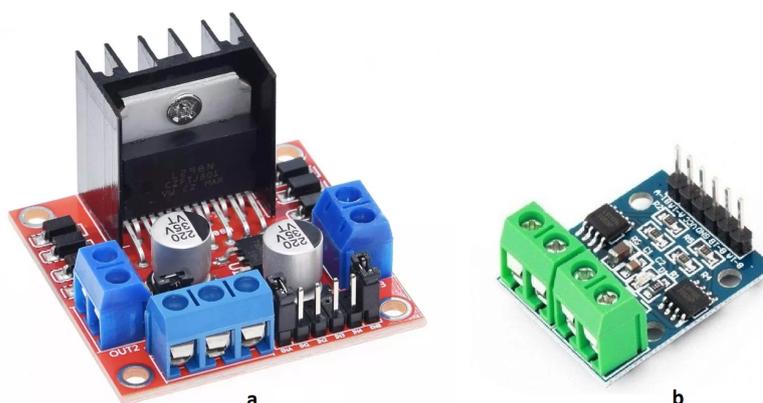


Figura 3.36: Drivers populares de ponte H, L298 (a) e HG7881 (b). Fonte: Aliexpress (2021b).

Para que placa HG7881 consiga compreender corretamente os comandos recebidos pelo microcontrolador, um conversor bidirecional de nível lógico (3.3 V para 5 V) se torna necessário, uma vez que o microcontrolador utilizado possui nível lógico alto em 3.3 V. Já a ponte H L298 dispensa tal conversor, uma vez que consegue compreender níveis lógicos (como altos) a partir de 1.5 V.

Em relação ao medidor de vibração, este (como mostrado na figura 3.1) terá de aderir-se a uma superfície metálica de determinada máquina e/ou estrutura, com o objetivo de captar as vibrações características desta. Para solucionar tal problema, utilizou-se de um pequeno eletroímã, com a função de fixar temporariamente o instrumento. Este componente é capaz de suportar um peso de até 2,5 Kg, possuindo um tamanho de 20 mm por 10 mm. O controle de seu acionamento se dá através de uma chave eletrônica

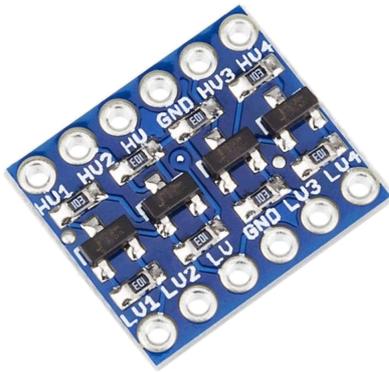


Figura 3.37: Conversor lógico bidirecional. Fonte: (USINAINFO, 2020a).

transistorizada. Na figura 3.38 tem-se um exemplo de tal eletroímã.



Figura 3.38: Eletroímã encarregado de fixar o *datalogger* na superfície das máquinas. Fonte: (USINAINFO, 2020a).

Para suprir a alimentação dos componentes utilizados na confecção do medidor (ESP32, sensor e o eletroímã), utilizou-se uma placa reguladora de tensão de nome MT3608. Essa placa consiste em um tipo de conversor denominado de *step-up*, capaz que proporcionar aumento das tensões de entrada (2 V a 24 V), oferecendo em sua saída tensões de 2,5 a 28 V (que podem ser ajustadas conforme a necessidade, por meio de um trimpot). Na figura 3.39 tem-se a imagem de tal regulador.

Na figura 3.40 tem-se um fluxograma demonstrando a conexão entre cada um dos componentes, bem como a respectiva parte no qual o mesmo se encontra dentro do projeto (instrumento, central de processamento ou contrapeso).

Pode-se observar a representação do método utilizado para acessar os ESP32s (microcontroladores) e enviar os respectivos comandos (representados pelas linhas pontilhadas vermelhas). Estes são inicialmente configurados para se conectar a rede Wi-fi criada pelo roteador, onde é atribuído a cada ESP32 um respectivo endereço IP, sendo os comandos enviados remotamente para o mesmo por meio qualquer navegador.



Figura 3.39: Regulador ajustável de tensão MT3608. Fonte: (USINAINFO, 2020b).

Ressalta-se o Raspberry Pi Zero e a IMU GY-80 tem por função mapear o comportamento do sistema drone-manipulador, sendo sua presença opcional.

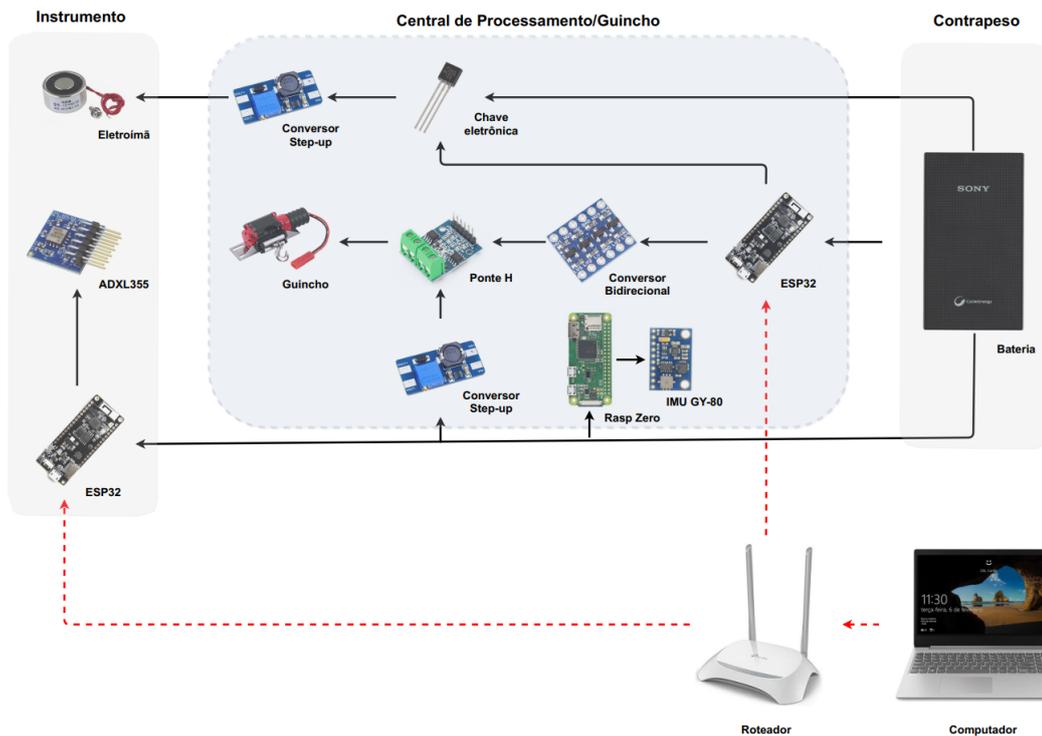


Figura 3.40: Esquema de funcionamento eletrônico.

O esquemático eletrônico das ligações entre os componentes está representado na figura 3.41, onde foi utilizado o software Proteus.

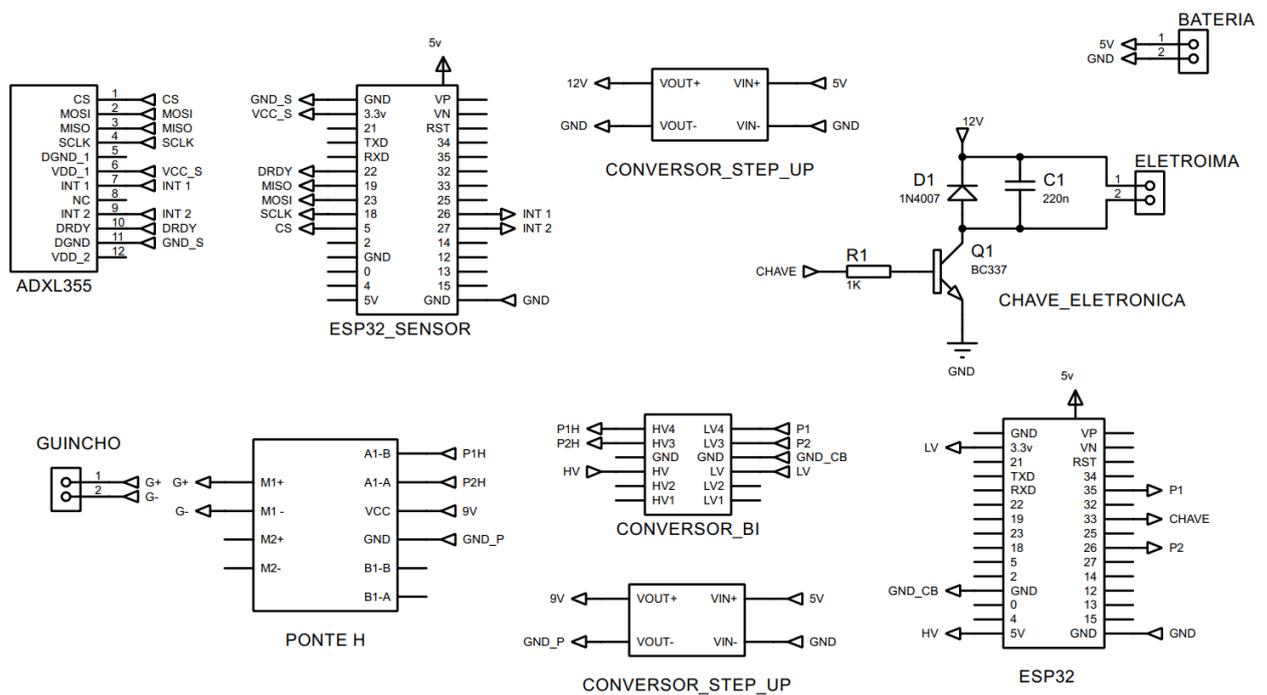


Figura 3.41: Diagrama esquemático do projeto eletrônico.

3.5 Drone

Foi realizada uma avaliação sobre os modelos de drones disponíveis no laboratório do ITV, com o intuito de averiguar qual seria o mais indicado para o projeto proposto neste trabalho. O drone deve ser capaz de suportar os distúrbios gerados pela ação do manipulador a ele acoplado, e precisa possuir um controlador robusto capaz de estabilizar o sistema, fazendo com que este não sofra problemas de instabilidade durante o seu voo. Esperava-se encontrar um que fosse *opensource*, permitindo assim a inserção de parâmetros de controle (configuração manual). O *payload* também foi um fator de relevância em tal investigação, uma vez que o drone terá de ser acoplado a um dispositivo manipulador simples.

Dois drones estavam disponíveis no laboratório, e estes atendem aos requisitos e que são compatíveis com o projeto, sendo apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Drones disponíveis no ITV

Drone	Payload	Opensource	Configuração
DJI Inspire 1	1.980Kg	Não	Fechada
Asctec Pelican	650g	Sim	Aberta

O drone Dji Inspire I apresenta um valor maior de *payload*, porém não se tem acesso as suas configurações de controle. A figura 3.42 é uma imagem que representa este VANT.



Figura 3.42: Foto do drone DJI Inspire I. Fonte: (DJI, 2014).

O Asctec Pelican pode ser considerado *open source* e permite a alteração de suas configurações tanto estruturais quanto em nível de malha de controle. Porém, o mesmo suporta apenas 650g de carga. Na figura 3.43 tem-se tal drone.

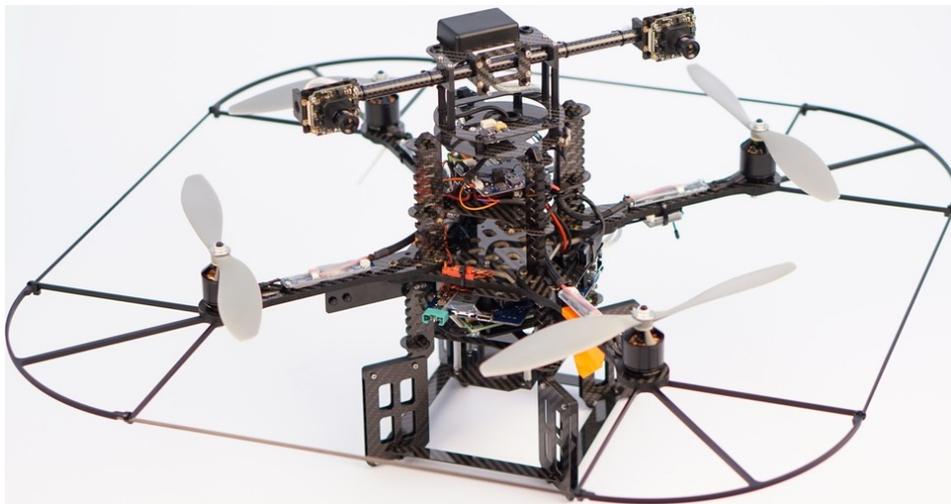


Figura 3.43: Foto do drone Asctec Pelican. Fonte: (PRODUCTZ, 2020).

Por fim, decidiu-se então pela utilização do drone Inspire 1. Seguiu-se então com a execução de adaptações para que o dispositivo projetado se ajustasse a este drone. Nas figuras 3.44, 3.45, 3.46 e 3.47 são demonstradas o desenho do manipulador acoplado no Inspire 1).

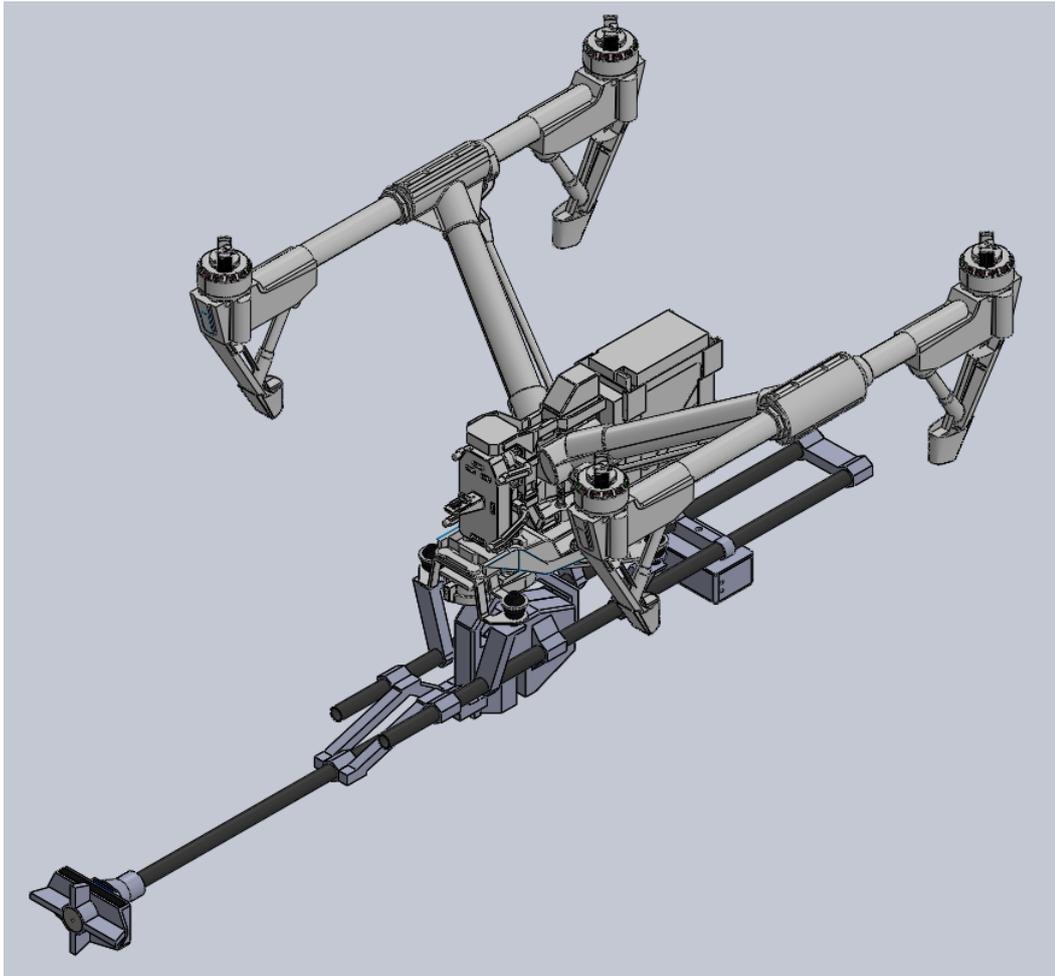


Figura 3.44: Desenho do drone com o manipulador projetado, vista isométrica.

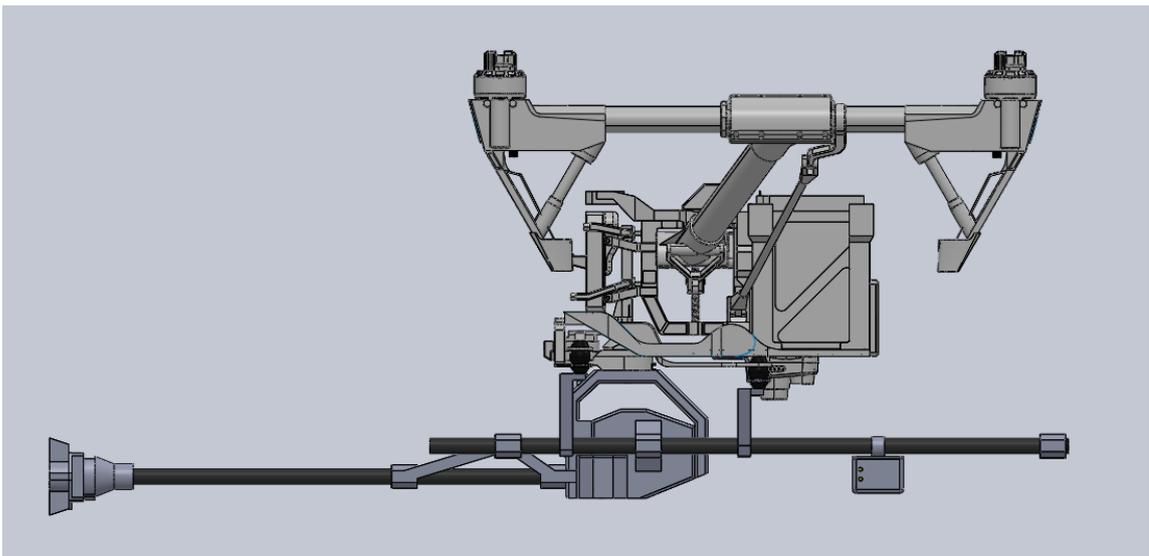


Figura 3.45: Desenho do drone com o manipulador projetado, vista lateral.

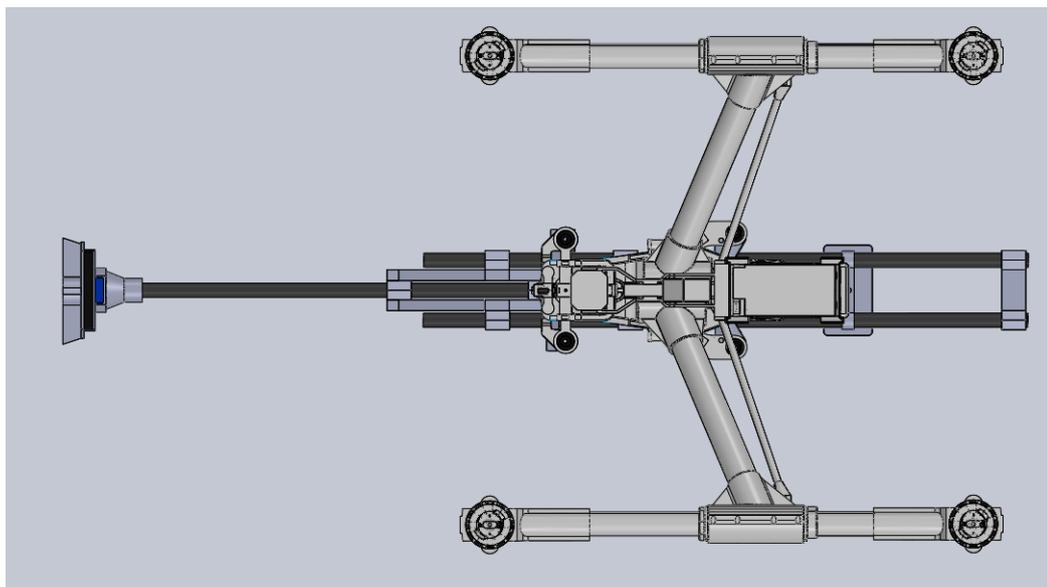


Figura 3.46: Desenho do drone com o manipulador projetado, vista superior.

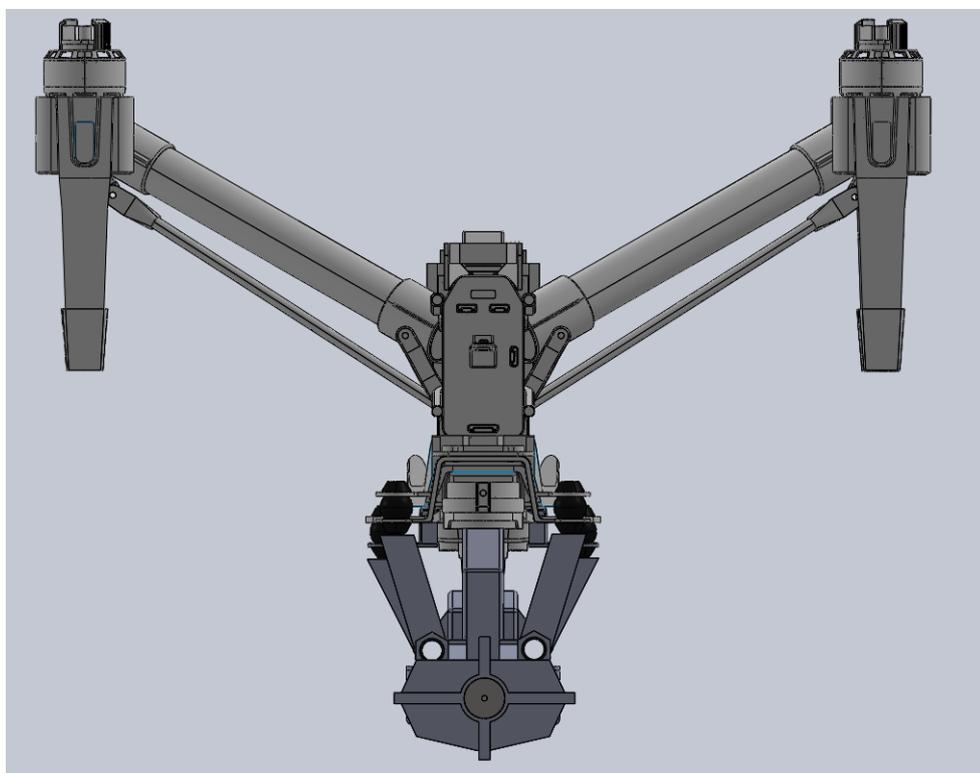


Figura 3.47: Desenho do drone com o manipulador projetado, vista frontal.

4. Resultados e Discussão

Nesse capítulo são apresentados os testes idealizados visando avaliar a eficácia e funcionamento do protótipo proposto, bem como discutir os resultados obtidos.

Optou-se por criar experimentos específicos para cada problema crítico que o dispositivo tem de enfrentar, para assim atingir o seu objetivo. O projeto então foi segmentado, sendo cada uma das partes tratada isoladamente, partindo da premissa de que se todas funcionam individualmente, o conjunto também funcionaria.

Em relação ao instrumento medidor de vibração, foi proposto averiguar seu comportamento na aferição de máquinas reais, visando o diagnóstico de problemas, observando assim sua compatibilidade para com o projeto proposto.

No que tange ao manipulador, analisou-se a sua montagem mecânica e eletrônica, seu comportamento durante voos, bem como a propagação de vibrações pela sua estrutura durante o monitoramento das mesmas.

Ressalta-se que foi utilizado o MATLAB para filtragem dos dados e geração dos gráficos.

4.1 Testes do Instrumento e Análise de Vibrações

Essa seção tem por finalidade testar e explorar o comportamento do sensor de vibração (composto pelo acelerômetro ADXL355 e pelo microcontrolador ESP32), bem como analisar e tratar os dados coletados.

Para isso, foram propostos e executados dois experimentos de bancada. O primeiro consistiu na medição da aceleração de uma máquina rotativa em seu estado normal e sem carga no eixo. O segundo consistiu na inserção de um problema na mesma máquina, visando diagnosticá-lo por meio da análise do espectro de frequência. Em seguida, foi utilizado um método de integração (proposto por Zhu *et al.* (2015)) para a obtenção do sinal de velocidade.

4.1.1 Teste de Vibração em um motor (a vazio)

Como já citado anteriormente, o objetivo de tal experimento consistiu em avaliar o desempenho do acelerômetro ADXL355 na medição de variáveis operacionais de máquinas.

Para tal experimento, utilizou-se um esmeril fixado em uma mesa por parafusos. O motivo da escolha de tal máquina se justifica pelo fato dessa possuir tamanho reduzido, fácil manuseio e acionamento, informações preliminares presentes na placa de dados (como frequência e velocidade) e por essa se mostrar uma excelente fonte de vibração (utilizada em outros experimentos).

Após a fixação correta do esmeril na mesa, foi ajustada a taxa de amostragem do sensor para 2 kHz e este foi posicionado como é ilustrado na Figura 4.1. Em seguida,

foram realizadas três coletas de dados com tempo aproximado de 15 segundos, onde foi aguardado o retorno ao repouso do eixo do motor para assim encerrar a captura de dados.

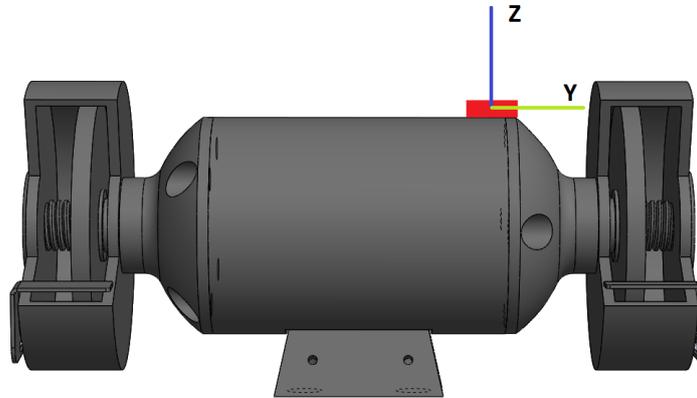


Figura 4.1: Representação gráfica do sensor ADXL355 posicionado no esmeril.

Nas Figuras 4.2 pode ser observado o comportamento das acelerações do esmeril nos eixo x, y e z, respectivamente. Em todos os gráficos pode ser observado o comportamento do motor, no que tange aos momentos de aceleração e desaceleração.

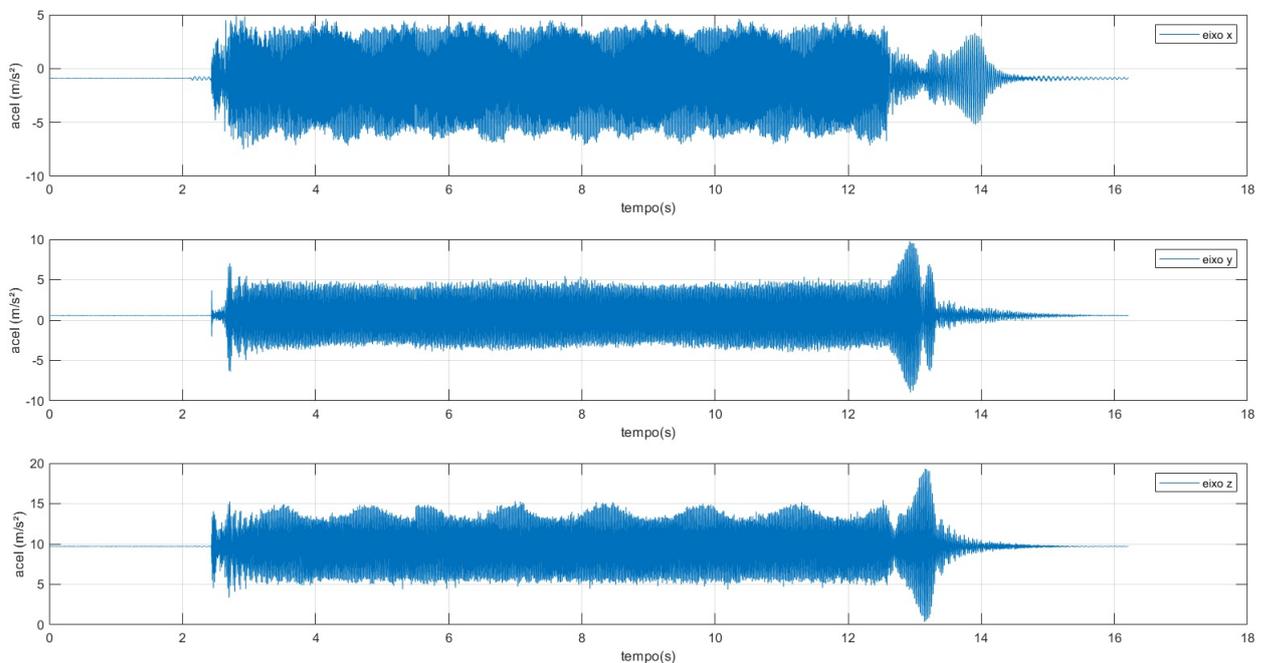


Figura 4.2: Sinais coletados mostrando a evolução da aceleração, em cada eixo, do Esmeril (a vazio).

Em seguida, visando eliminar os estados transitórios dos dados coletados, separou-se um período de 3 segundos no qual o motor mantinha velocidade constante, gerando assim

em sequencia os gráficos das FFTs. Na imagem 4.3 podem ser vista as acelerações (x, y e z) após tal corte.

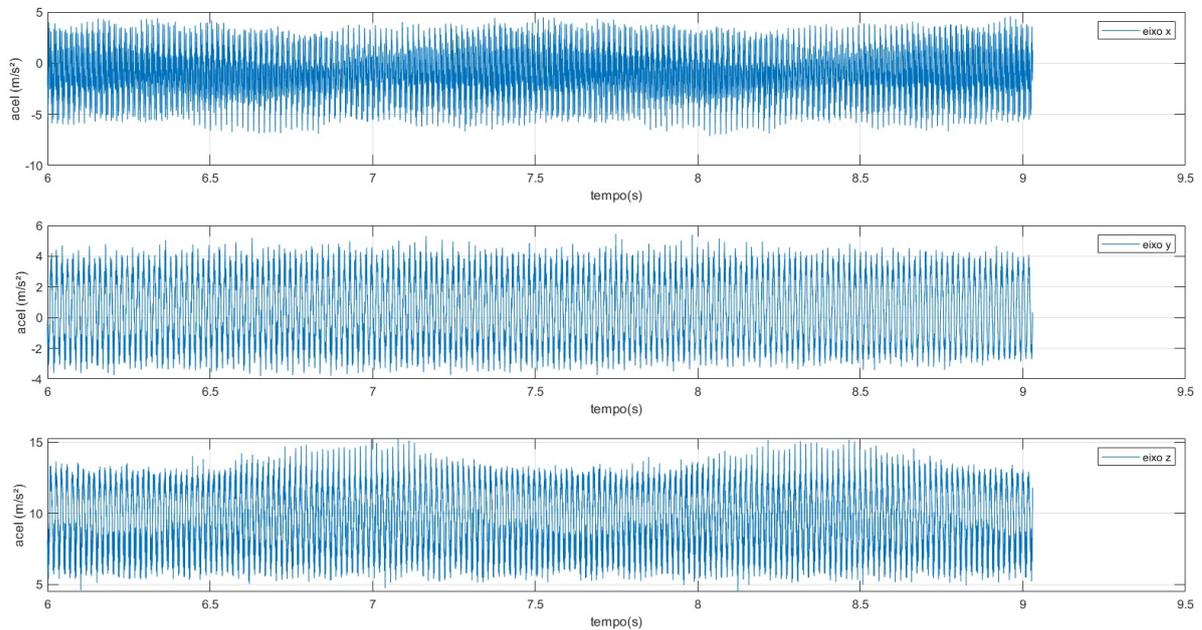


Figura 4.3: Corte de 3 segundos dos sinais coletados, mostrando a evolução da aceleração em cada eixo (x,y e z), do Esmeril a vazio.

Através do *toolbox* disponibilizado por Irvine (2018), foram gerados os gráficos das respectivas FFTs, estando estas representadas na figura 4.4. Na FFT do eixo x é evidente a presença de diversos harmônicos da frequência fundamental de 60 Hz.

Através da observação dessas figuras, pode-se concluir que o sensor ADXL355 demonstrou possuir baixo ruído, característica fundamental para o presente projeto. Outra conclusão importante que se pode retirar deste experimento, consiste na criação do padrão de comportamental do esmeril rodando a vazio.

4.1.2 Teste de Vibração em um motor (desbalanceado)

Com o intuito de averiguar o diagnóstico de problemas em máquinas via análise do espectro vibracional, criou-se então um experimento no qual se induziria um determinado problema no esmeril, repetindo assim a mesma metodologia de coleta de dados adotada no primeiro experimento.

Em relação a máquinas rotativas, vale lembrar que a versão atual do medidor consegue identificar três tipos de problemas, dada a taxa máxima de amostragem de 4 KHz que este atinge.

Idealizou-se então desbalancear o esmeril através da inserção de um objeto que fizesse com que a distribuição de massa no eixo do seu motor ficasse desigual. Após a inserção

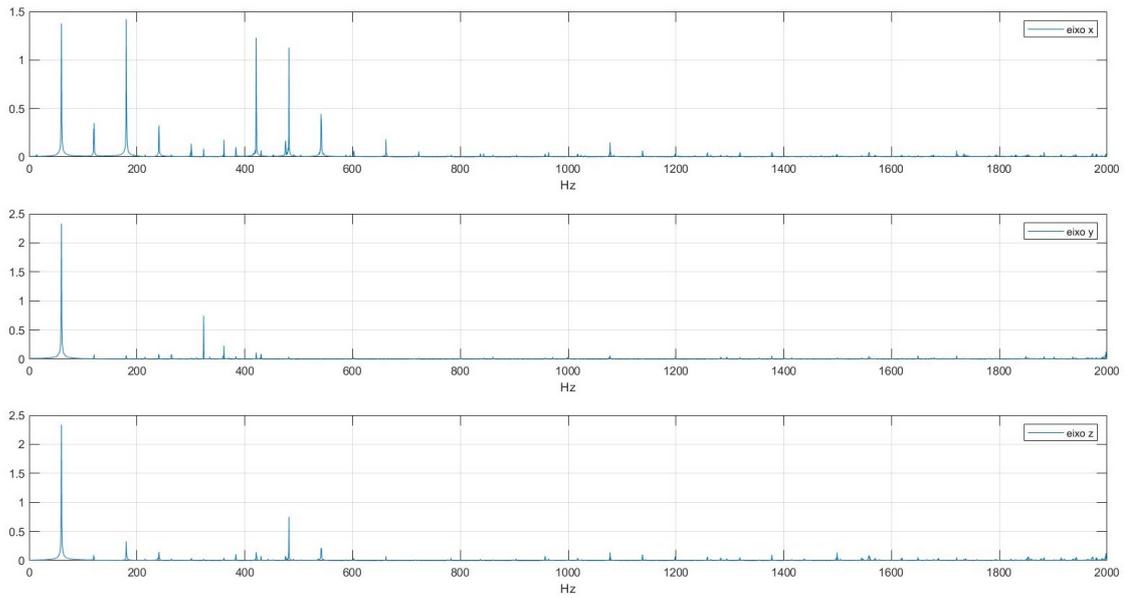


Figura 4.4: FFTs do Esmeril (a vazio).

de uma simples abraçadeira no eixo em um dos seus lados, este foi acionado e iniciou-se a coleta de dados. Na figura 4.5, observa-se um exemplo real de um esmeril e uma abraçadeira semelhante a utilizada.



Figura 4.5: Foto do esmeril (a) utilizado para o experimento, e a abraçadeira (b) usada para o desbalanceamento.

Na figura 4.6 pode-se observar a aceleração coletada nos eixos, x, y e z. Nota-se também que o valor da amplitude da aceleração aumentou, quando estes valores são

comparados com os coletados no primeiro experimento.

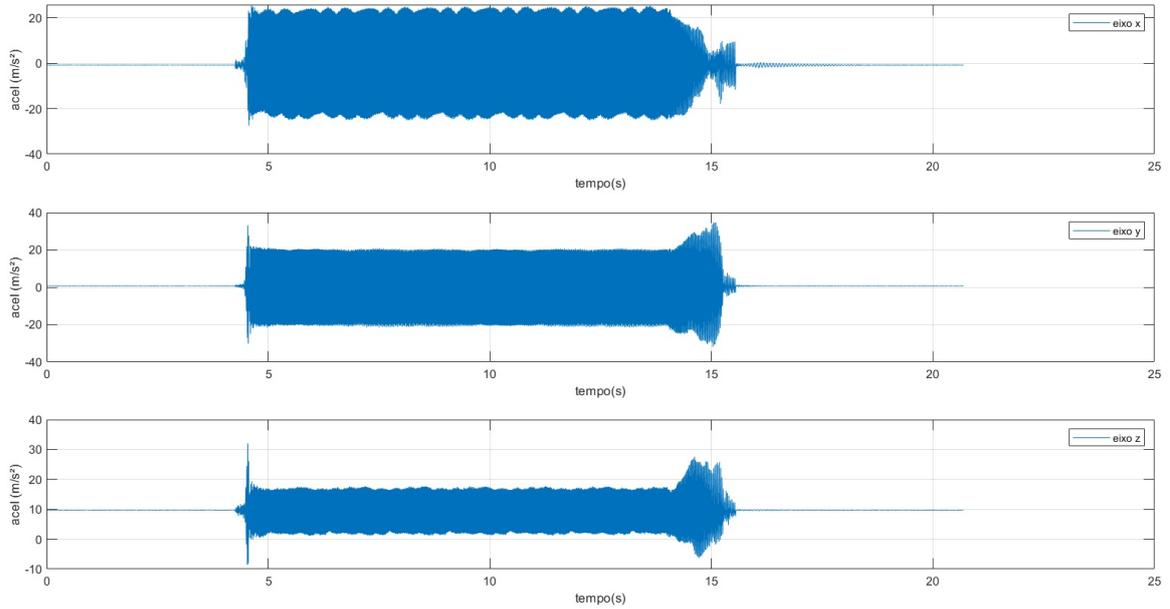


Figura 4.6: Acelerações do Esmeril (desbalanceado).

Em seguida, como feito no primeiro experimento, extraiu-se do sinal coletado um período de aproximadamente três segundos, no qual o sinal já se encontrava em estado estacionário, como apresentado na imagem 4.7.

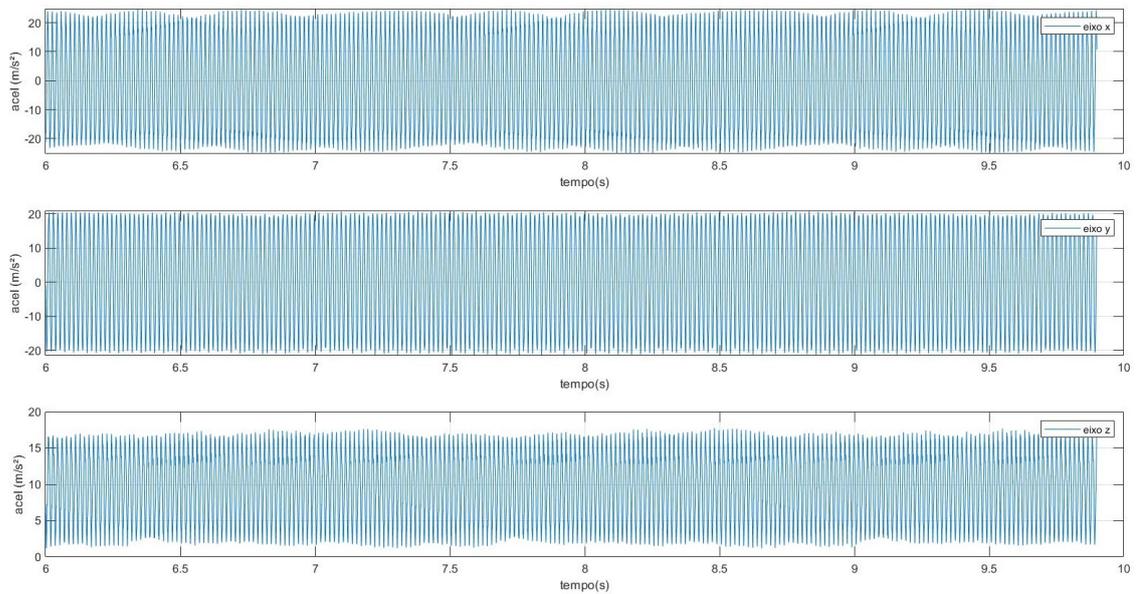


Figura 4.7: Acelerações do Esmeril (desbalanceado).

Após o referido corte, gerou-se então os gráficos das FFTs, apresentadas na figura 4.8. Como pode ser observado nas figuras citadas, o primeiro harmônico aumentou considera-

velmente a sua amplitude, fato que, segundo ADASH (2019), caracteriza o problema de desbalanceamento.

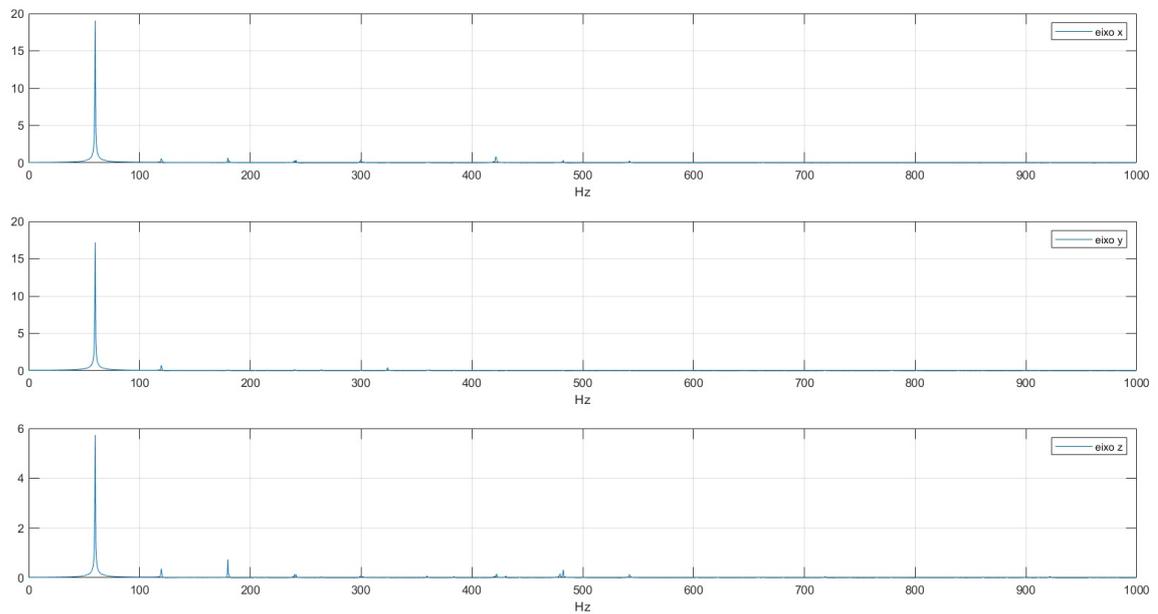


Figura 4.8: FFT dos dados coletados durante o funcionamento do esmeril na condição "desbalanceado".

Na imagem 4.9 é possível observar o gráfico do espectrograma dos dados de desbalanceamento coletados no eixo x. Esse tipo de gráfico 3D é muito intuitivo, uma vez que mostra a duração de determinada frequência com o tempo. Nessa figura fica clara a divisão e propagação dos harmônicos.

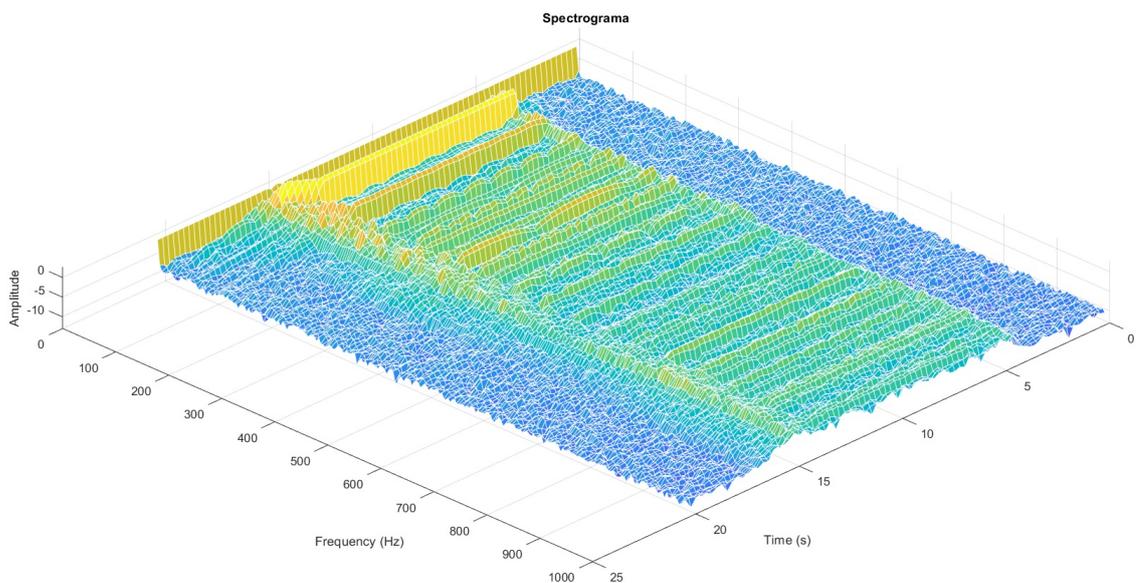


Figura 4.9: Gráfico do Espectrograma eixo x.

Portanto, é possível concluir com esse segundo experimento que a distribuição desigual de massas no eixo de máquinas rotativas causa um grande aumento no primeiro harmônico, caracterizando assim o problema de desbalanceamento. É novamente passível de se afirmar que o sensor ADXL355 se mostra bastante razoável para o diagnóstico de problemas em máquinas.

4.1.3 Tratamento do Sinal

A obtenção da velocidade por meio da integração direta de sinais de aceleração não é recomendada, uma vez que em tal processo surge uma constante arbitrária. Em poucas palavras, tal constante insere distorções no sinal obtido, descaracterizando-o.

Para sanar este problema, diversas técnicas são utilizadas, desde filtros eletrônicos inseridos diretamente da placa dos sensores, até complexos algoritmos de tratamento de dados.

Durante as pesquisas realizadas, encontrou-se o método de integração proposto por Zhu *et al.* (2015), que se estimou ser de grande valia para o trabalho proposto. Após um árduo trabalho para juntar e sincronizar todos os passos propostos nesse algoritmo, este foi aplicado nos dados coletados do esmeril desbalanceado, uma vez que como afirmado por ADASH (2019), o diagnóstico de problemas como desalinhamento, desbalanceamento e folga são realizados através da observação do domínio da frequência do sinal de velocidade.

Ressalta-se que este método foi aplicado apenas nos dados do eixo x (corte de 3 segundos), uma vez que o resultado é análogo para os demais eixos.

Na figura 4.10 tem-se o sinal de aceleração do eixo x, antes de ser aplicado o algoritmo.

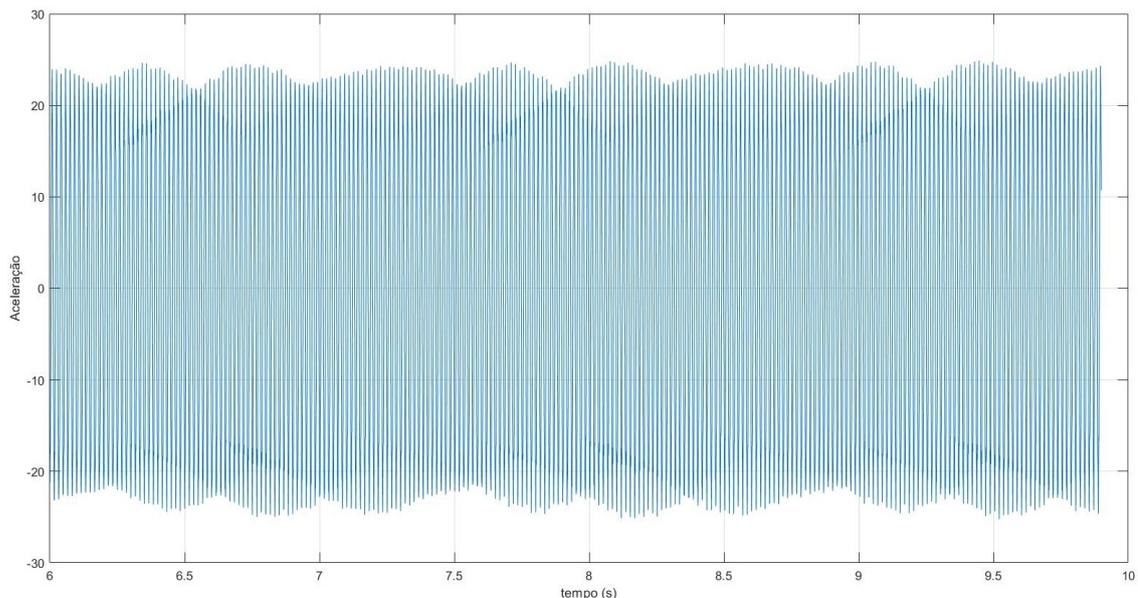


Figura 4.10: Aceleração no eixo X (3 segundos).

Na imagem 4.11 tem-se os gráficos do resultado dos dados de aceleração coletados após a passagem no processamento de média zero. Pode ser observado que este processamento visa unicamente eliminar a componente DC do sinal. No presente caso nada ocorreu, uma vez que por coincidência o eixo em questão já possuía tal média zero.

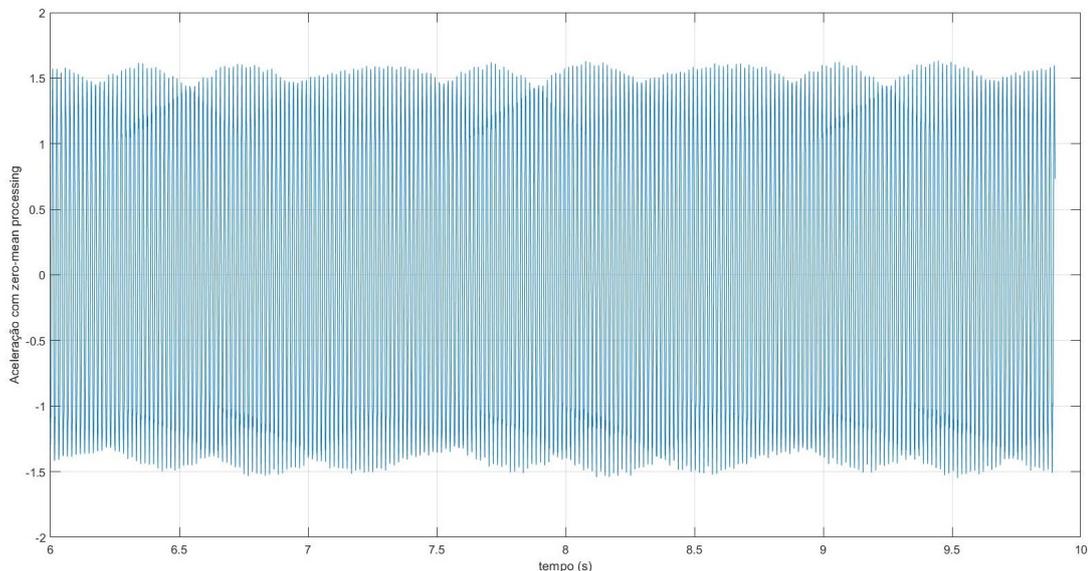


Figura 4.11: Aceleração após filtragem de média zero.

Após esse processamento, integrou-se o sinal no domínio da frequência. Tal passo, segundo os autores, diminui o erro dessa operação ao se comparar com a clássica integração no domínio do tempo. O resultado dessa integração poder ser observada na imagem da figura 4.12. É claramente notado o efeito da distorção causada pela integração.

Em sequência, o próximo passo consistiu novamente na aplicação do processamento de média zero, visando o ajuste da componente DC do sinal, como pode ser visto na figura 4.13.

Como anteriormente mencionado, o algoritmo EEMD decompõem o sinal integrado em funções denominadas de funções modo intrínseco, separadas em diferentes faixas de frequência. Após o processamento dos dados nessa etapa, o algoritmo gerou cerca de 11 IMFs.

A imagem 4.14 traz a representação da IMF 1, tanto no domínio do tempo, quanto da frequência. Pode ser observado que essa IMF é caracterizada por carregar o ruído de alta frequência (e baixa amplitude) presente no sinal.

Também nota-se que a IMF 2 é caracterizada por possuir componentes de frequências próximas as dos harmônicos anteriormente detectados, bem como aspecto de ruído.

No gráfico da IMF 3 pode-se observar que o sinal, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência, já apresenta uma forma mais característica relativa a movimento de máquinas rotativas. Nota-se também que o espectro de frequência possui o pico seme-

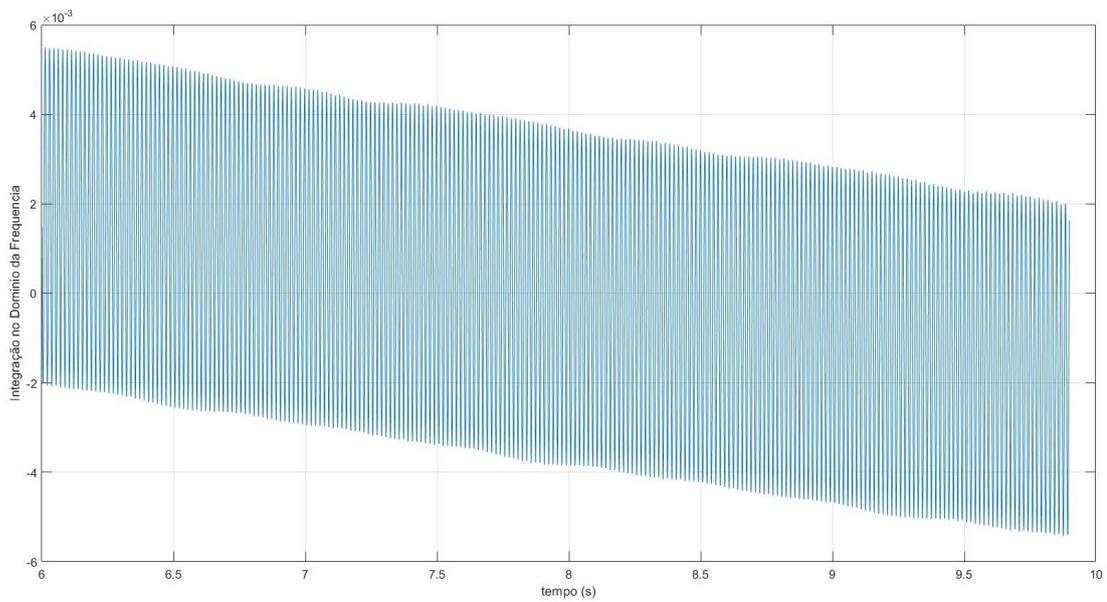


Figura 4.12: Integração no domínio da frequência.

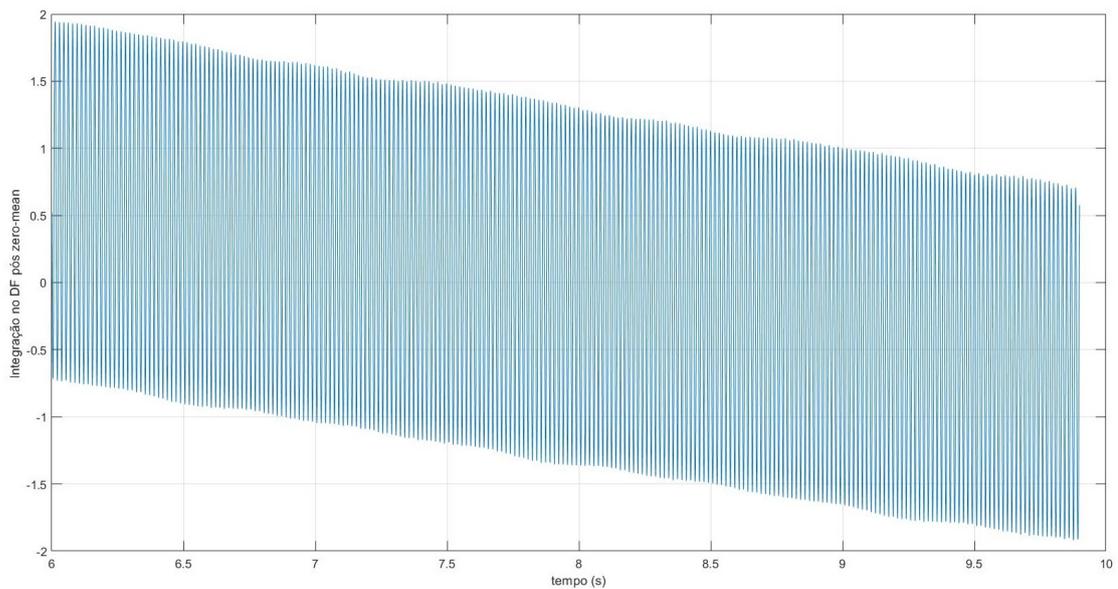


Figura 4.13: Aplicação de filtro de média zero no sinal integrado no domínio da frequência.

lhante ao espectro original do sinal original.

Nas figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 tem-se os componentes de baixas frequências presentes no sinal.

Os gráficos das IMFs 8, 9, 10 e 11 (figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24) possuem frequências menores que 1 Hz, fato esse que pode ser confirmado ao se observar os gráficos no domínio do tempo.

Em seguida, como proposto por Zhu *et al.* (2015), primeiramente são extraídas as

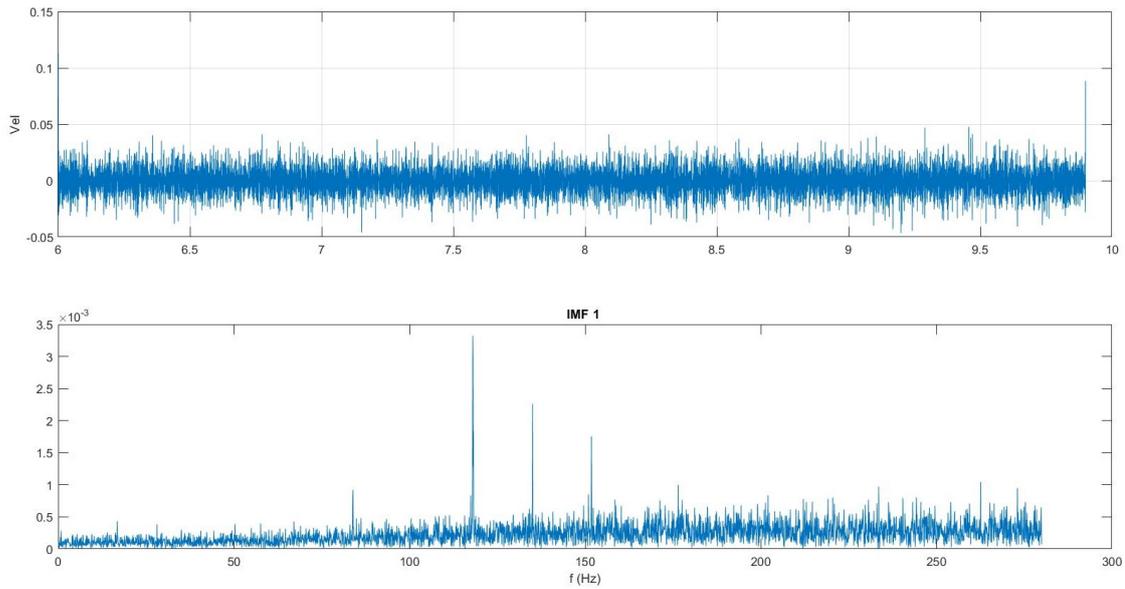


Figura 4.14: IMF 1 e respectivo espectro de frequência.

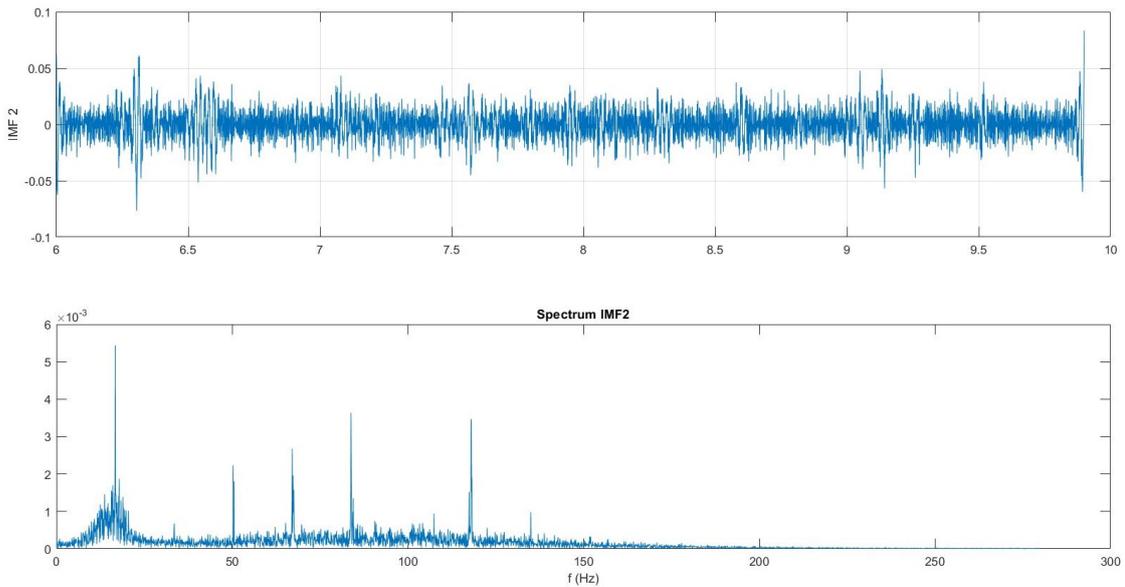


Figura 4.15: IMF 2 e respectivo espectro de frequência.

características (curtose, energia, RMSE e SVD) do sinal original obtido da integração, bem como de todas as IMFs. Estes valores são armazenados em vetores de quatro posições, e a distância euclidiana é calculada entre os parâmetros do sinal original integrado e cada uma das IMFs.

Na figura 4.25 têm-se o resultado deste cálculo, bem como os valores obtidos pela correlação cruzada. O menor valor da distância euclidiana obtido, bem como o maior valor da correlação cruzada, indicam qual IMF é a mais indicada para a reconstrução do sinal

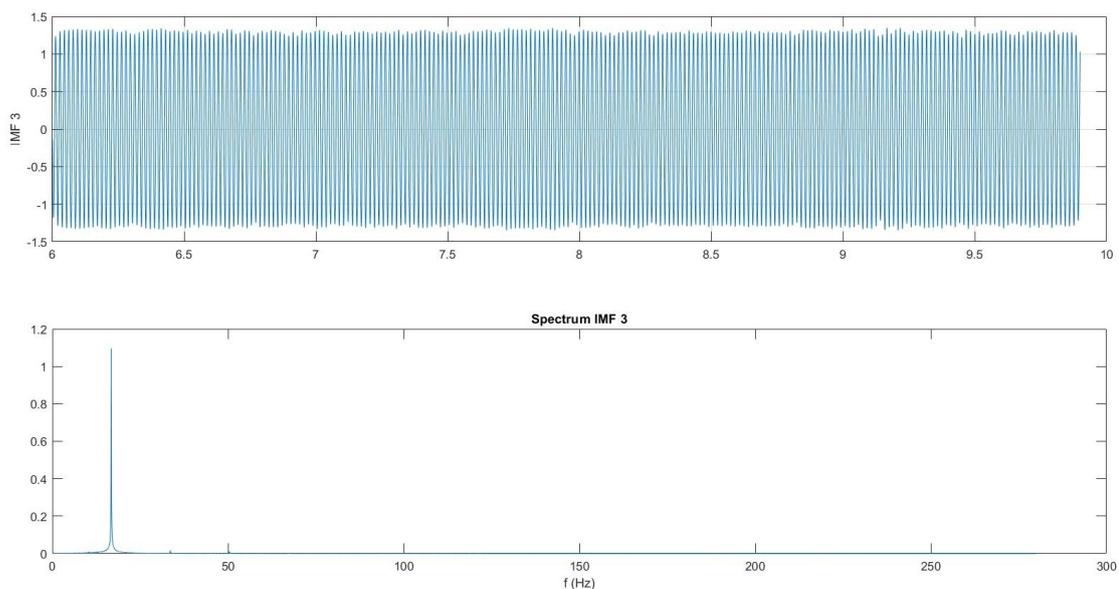


Figura 4.16: IMF 3 e respectivo espectro de frequência.

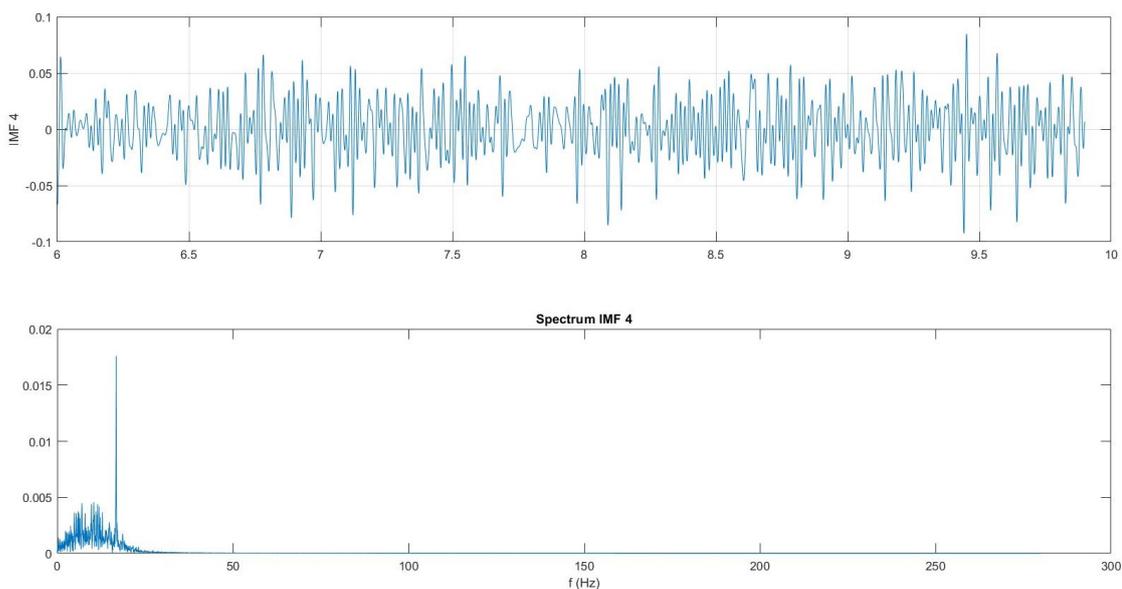


Figura 4.17: IMF 4 e respectivo espectro de frequência.

de velocidade. Baseando-se então nessa premissa, a IMF utilizada para a reconstrução do sinal de velocidade foi a IMF 3.

A figura 4.26 traz a representação gráfica do sinal de velocidade antes e depois da reconstrução.

Na imagem 4.27 tem-se o espectro de frequência do sinal de velocidade reconstruído.

Pode-se inferir então que o método proposto por Zhu *et al.* (2015) se mostra eficaz para a obtenção dos valores de velocidade via integração do sinal de aceleração, quando

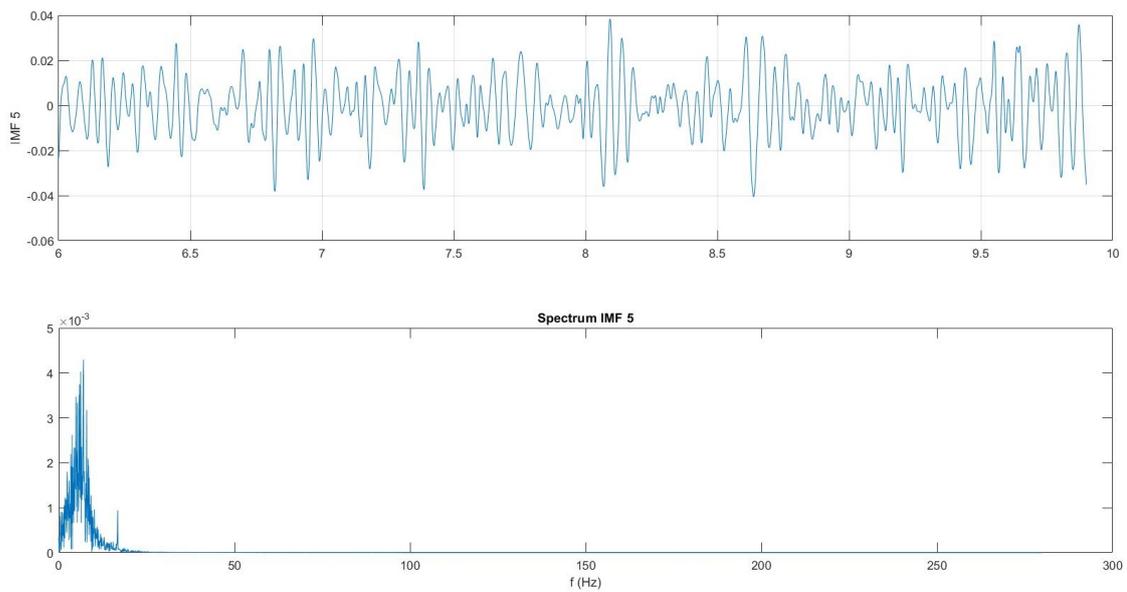


Figura 4.18: IMF 5 e respectivo espectro de frequência.

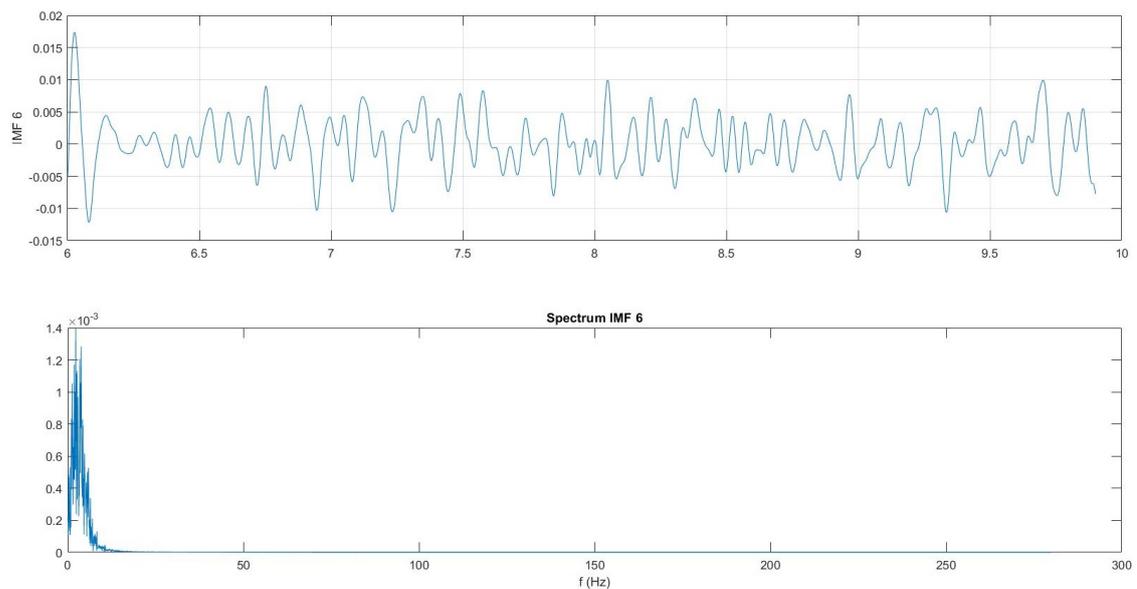


Figura 4.19: IMF 6 e respectivo espectro de frequência.

estes tem sua origem em máquinas rotativas.

Um outro ponto a se ressaltar é o fato de que as propriedades do espectro de frequência foram mantidas, podendo se afirmar que o diagnóstico de desbalanceamento é correto.

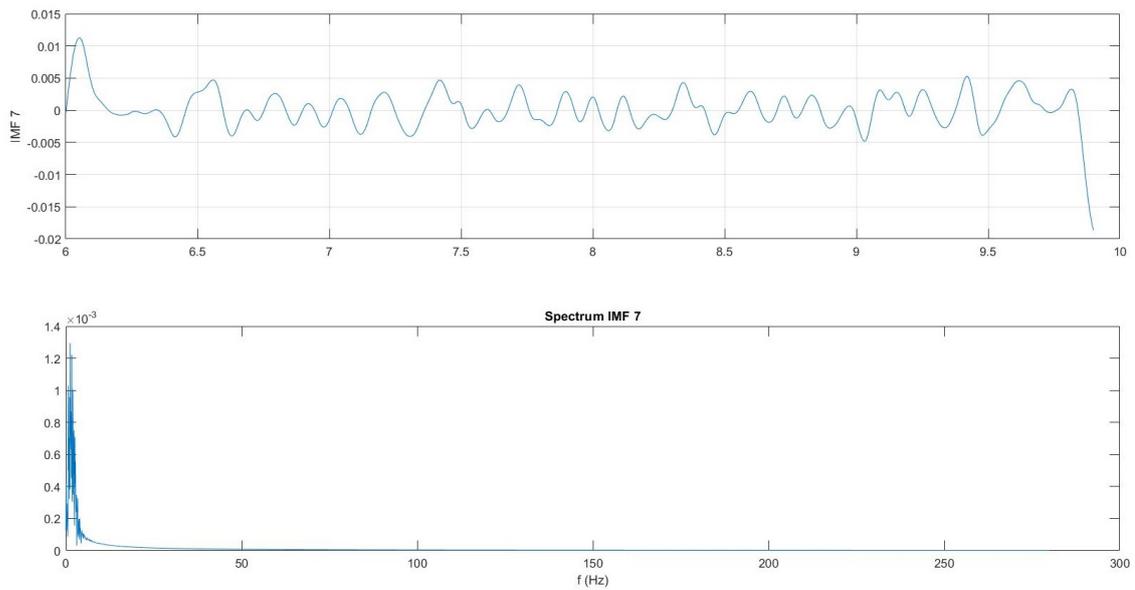


Figura 4.20: IMF 7 e respectivo espectro de frequência.

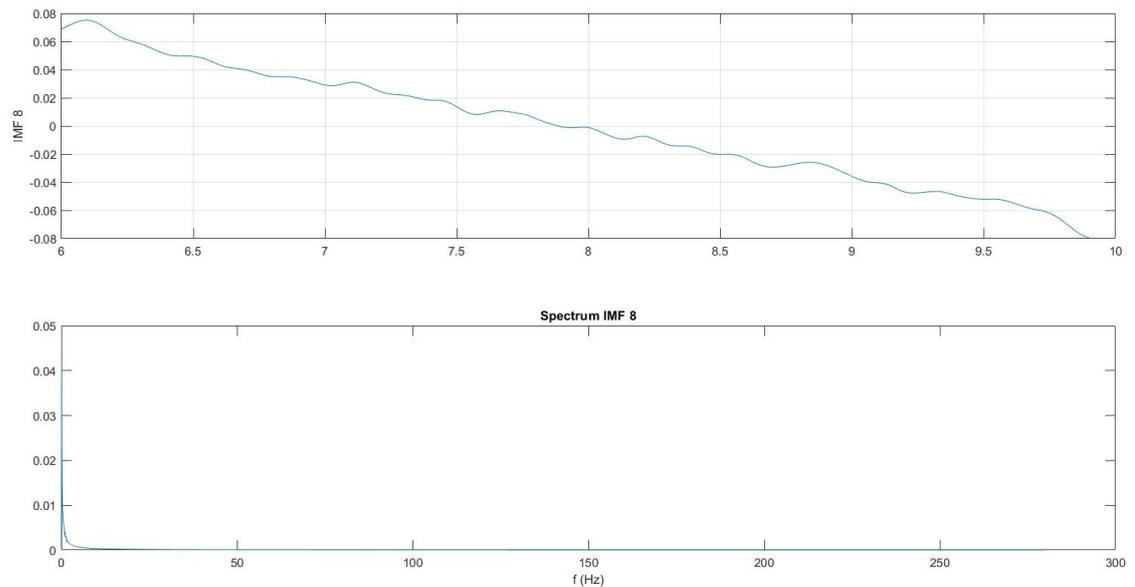


Figura 4.21: IMF 8 e respectivo espectro de frequência.

4.2 Manipulador Aéreo: Montagem e Testes

Após a verificação e validação do sensor utilizado no protótipo, partiu-se então para a montagem do manipulador aéreo.

Essa seção tem por finalidade primeiramente relatar a montagem do manipulador, detalhando assim suas partes eletrônicas e mecânicas, bem com os desafios enfrentados nessa tarefa. Em seguida, é apresentada uma discussão sobre os três experimentos realizados para a validação do protótipo confeccionado.

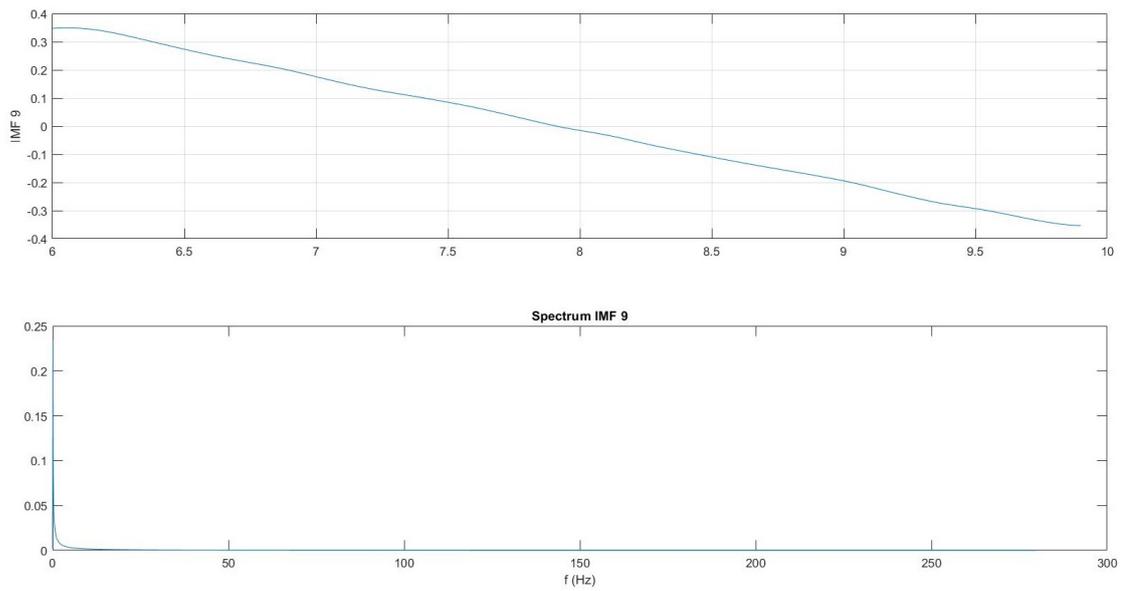


Figura 4.22: IMF 9 e respectivo espectro de frequência.

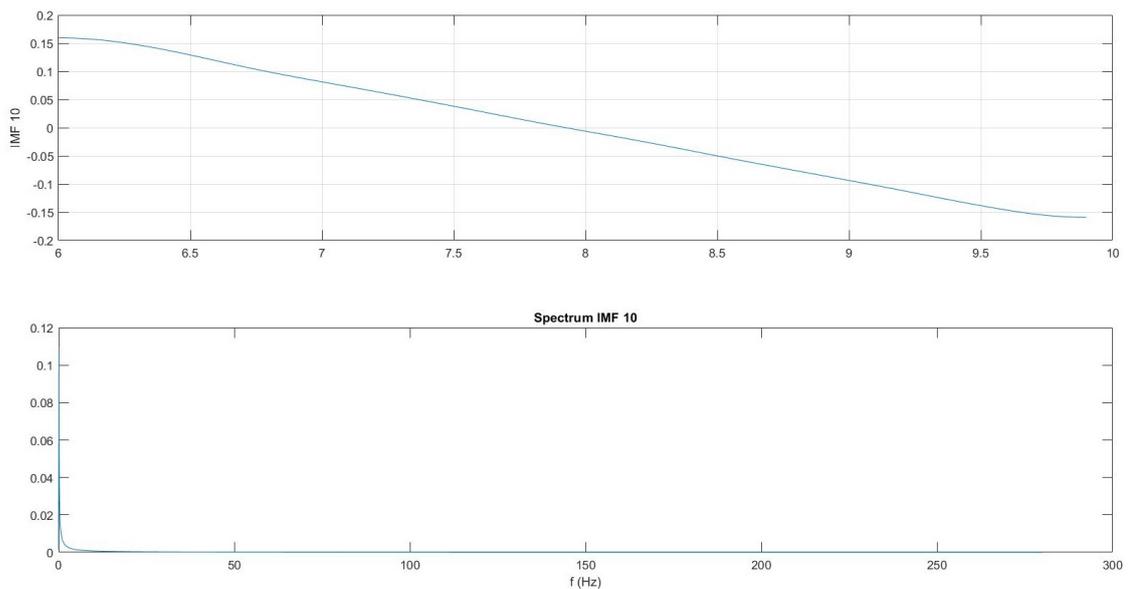


Figura 4.23: IMF 10 e respectivo espectro de frequência.

O primeiro experimento consistiu em acoplar o manipulador aéreo no drone Inspire 1 da DJI, visando avaliar o desempenho e estabilidade do sistema durante o voo. O segundo experimento é semelhante ao primeiro, diferenciando-se pelo fato que se retirou o medidor de vibração do manipulador, visando averiguar o comportamento do sistema na etapa de desacoplamento (na qual o medidor de vibração se fixa na estrutura ou máquina a se aferir a vibração).

No terceiro experimento, foi testada a situação da propagação da vibração em relação

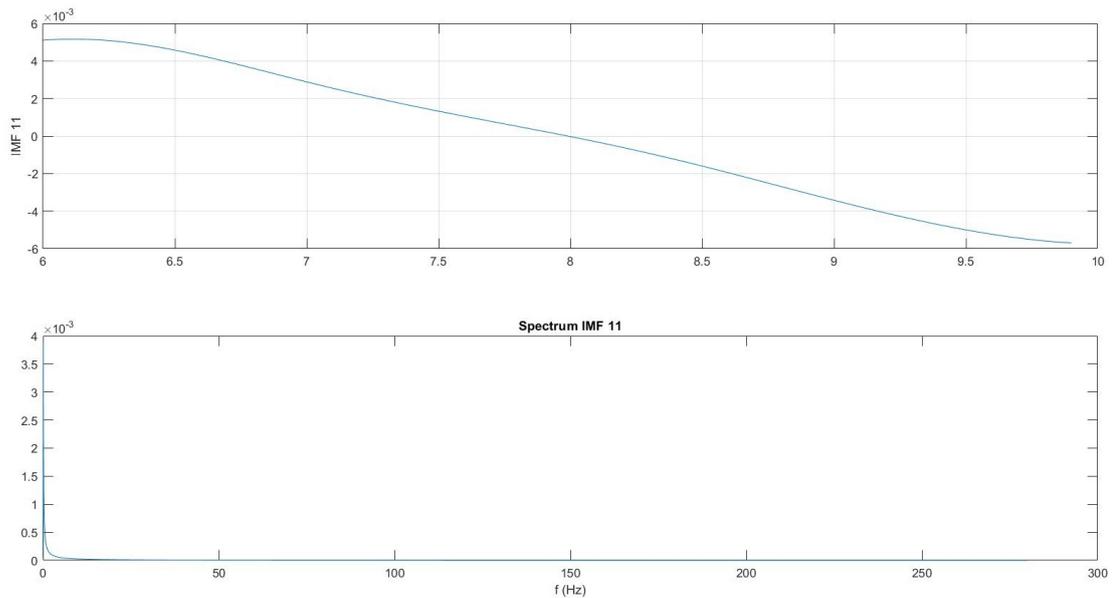


Figura 4.24: IMF 11 e respectivo espectro de frequência.

Correlação Cruzada	Distância Euclidiana
1.0e+07 *	1.0e+03 *
0.0050	7.7992
0.0059	7.7992
5.2252	1.2617
0.0079	7.7959
0.0044	7.7992
0.0036	7.8004
0.0085	7.8004
0.0139	7.7883
0.2933	7.4492
0.0680	7.7247
0.0017	7.8004

Figura 4.25: Resultado do cálculo da correlação cruzada distância euclidiana.

ao medidor para o sistema drone-manipulador. Na versão implementada nesse trabalho (considerada um mínimo produto viável da ideia original), além do cabo do guincho, fios elétricos que alimentam o eletroímã e o sensor saem da bateria (contrapeso) e percorrem um caminho até medidor (mesmo estando este desacoplado). Nessa situação, considerou-se a chance de tais fios (além do cabo do guincho) transmitirem as vibrações do sistema drone-manipulador para o sensor, interferindo assim na sua medição. Para investigar essa importante situação, elaborou-se um experimento onde se inseriu uma fonte de vibração conhecida no manipulador, e aferir-se a vibração de uma outra fonte, nos diferentes estágios do protótipo.

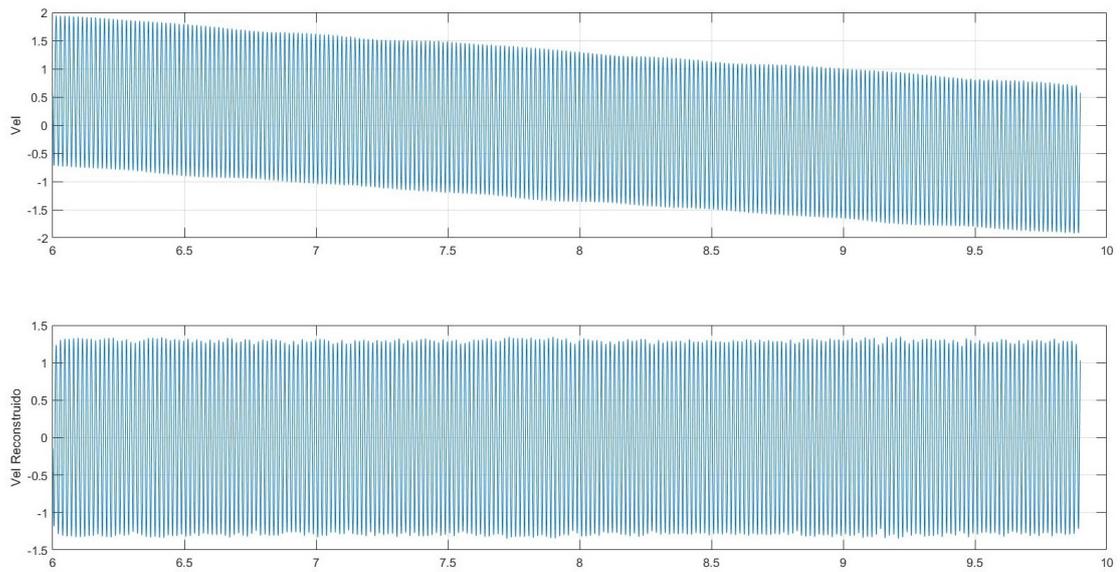


Figura 4.26: Velocidade antes e depois da reconstrução.

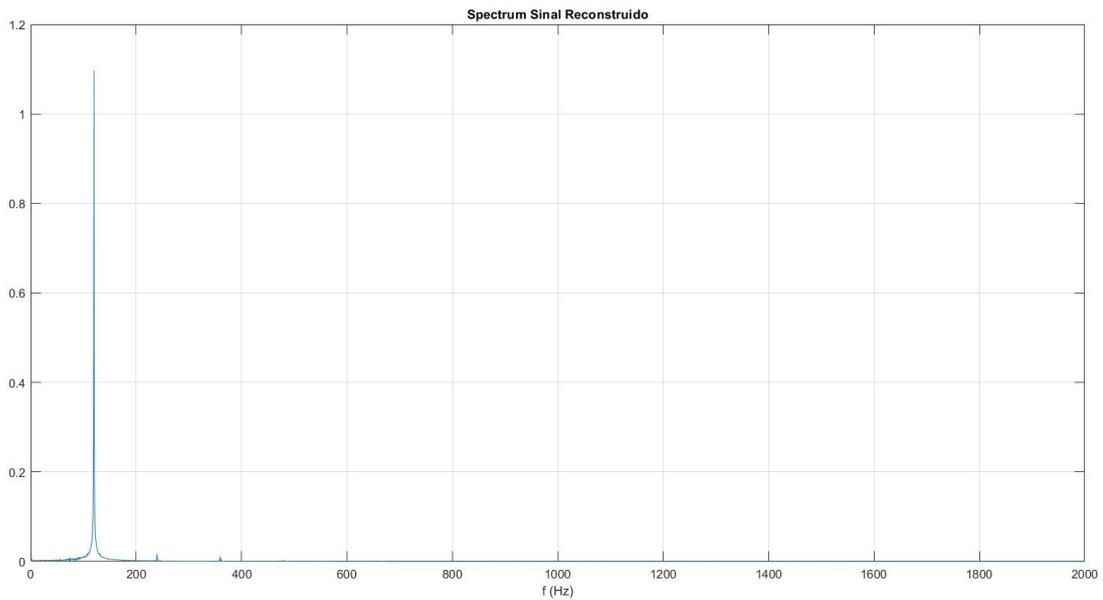


Figura 4.27: Espectro de frequência do sinal reconstruído.

4.2.1 Montagem

Essa seção visa fornecer breves detalhes da montagem do protótipo proposto. Após finalizar o projeto mecânico, foram impressas as peças, como demonstrado na figura 4.28.

Nas figuras 4.29 e 4.30, pode ser observado maiores detalhes sobre o projeto e funcionamento do guincho. Nessas imagens o carretel aparece com o cabo enrolado, e o motor DC se encontra encaixado em seu devido lugar. Ressalta-se que ainda que na imagem 4.29 uma das peças apresenta um orifício, que teve de ser aberto para passagens de fios



Figura 4.28: Peças impressas e tubos de fibra de carbono.

oriundos do microcontrolador.



Figura 4.29: Guincho aberto.

Na imagem 4.31 são apresentadas as placas eletrônicas utilizadas, a bateria e o motor DC. No momento da montagem, se optou pela utilização da ponte H L298 tanto para

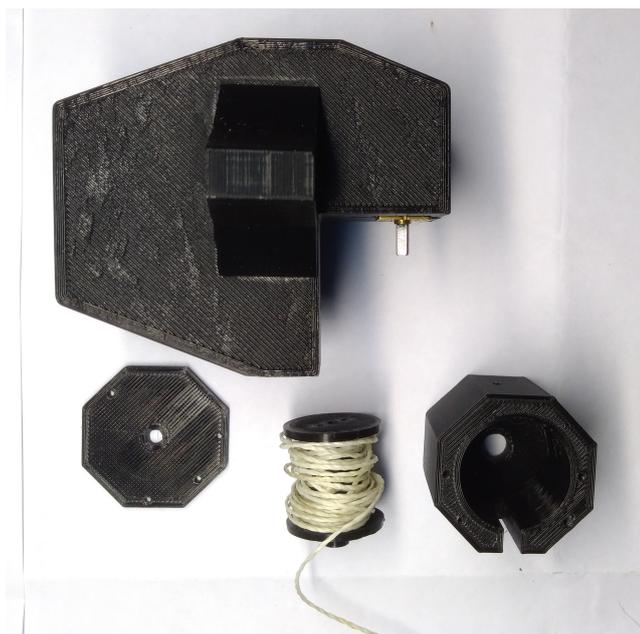


Figura 4.30: Guincho fechado.

controle do motor, quanto para acionamento do eletroímã. Tal escolha foi baseada na premissa de que ambos os itens têm o mesmo princípio básico de funcionamento, e a ponte por ser dupla (podendo controlar até dois motores), economizaria espaço e peso, através da otimização do projeto eletrônico.

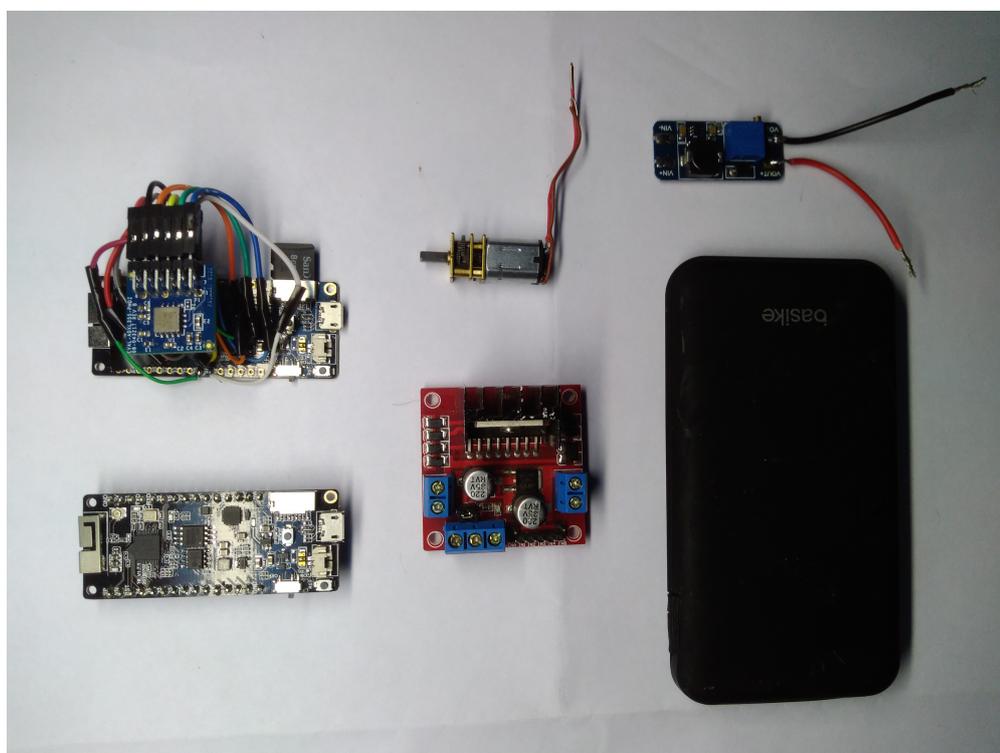


Figura 4.31: Motor, bateria e placas eletrônicas.

A figura 4.32 demonstra o peso total que o protótipo atingiu, sendo este de 628 g.



Figura 4.32: Peso do protótipo confeccionado.

Na figura 4.33 demonstra o drone Inspire 1 em preparação para o acoplamento do protótipo desenvolvido.



Figura 4.33: Drone Inspire antes do encaixe do braço.

As figuras 4.34, 4.35 e 4.36 trazem detalhes em diferentes ângulos do drone acoplado ao dispositivo desenvolvido. Vale ressaltar que por se tratar de um protótipo, o reforço de pontos de solda nos fios com fita isolante se mostrou necessário.



Figura 4.34: Drone com o protótipo acoplado.

A imagem 4.37 mostra o local onde se prendeu o protótipo. Foram necessárias a confecção de peças auxiliares, uma vez que a utilização do gimbal do Inspire como base se mostrou mais segura.

Já na figura 4.38, tem-se o manipulador aéreo pronto para o primeiro teste de voo.

4.2.2 Teste de voo com o instrumento

O objetivo desse teste consiste em avaliar o comportamento do drone durante um voo com a versão completa do protótipo projetado, estando essa presa em sua parte inferior, constituindo assim o manipulador aéreo. Essa avaliação tem por base a observação de parâmetros como estabilidade do sistema, bem como validar as informações do fabricante sobre a carga suportada pelo Inspire 1.

Ressalta-se que devido a questões de segurança do laboratório do ITV, o drone citado não pode ser utilizado dentro deste local, uma vez que o Inspire foi projetado para tarefas ditas *outdoor*. Tal premissa dificultou seriamente a execução dos testes do projeto.

Com o protótipo montado então, realizou-se um voo de pequena altitude (cerca de 1 metro do solo) com manobras suaves. Na figura 4.39 tem-se imagens desse voo teste.

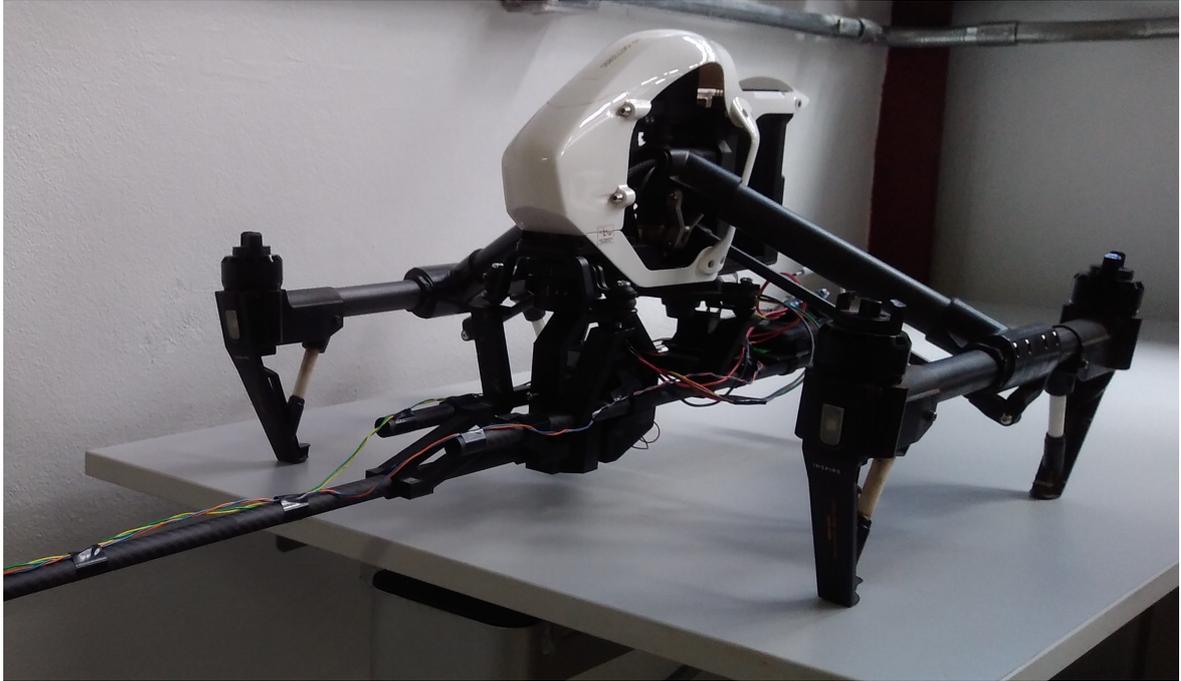


Figura 4.35: Manipulador montado detalhando o guincho.



Figura 4.36: Manipulador montado vista lateral.

Nela observa-se o drone levantando voo, se esquivando pelas laterais e pousando.

Durante esse teste foram coletados dados fornecidos pelo software interno do drone, de parâmetros como: velocidades relacionadas aos movimentos realizados, distancia percorrida e trajetória. Na imagem 4.40 tem-se algumas informações de voo, fornecidas ao se processar tais dados. Nela pode-se ver a trajetória percorrida (via Google Maps), tempo de voo, etc.

A imagem 4.41 revela os vários movimentos feitos pelo drone, através das alterações



Figura 4.37: Detalhe do encaixe do manipulador no Inspire.



Figura 4.38: Manipulador Aéreo pronto para teste de voo.

das velocidades nos eixos x , y e z . Pode ser destacado um giro em torno do seu próprio eixo, realizado a partir de 190 segundos (y e x).

Por outro lado, na figura 4.42 tem-se os dados do giroscópio (movimento nos ângulos roll e pitch) e o gráfico da distância percorrida.



Figura 4.39: Imagens do voo realizado com o instrumento.

O grande problema enfrentado nesse teste consistiu no fato da parte de suporte do contrapeso (bateria) do dispositivo projetado ficar no raio de disparo do sensor ultrassônico do Inspire, fazendo com que o sistema de controle do drone emitisse vários alertas na sua interface de controle, além do mesmo não entrar totalmente em sua forma de voo (arqueando os rotores).



Figura 4.40: Dados do voo realizado com o instrumento.

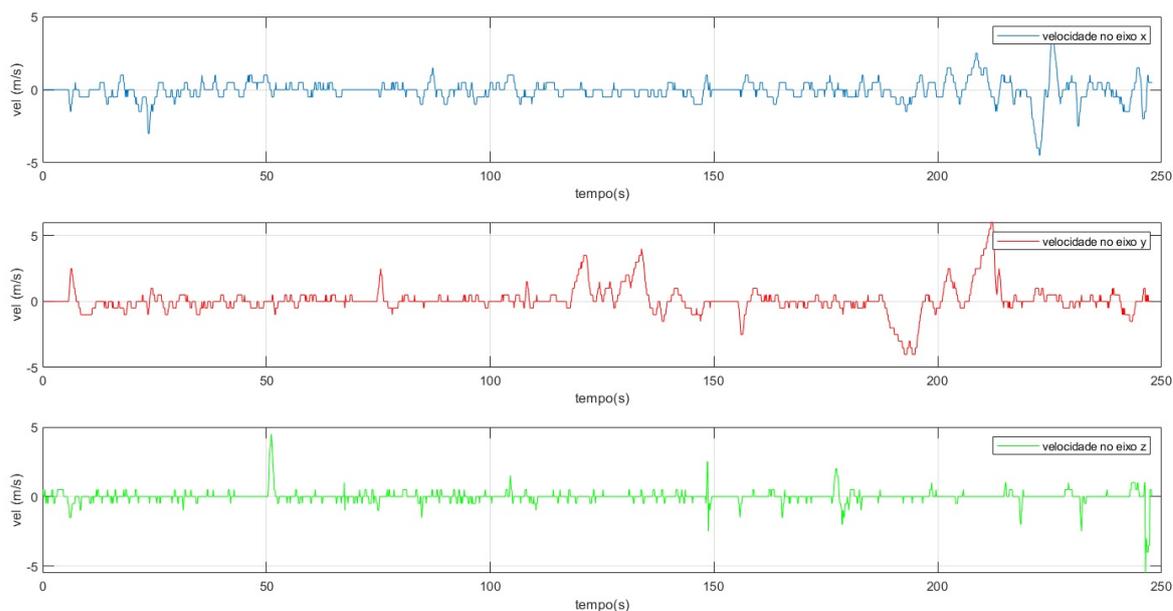


Figura 4.41: Velocidades do voo realizado com o instrumento.

Por fim, através desse teste pode se concluir que o referido dispositivo projetado atendeu as expectativas, uma vez que este se mostrou leve e mecanicamente rígido, além de possuir uma distribuição correta de peso (equilíbrio entre os pesos do medidor e bateria). Outro ponto importante é que o manipulador não causou nenhum distúrbio na malha de controle do Inspire, uma vez que não foi detectado durante o voo nenhum momento em que este aparentasse ter experimentado qualquer instabilidade.

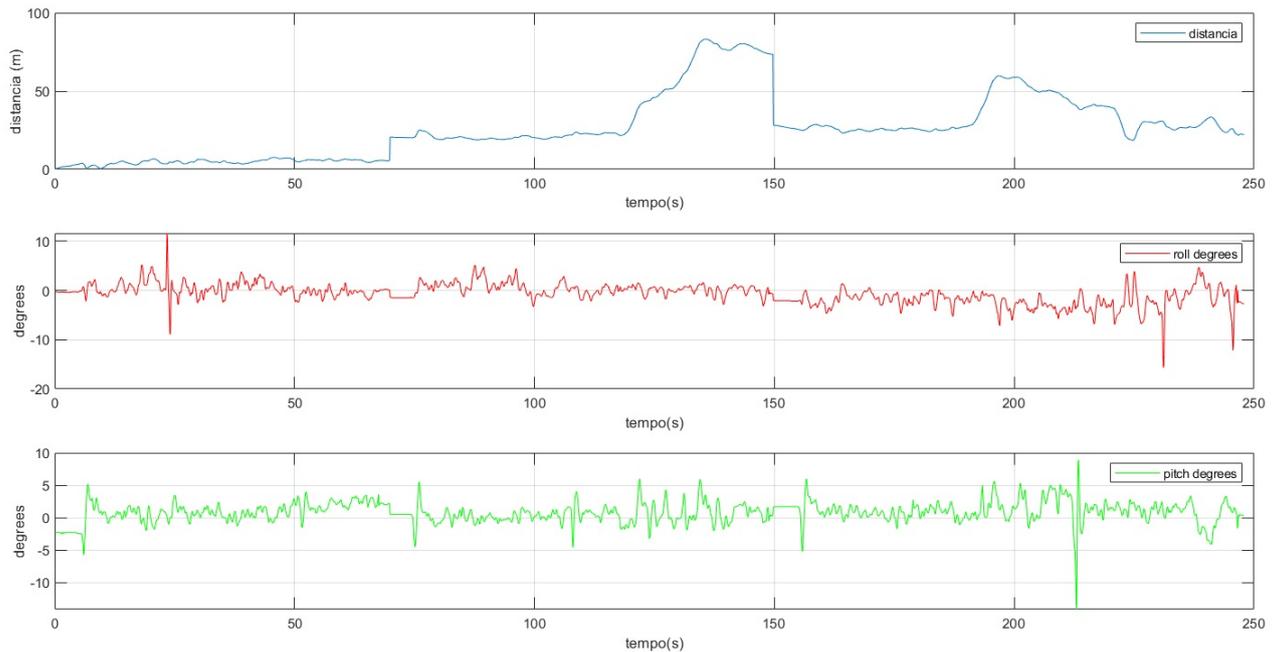


Figura 4.42: Distância percorrida, e ângulos de "roll" e "pitch", durante o voo realizado com o instrumento.

4.2.3 Teste de voo sem o instrumento

O segundo experimento idealizado é basicamente semelhante ao primeiro teste de voo, diferenciando-se pelo fato de que dessa vez a parte do dispositivo denominada de medidor, foi retirada do protótipo, visando simular os efeitos do desacoplamento temporário para medição da vibração.

Na figura 4.43 pode ser observado um momento específico do voo realizado sem o instrumento medidor, no qual o drone efetua um giro em torno do seu próprio eixo.

Na figura 4.44 têm-se os dados do voo, mostrando a trajetória realizada, bem como o tempo de duração do mesmo (cerca de 80 segundos).

Durante o teste, novamente foram coletados os dados de desempenho do drone, através do seu software interno. Na imagem 4.45, pode ser observada a velocidade nos três eixos. Destacam-se dois movimentos realizados, o primeiro consiste no movimento de ré, representado pela curva com descendente no eixo y, por volta de 50 segundos. O segundo foi um movimento abrupto para a esquerda, visto este no gráfico do eixo x, no tempo aproximado de 65 segundos. No gráfico da figura 4.46, pode-se confirmar a realização dos movimentos anteriormente citados, ao se observar os dados captados pelo giroscópio (responsáveis por detectar inclinações).

Ao final da realização do experimento, concluiu-se que o drone não demonstrou nenhuma dificuldade para executar manobras e levantar voo, e aparentemente a ausência do medidor no ponto do manipulador não causou nenhum grande distúrbio em sua malha



Figura 4.43: Imagens do voo realizado com a retirada do instrumento medidor.



Figura 4.44: Dados do voo realizado sem o instrumento.

de controle.

Através dois dos testes de voos realizados, pode-se inferir que a manobra de desacoplamento e posterior reacoplamento não seria sentida de forma danosa pelo sistema de controle do drone Inspire 1, tornando assim viável a execução de tarefas com o dispositivo projetado.

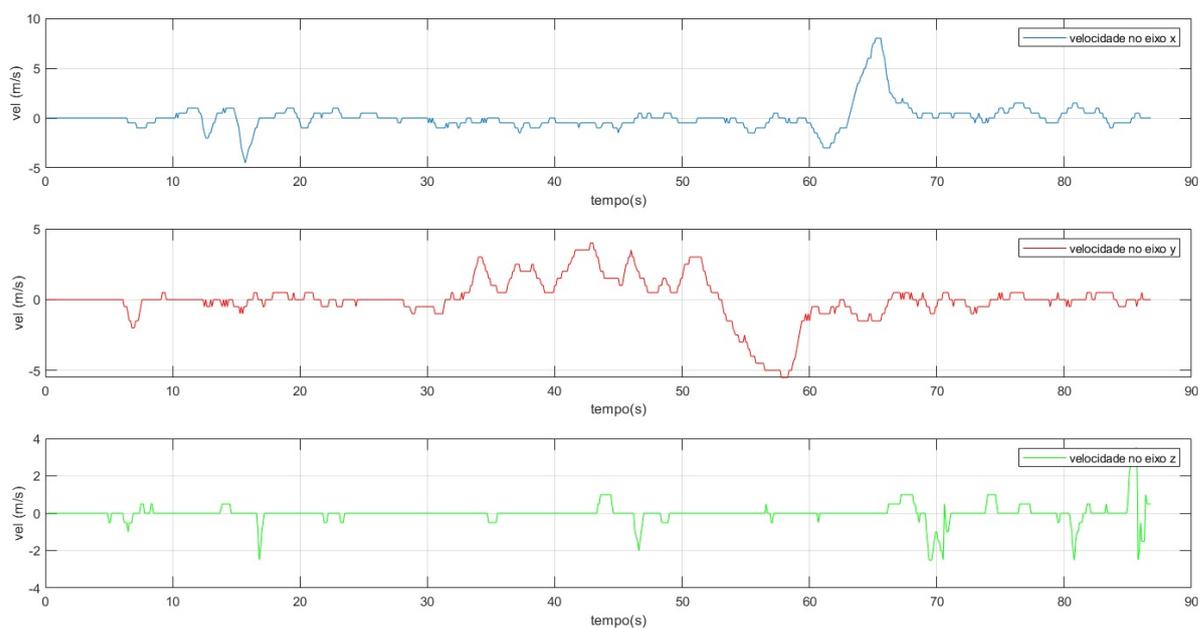


Figura 4.45: Registro das velocidades do voo realizado sem o instrumento.

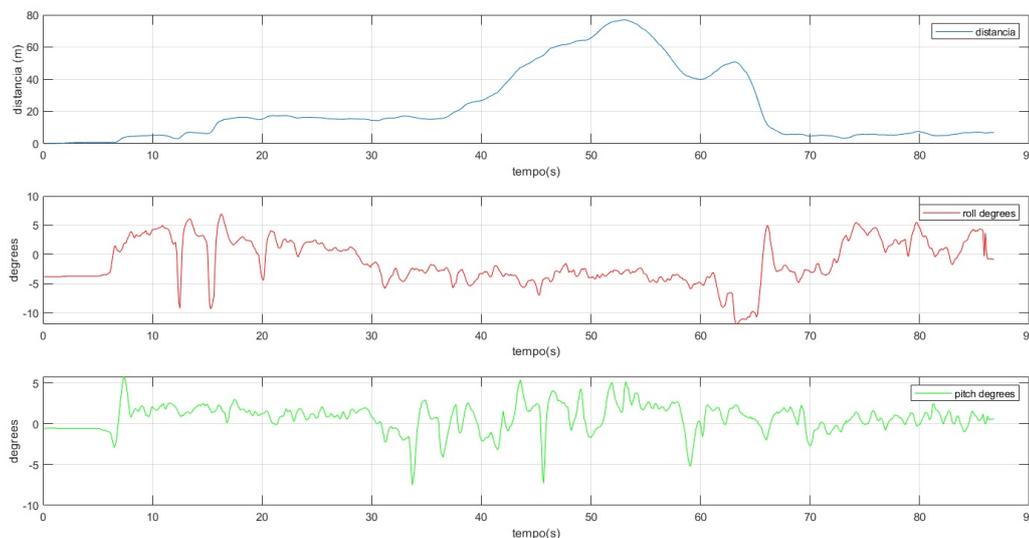


Figura 4.46: Distância percorrida, e ângulos de "roll" e "pitch", durante o voo realizado com o instrumento.

4.2.4 Teste de transmissibilidade de vibração

A transmissibilidade da vibração consiste em uma questão de extrema importância para se investigar, uma vez que o trabalho proposto visa a medição de vibrações em estruturas e máquinas em altura, através da utilização de um robô móvel. Como mencionado anteriormente, para medir determinada vibração, o drone deve desacoplar o medidor de vibração temporariamente, ficando este preso na máquina ou estrutura através do acio-

namento de um eletroímã. Nessa etapa, o sensor é ligado para coletar os dados. Após cessão da coleta, o guincho é acionado para o reacoplamento do medidor ao sistema drone-manipulador. Durante o desacoplamento, os cabos do guincho e de energia permanecem como única conexão entre o instrumento e o manipulador, podendo estes transmitirem ruído vibracional.

Para tanto, foi elaborado um experimento de bancada visando analisar a influência da vibração do drone na vibração a ser medida. Inicialmente pretendia-se usar o próprio Inspire como fonte de vibração, porém mais tarde se descobriu que este não funciona sem as hélices (condição a ser seguida para poder ligar o mesmo dentro do laboratório, dada as restrições de segurança do ITV). Como alternativa, procurou-se então outra fonte de vibração controlada, visando substituir as vibrações intrínsecas do drone durante um voo.

O experimento criado consistiu primeiramente em coletar as vibrações captadas pelo medidor (ainda acoplado ao manipulador) durante um voo simples no qual o drone permaneceu estático por um breve período de tempo. Ressalta-se que por medidas de segurança, não se realizou a manobra de desacoplamento do medidor (onde este ficaria fixo na superfície de determinada máquina) durante voos reais. A imagem 4.47 traz uma representação da posição dos eixos do sensor ADXL355 no medidor de vibração.

Na figura 4.48 tem-se as acelerações coletadas nos três eixos durante o voo teste mencionado. Pode ser observado no gráfico que durante o intervalo de tempo entre 3 e 4 segundos, o drone realizou uma manobra para pousar.

Após coletar tais dados acima demonstrados, separou-se dos mesmos um determinado intervalo de tempo no qual se considerou que o drone permaneceu parado no ar (de 1 a 3 segundos). Em seguida, foram gerados os gráficos das FFTs, visando averiguar o espectro de frequência característico de tal robô.

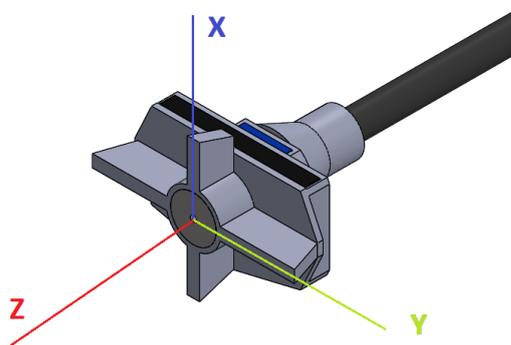


Figura 4.47: Representação gráfica dos eixos do sensor no medidor de vibração.

Na imagem 4.49 podem ser vistos os espectros de frequência nos três eixos, coletados durante o referido voo. É notado também que a frequência fundamental do drone é

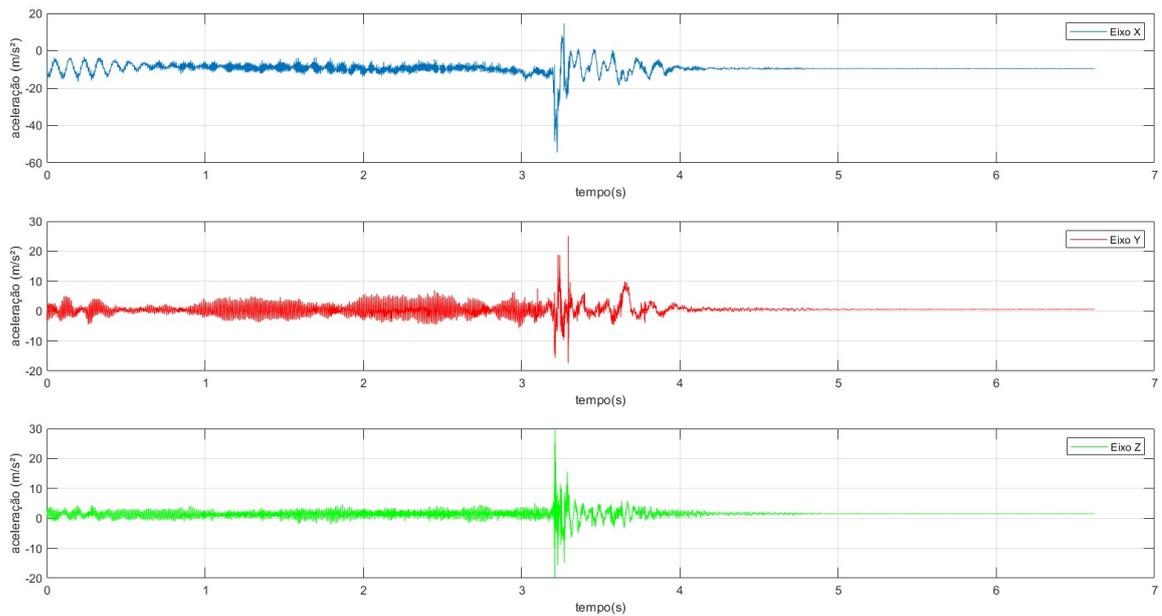


Figura 4.48: Acelerações captadas pelo instrumento do manipulador, aferidas no Inspire 1 durante um voo teste.

próxima a 90 Hz, e seu segundo harmônico (próximo a 180 Hz) também está presente em tal gráfico. Outro ponto importante a se notar é a baixa amplitude de tais frequências.

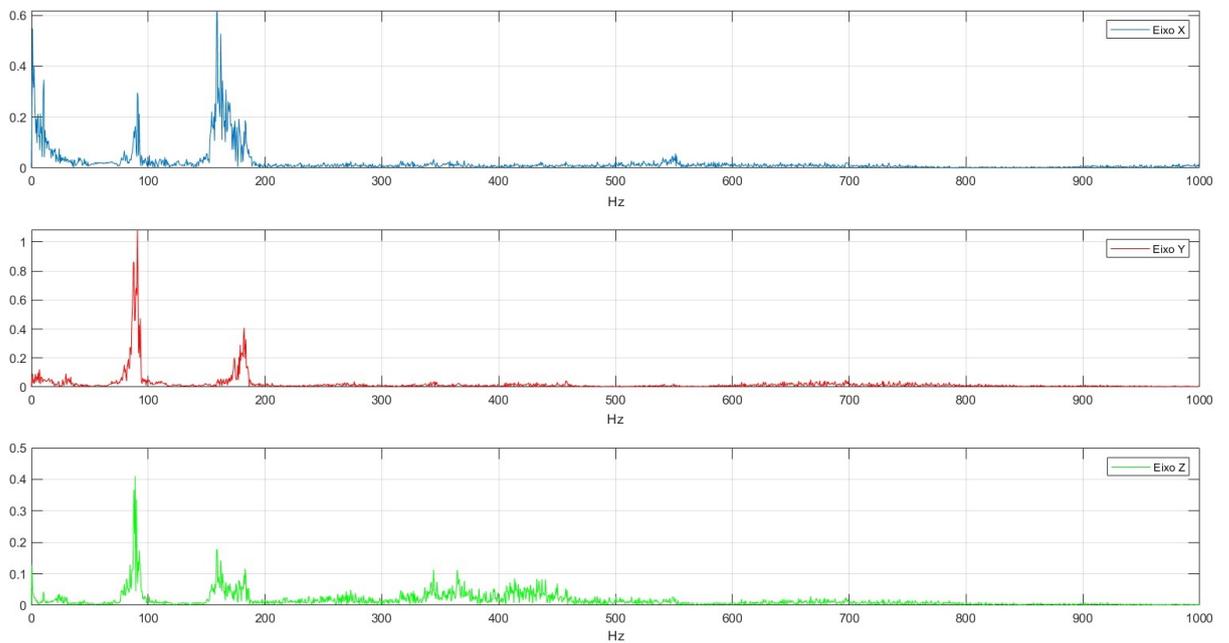


Figura 4.49: Espectro de frequências captadas pelo instrumento do manipulador, coletadas no Inspire 1 durante um voo teste.

De posse desses dados, montou-se então o experimento de bancada, visando analisar a

transmissibilidade da vibração pelo manipulador em seus dois estágios de funcionamento. Na figura 4.50 pode ser visto um desenho representativo do experimento proposto. Como mostrado na imagem, a ideia central consiste em inserir uma vibração conhecida no dispositivo projetado (denominada de fonte de ruído) com o intuito de constatar a influência desta na medição da fonte de vibração alvo, avaliando assim a eficácia do desacoplamento temporário do sensor. Na versão confeccionada, cabos de alimentação também estão presentes no estado de desacoplamento, aumentando assim as chances de transmissão de vibrações do manipulador para o sensor. Para investigar tal fato, criou-se este experimento. Na figura 4.51 pode ser vista a foto real do experimento.

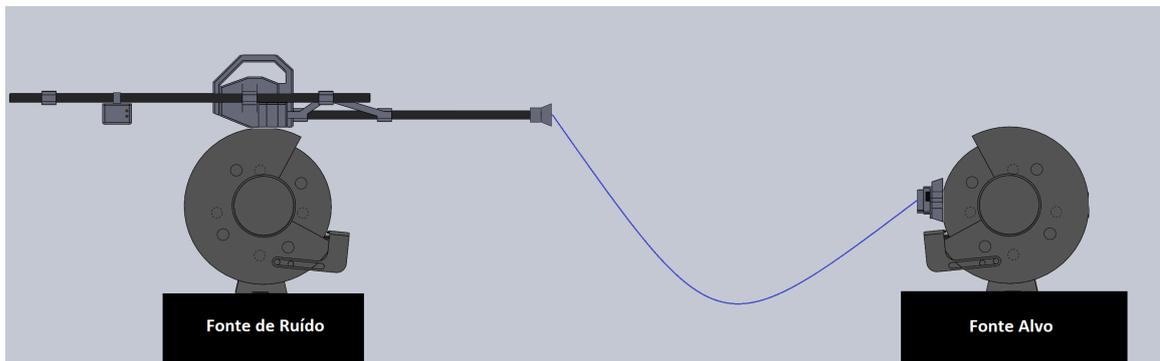


Figura 4.50: Desenho representativo sobre o teste de bancada elaborado.

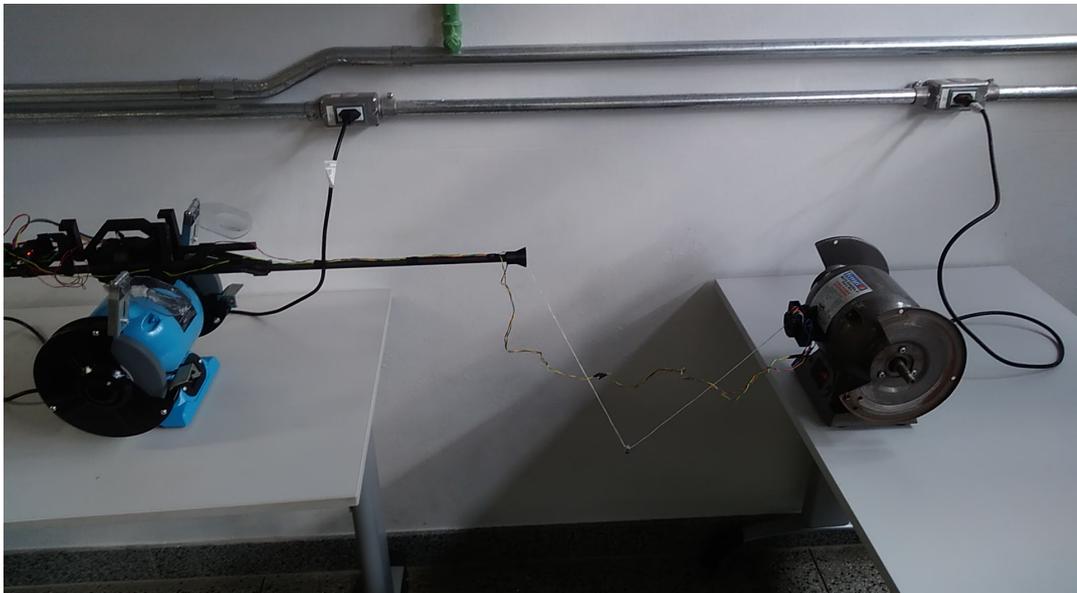


Figura 4.51: Foto do teste de de transmissibilidade de vibração.

Nesse ensaio, foi medida a vibração em diferentes configurações do instrumento medidor (desacoplado ou não do manipulador), bem como das fontes de vibração (desligadas ou não). A propósito, como fontes de vibração foram utilizados dois esmeris. O manipu-

lador foi bem afixado em cima do esmeril, de forma que mantivesse sua posição intacta durante toda a atividade. O experimento foi dividido nas seguintes etapas:

- 1^o - Fonte de ruído ligada, medidor acoplado ao manipulador;
- 2^o - Fonte de ruído ligada, medidor acoplado no alvo (desligado);
- 3^o - Fonte de ruído desligada, medidor acoplado no alvo (ligado);
- 4^o - Fonte de ruído ligada, medidor acoplado no alvo (ligado);

Na primeira etapa, manteve-se o acoplamento entre o instrumento medidor e o manipulador, acionando-se assim a fonte de ruído e coletando em sequência os dados. O objetivo dessa fase foi avaliar a amplitude das acelerações e frequências detectadas pelo medidor (para posterior comparação com a medição feita com o drone em voo). No gráfico da figura 4.52 tem-se as acelerações coletadas, e no gráfico da imagem 4.53 pode ser observado o espectro de frequências, onde a frequência fundamental é de 60 Hz.

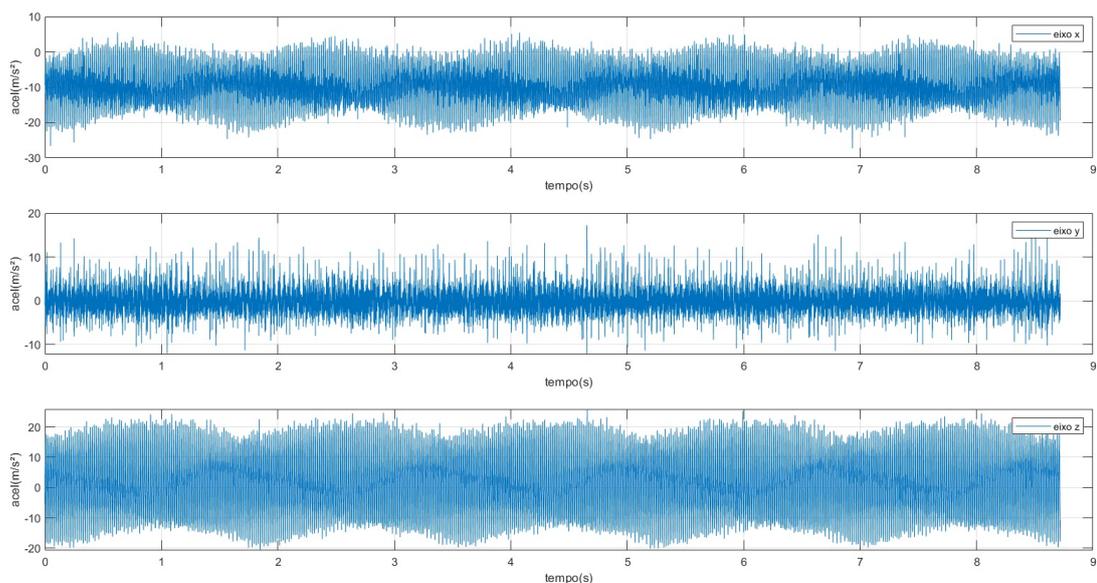


Figura 4.52: Acelerações: Fonte de ruído ligada, medidor acoplado ao manipulador.

Ao se comparar os gráficos das acelerações obtidas no voo do drone com a 1^o etapa do experimento, é claramente notado que em relação aos eixos x e y, a amplitude da fonte de ruído do experimento é cerca de duas vezes maior, enquanto no eixo z, o valor da amplitude é cerca de quatro vezes maior.

No caso da comparação entre os espectros de frequências, pode-se notar que a fonte de ruído utilizada no experimento de bancada produz uma amplitude bem maior do que a gerada pelo ruído do drone durante o voo. No eixo x, a amplitude tem um valor aproximado cerca de 10 vezes maior, enquanto no eixo y os valores atingidos são semelhantes. Em z, esse valor é 30 vezes maior.

Essa comparação é bem relevante, uma vez que prova que a fonte de ruído utilizada no teste tende a submeter o dispositivo a uma vibração muito maior que o de uma situação de medição real (utilizando drones).

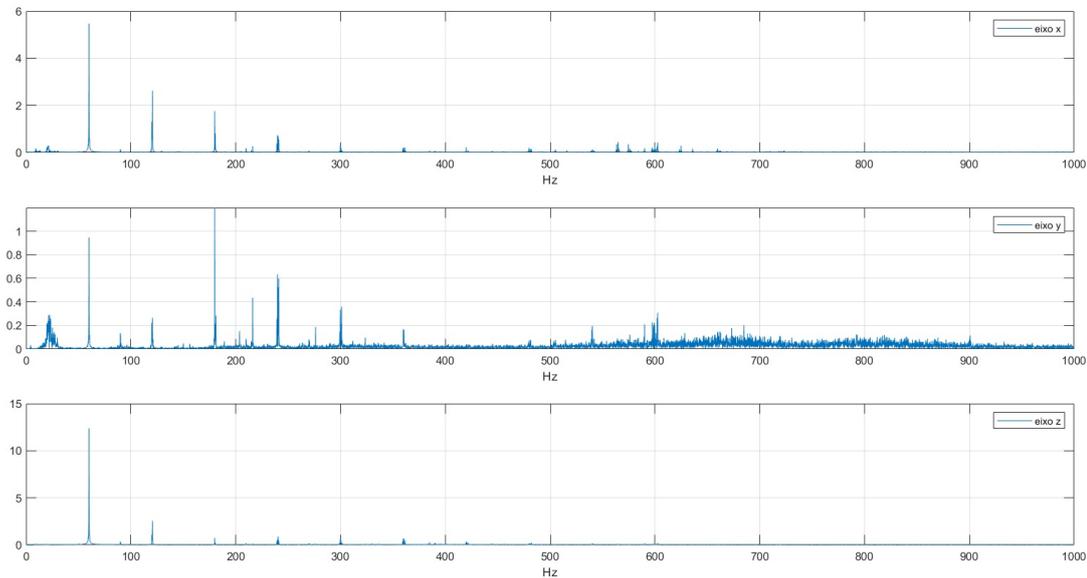


Figura 4.53: FFTs: Fonte de ruído ligada, medidor acoplado ao manipulador.

Na segunda etapa, idealizou-se simular o desacoplamento do instrumento em relação ao manipulador, estando esse fixo na máquina alvo, através do acionamento do eletroímã. O objetivo dessa etapa consistiu também em coletar o ruído propagado pelos cabos de energia e do guincho, para assim poder avaliar a sua amplitude e interferências nas medições do sensor.

Na terceira, o objetivo consistiu em coletar dados do alvo, para posterior comparação com as demais etapas do experimento. Também em tal fase, foi testado o comportamento do sensor ao medir vibração estando preso pelo eletroímã. Nessa última questão, não foi averiguado qualquer problema de interferência de natureza eletromagnética.

Na última etapa, pretendeu-se simular uma situação real de medição, uma vez que tanto a fonte de ruído, quanto a máquina alvo estiveram ligadas. Vale ressaltar que foram realizadas 3 coletas de dados em cada uma das etapas acima citadas.

No gráfico da imagem 4.54 tem-se as acelerações das etapas 2, 3 e 4 relativas ao eixo x. Em azul, pode ser notado a aceleração do alvo sem a presença do ruído externo (etapa 3), em vermelho o sinal do ruído externo (etapa 2) e em verde, tem-se a medição da vibração do alvo com a influência do ruído propagado pelos cabos (etapa 4). Em tal gráfico, pode ser observado que as formas de onda das etapas 3 e 4 são visualmente diferentes, fato que demonstra a possível influência (soma de sinais) causada pelo ruído. Porém, observando os valores das amplitudes, se deduz que essa possível perturbação é de baixa amplitude.

Na figura 4.55, através da observação das acelerações do eixo y, nota-se que a amplitude

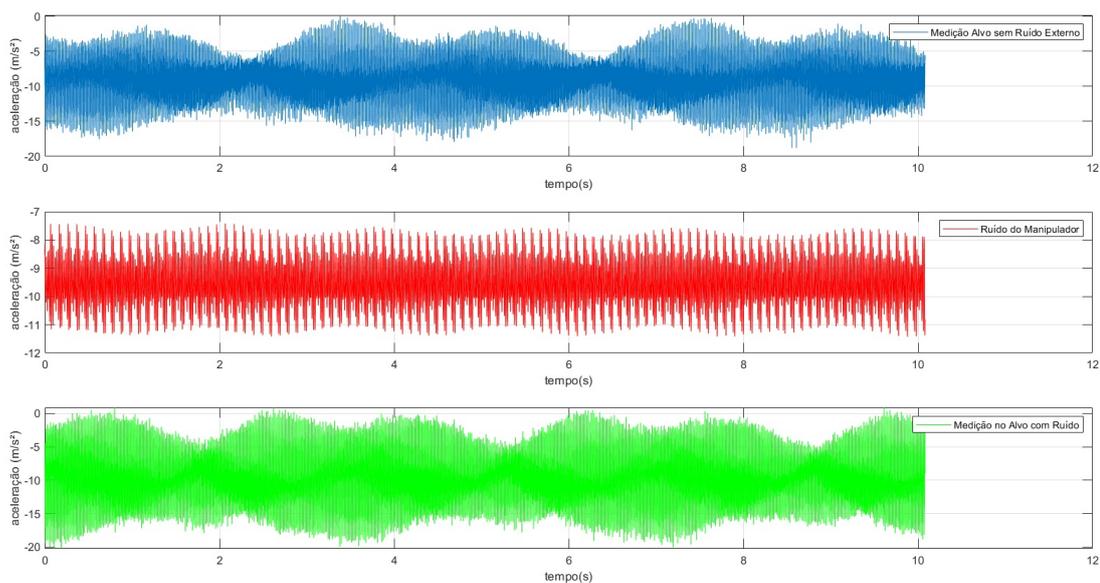


Figura 4.54: Teste transferência de vibração: acelerações eixo x.

do ruído nesse eixo é pequena se comparada aos demais sinais, e a distinção visual das formas não é possível (como no eixo x).

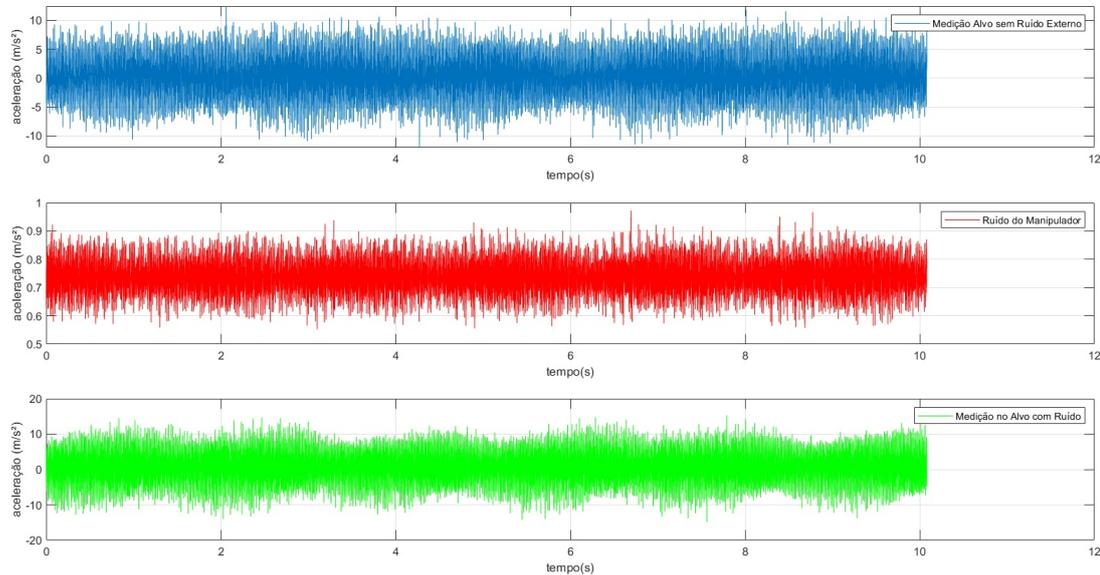


Figura 4.55: Teste transferência de vibração: acelerações eixo y.

As acelerações do eixo z, são mostradas na figura 4.56. Nesse gráfico, a amplitude do ruído é semelhante ao do eixo x, embora ainda muito menor se comparado às ondas dos sinais da máquina alvo da medição.

A observação do espectro de frequência dos sinais coletados se mostra necessária, uma vez que este possui informações mais detalhadas sobre a natureza comportamental dos

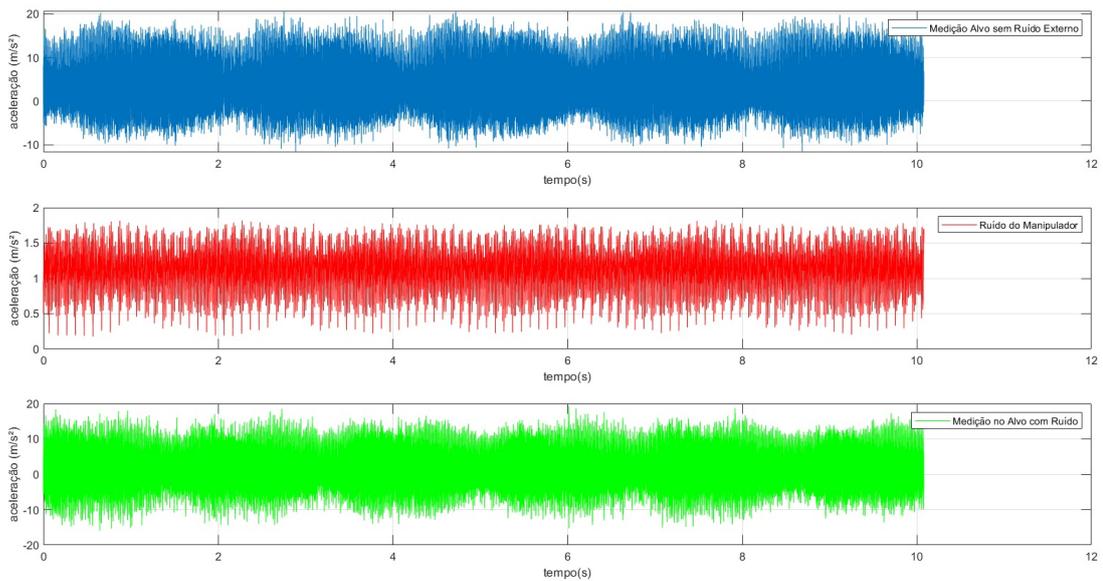


Figura 4.56: Teste transferência de vibração: acelerações eixo z.

mesmos.

A figura 4.57 mostra as FFTs dos sinais no eixo x. Constatou-se que a influência do ruído alterou de forma sutil os picos de frequências presentes no sinal da medição do alvo com ruído, aumentando em poucas unidades a sua amplitude.

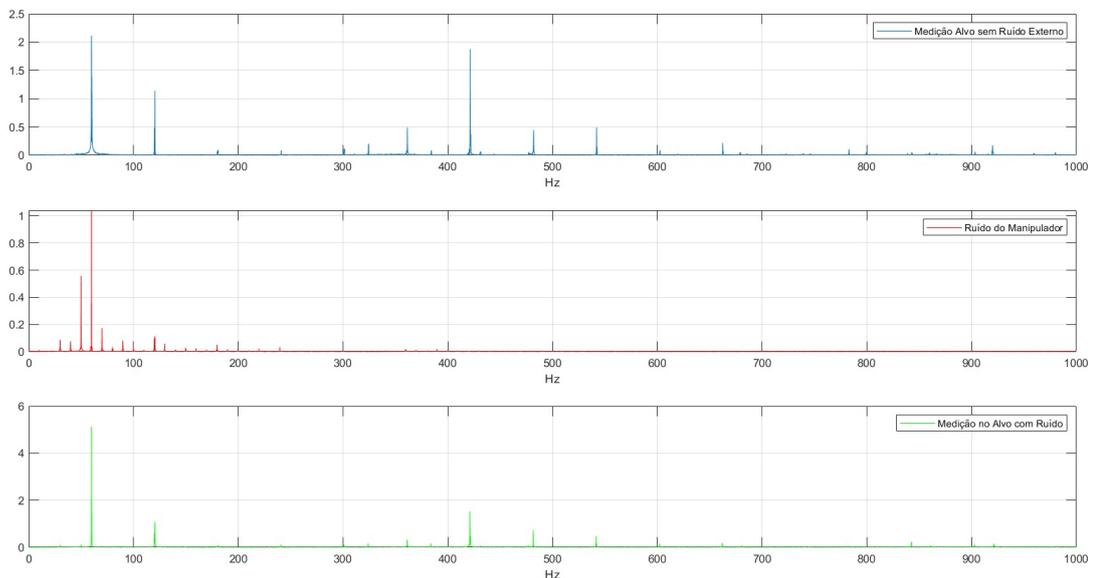


Figura 4.57: Teste transferência de vibração - FFTs eixo x.

Nas FFTs do eixo y, mostradas na imagem 4.58, as frequências do ruído se mostraram com uma amplitude muito baixa, porém ainda sim pressupõem-se que foram capazes de aumentar de forma bem discreta os valores dos picos presentes no sinal da etapa 4. Porém

vale ressaltar que ainda assim o sinal manteve suas características originais.

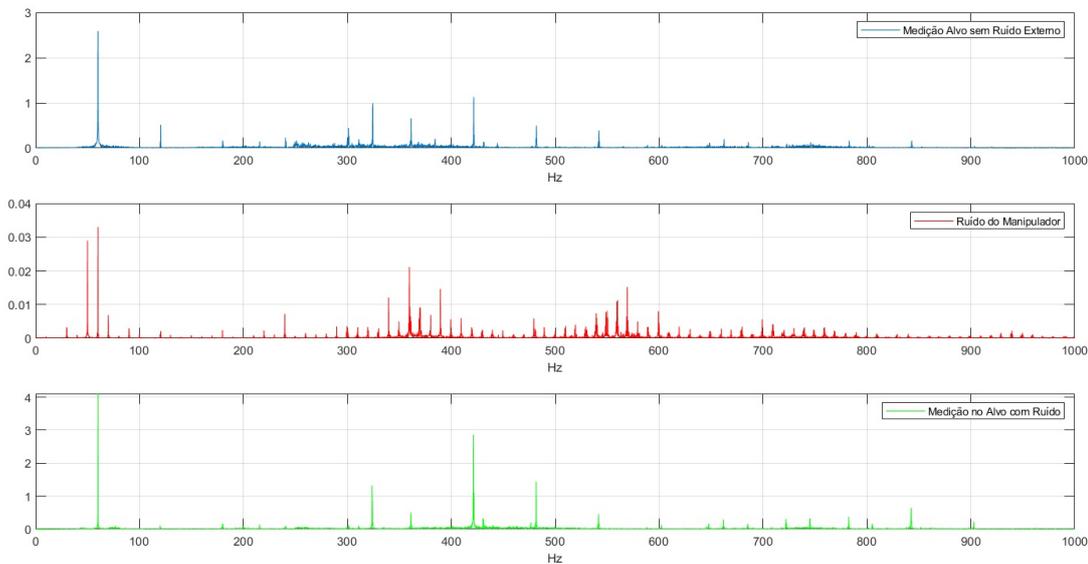


Figura 4.58: Teste transferência de vibração - FFTs eixo y.

Por fim, o espectro dos sinais no eixo z, mantiveram o mesmo padrão dos dois eixos anteriores. Apesar da baixa amplitude do sinal de ruído, este foi capaz de influenciar um discreto aumento nas frequências fundamentais que compõem o sinal da máquina alvo.

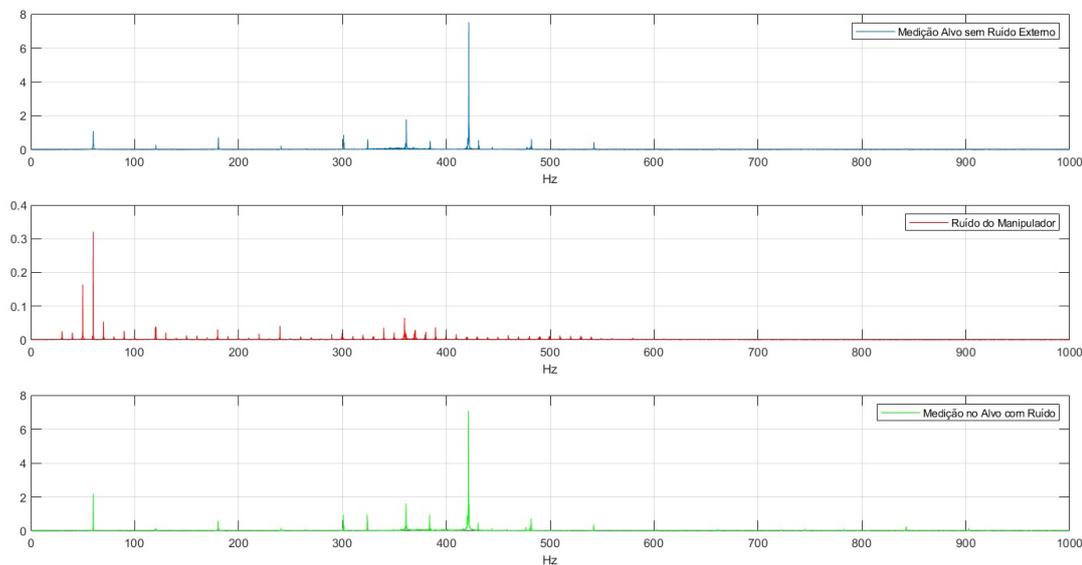


Figura 4.59: Teste transferência de vibração - FFTs eixo z.

A partir desse experimento, pode-se concluir que o protótipo proposto ao ser submetido a uma fonte de vibração ruidosa muito maior do que a real (ou seja, a do drone), ainda na sua forma simplificada, se mostrou eficaz na aferição de vibrações mecânicas, dada a

sua capacidade de se desacoplar temporariamente do manipulador, minimizando assim as influências de tais ruídos. É possível concluir também que apesar da leve influência do sinal ruído na aferição da máquina alvo, tais alterações não descaracterizam o sinal, permitindo assim o diagnóstico de possíveis problemas presentes em tais máquinas.

5. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado, inicialmente, um estudo sobre manipuladores aéreos e suas possibilidades de aplicações na substituição da mão de obra humana em atividades que envolvam altura. Em específico, foi proposto e projetado um dispositivo capaz de ser acoplado a diversos tipos de drones, visando habilitá-los para aferirem vibrações de estruturas e máquinas em altura. O manipulador aéreo confeccionado possui características específicas que o tornam único para essa função, sendo cada uma dessas características testadas e validadas através dos experimentos realizados. A principal contribuição desse trabalho consiste em ser um dos primeiros manipuladores aéreos capazes de captar vibrações mecânicas.

Os robôs móveis apresentados em Wevolver (2020), Trujillo, M.Á. *et al.* (2019) são capazes de inspecionar estruturas por meio de sensores presentes em seus braços manipuladores, porém estes não são indicados para medidas estáticas, como é o caso da vibração. Portanto, é reforçado o fato de que o presente projeto propõe uma solução inovadora e com larga aplicação. O drone confeccionado por Estrada *et al.* (2018), utiliza um guincho para resgate de outros robôs ou mover objetos, desde que o próprio drone esteja devidamente afixado em alguma superfície. O manipulador elaborado neste trabalho faz uso de um guincho de uma forma mais complexa, fazendo com que este seja responsável por dar suporte e recolher um instrumento medidor de vibração.

Este trabalho trouxe como contribuição uma patente de invenção depositada no INPI (BR 10 2021 014008 9) pela Vale (ITV), em parceria com a UFOP.

Como trabalhos futuros, diversas tarefas tem de ser feitas. Em relação ao projeto mecânico, inicialmente foi proposto a confecção de peças pequenas e de fácil impressão (3D), porém no decorrer do projeto observou-se que tal ideia criou certas dificuldades nos requisitos tanto temporais, quanto estruturais. Sugere-se a otimização do projeto mecânico, visando blocos de peças maiores. Outro ponto importante sobre o projeto mecânico, consiste em focar o suporte principal nos dois tubos de carbono. Em relação ao projeto eletrônico, sugere-se a fusão de todas as placas da central de processamento em uma única placa. Sugere-se também o mesmo processo para o instrumento medidor de vibração. Tal fato acarretaria em otimização dimensional, deixando as placas menores. Em relação a software, a automatização via ROS do funcionamento do manipulador proposto seria de grande valia, uma vez que facilitaria a operação do mesmo (tornando o sistema operável apenas por um piloto). E como última sugestão de trabalho futuro, seria a implementação do projeto em sua forma idealizada inicialmente, ou seja, o medidor de vibração não precisaria ser alimentado por cabos, possuindo assim sua própria bateria, bem como a adição de um sistema de ejeção de emergência no cabo do guincho (localizado no medidor de vibração). Poderia também se adicionar uma garra robótica na ponta do manipulador, visando dar maior suporte e firmeza ao instrumento medidor (na versão

atual este é segurado apenas pela tração do cabo do guincho).

Baseado nas pesquisas realizadas para este trabalho e pelo Instituto Tecnológico Vale, não foi encontrado nenhum drone que apresente a aplicação proposta. Por fim, a partir dos experimentos realizados, conclui-se que este projeto atende ao seu objetivo de criação, que consiste na medição de vibrações em máquinas e estruturas em altura, por meio de um manipulador aéreo.

Referências Bibliográficas

- 3DLAB. “O que é o PETG?” Disponível em: <https://3dlab.com.br/petg-conheca-esse-material/>, 2021. Acesso em: 22 julho.
- ADASH. *Vibration Diagnostics for beginners 3*. Relatório técnico, 2019.
- AEROARMS. “Aeroarms Project”. Disponível em: <https://aeroarms-project.eu/>, 2019. Acesso em 17 março.
- ALIEXPRESS. “RC Winch”. Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/popular/rc-winch.html>, 2021a. Acesso em: 17 junho.
- ALIEXPRESS. “L298 New Dual H Bridge DC Stepper Motor Drive Controller Board Module L298N for Arduino stepper motor smart car robot”. Disponível em: <https://www.aliexpress.com/item/32224772756.html>, 2021b. Acesso em: 18 abril.
- AMAZON. “Amazon Prime Air”. Disponível em: <http://www.amazon.com/b?node=8037720011>, 2016. Acesso em: 30 maio.
- BATURONE, A., HEREDIA, G., FRANCHI, A., et al.. “The AEROARMS Project: Aerial Robots with Advanced Manipulation Capabilities for Inspection and Maintenance”, *IEEE Robotics Automation Magazine*, v. PP, pp. 1–1, 08 2018. doi: 10.1109/MRA.2018.2852789.
- BHATT, P., GOE, A. “Carbon Fibers: Production, Properties and Potential Use”, *Material Science Research India*, v. 14, pp. 52–57, 06 2017. doi: 10.13005/msri/140109.
- BHP. “Drones na Mineração”. Disponível em: https://www.bhp.com/media-and-insights/prospects/2017/04/how-drones-are-changing-mining?utm_source=YouTube&utm_medium=Organic&utm_campaign=Prospects&utm_content=Drones, 2019. Acesso em 19 de março.

- BONANI, M., MAGNENAT, S., RETORNAZ, P., et al.. “**The Hand-Bot, a Robot Design for Simultaneous Climbing and Manipulation**”, 12 2009. doi: 10.1007/978-3-642-10817-4_2.
- BRÜEL, KJAER. *Measuring Vibration*. Relatório técnico, K Larson and Son, 1982.
- CHEN, Y., ZHANG, G., ZHUANG, Y., et al.. “**Autonomous Flight Control for Multi-Rotor UAVs Flying at Low Altitude**”, *IEEE Access*, v. 7, pp. 42614–42625, 2019.
- DAVID, W., KOMINIAK, D., KANELLAKIS, C., et al.. “**On the Design, Modeling and Control of a Novel Compact Aerial Manipulator**”, 06 2016. doi: 10.1109/MED.2016.7536029.
- DE JESUS SILVA, D. H. *PROCESSAMENTO DE SINAIS PARA MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM UNIDADES GERADORAS HIDRELÉTRICAS*. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2013.
- DISNEY. “**PaintCopter**”. Disponível em: <https://www.wevolver.com/wevolver.staff/paintcopter/master/blob/0verview.wevolver>, 2020. Acesso em: 30 jul.
- DJI. “**Announcing the DJI Inspire 1 Drone**”. Disponível em: <https://www.dji.com/newsroom/news/announcing-the-dji-inspire-1>, 2014. Acesso em: 3 junho.
- ESPRESSIF. “**ESP32 - A Different IoT Power and Performance**”. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/overview>, 2020. Acesso em: 17 janeiro.
- ESTRADA, M., MINTCHEV, S., CHRISTENSEN, D., et al.. “**Forceful manipulation with micro air vehicles**”, *Science Robotics*, v. 3, pp. eaau6903, 10 2018. doi: 10.1126/scirobotics.aau6903.
- E.U.A. “**The White House**”. Disponível em: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2016/08/02/fact-sheet-new-commitments-accelerate-safe-integration-unmanned-aircraft>, 2016. Acesso em 13 março.
- FERDOUSH, S., LI, X. “**Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications**”, pp. 103–110, 2014. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2014.07.059>.

- FUTURE-ELECTRONICS. “**EVAL-ADXL355-PMDZ**”. Disponível em: <https://br.mouser.com/ProductDetail/Analog-Devices/EVAL-ADXL355-PMDZ>, 2020. Acesso em: 12 março.
- GHADIQ, V., GOLDIN, J., REN, W. “**Autonomous indoor aerial gripping using a quadrotor**”, pp. 4645–4651, Sep. 2011. ISSN: 2153-0858. doi: 10.1109/IROS.2011.6094690.
- HANLY, S. “**Vibration Analysis: FFT, PSD, and Spectrogram Basics**”. Disponível em: <https://blog.endaq.com/vibration-analysis-fft-psd-and-spectrogram>, 2019.
- HEREDIA, G., JIMENEZ-CANO, A. E., SANCHEZ, I., et al.. “**Control of a multirotor outdoor aerial manipulator**”, pp. 3417–3422, Sep. 2014. ISSN: 2153-0866. doi: 10.1109/IROS.2014.6943038.
- HUANG, Q., BAOPING, B., DENG, L. “**Development of high synchronous acquisition accuracy wireless sensor network for machine vibration monitoring**”, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.021>.
- I. N., I., AL AKKAD, M. A., ABRAMOV, I. “**Exploring Ackermann and LQR stability control of stochastic state-space model of hexacopter equipped with robotic arm**”, *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1015, pp. 032160, 05 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1015/3/032160.
- IRVINE, T. “**VibrationData Toolbox**”. Disponível em: <https://endaq.com/pages/vibration-shock-analysis-software-vibrationdata-toolbox>, 2018. Acesso em: 20 abril.
- JABER, A., BICKER, R. “**Design of a Wireless Sensor Node for Vibration Monitoring of Industrial Machinery**”, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, v. 6, pp. 639–653, 04 2016. doi: 10.11591/ijece.v6i1.9296.
- JIMENEZ-CANO, A. E., MARTIN, J., HEREDIA, G., et al.. “**Control of an aerial robot with multi-link arm for assembly tasks**”, pp. 4916–4921, May 2013. ISSN: 1050-4729. doi: 10.1109/ICRA.2013.6631279.
- KIM, S., CHOI, S., KIM, H. J. “**Aerial manipulation using a quadrotor with a two DOF robotic arm**”, pp. 4990–4995, Nov 2013. ISSN: 2153-0866. doi: 10.1109/IROS.2013.6697077.

- KOENE, I., KLAR, V., VIITALA, R. “**IoT connected device for vibration analysis and measurement**”, *HardwareX*, v. 7, pp. e00109, 04 2020. doi: 10.1016/j.ohx.2020.e00109.
- KOLBAN, N. *Kolban’s Book on ESP32*. 2018.
- KONDAK, K., KRIEGER, K., ALBU-SCHÄEFFER, A., et al.. “**Closed-Loop Behavior of an Autonomous Helicopter Equipped with a Robotic Arm for Aerial Manipulation Tasks**”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, v. 10, 02 2013. doi: 10.5772/53754.
- KUTIA, J., STOL, K., XU, P. “**Aerial Manipulator Interactions With Trees for Canopy Sampling**”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. PP, pp. 1–1, 05 2018. doi: 10.1109/TMECH.2018.2837005.
- LIAO, Y., KIREMIDJIAN, A., RAJAGOPAL, R., et al.. “**Angular velocity-based structural damage detection**”, p. 98031N, 04 2016. doi: 10.1117/12.2219398.
- LILYGO. “**LILYGO® TTGO T8 V1.7 ESP32 4MB PSRAM TF CARD 3D ANTENNA WiFiBluetooth**”. Disponível em: http://www.lilygo.cn/claprod_view.aspx?TypeId=21&Id=983&FId=t28:21:28w, 2020. Acesso em: 7 maio.
- LIPPIELLO, V., RUGGIERO, F. “**Cartesian Impedance Control of a UAV with a Robotic Arm**”, v. 10, pp. 704–709, 09 2012. doi: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00158.
- LISOWSKI, M., GONEK, P., KORTA, J., et al.. “**Structural Damage Detection Using Wireless Passive Sensing Platform Based on RFID Technology**”, *Structural Control and Health Monitoring*, v. 23, 01 2016. doi: 10.1002/stc.1826.
- LOONEY, M. “**How Sensor Performance Enables Condition-Based Monitoring Solutions**”. Disponível em: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/mems-vibration-monitoring-acceleration-to-velocity.html>, 2017. Acesso em: 10 ago.
- LORENA, G. “**Mina Autônoma**”. Disponível em: <https://www.minasjr.com.br/minas-autonomas-entenda-seu-funcionamento/>, 2019. Acesso em 19 de março.
- MAIS, J. *Spectrum Analysis*. Relatório técnico, SKF, 2002.

- MANUEL JIMÉNEZ, ROGELIO PALOMERA, I. C. *Introduction to Embedded Systems*. Springer, 2014.
- MEIKANG QIU, J. L. *Real-Time Embedded Systems*. CRC Press, 2011.
- MERENDINO, G., LANZONI, M., RICCÒ, B. “An embedded system for real time vibration analysis”, 06 2011. doi: 10.1109/IWASI.2011.6004676Document.
- MINTWITHRASPBERRY. “Raspberry Pi Pinout Zero W”. Disponível em: <https://mintwithraspberry.blogspot.com/1991/10/raspberry-pi-pinout-zero-w.html>, 2021. Acesso em: 3 maio.
- MOHAMMADI, M., FRANCHI, A., BARCELLI, D., et al. “Cooperative aerial tele-manipulation with haptic feedback”, pp. 5092–5098, Oct 2016. ISSN: 2153-0866. doi: 10.1109/IROS.2016.7759747.
- MOUSER-ELECTRONICS. “Triple Axis Accelerometer Module (ADXL 345)”. Disponível em: <https://store.fut-electronics.com/products/triple-axis-accelerometer-module-adxl-345>, 2020. Acesso em: 12 fevereiro.
- MURPHY, C. “Choosing the Most Suitable MEMS Accelerometer for Your Application”. Disponível em: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/choosing-the-most-suitable-mems-accelerometer-for-your-application-part-1.html>, 2017. Acesso em: 17 maio.
- MUÑOZ, J. U. A. *Modeling and control of VTOL vehicles with rigid manipulators*. Tese de Doutorado, Université de Grenoble. Électronique, Électrotechnique, Automatique et Traitement du Signal (EEATS), 2017.
- PRODUCTZ. “AscTec Pelican”. Disponível em: <https://productz.com/en/asctec-pelican/p/84mb>, 2020. Acesso em: 3 março.
- RANDALL, R. B. *VIBRATION-BASED CONDITION MONITORING INDUSTRIAL, AEROSPACE AND AUTOMOTIVE APPLICATIONS*. WILEY, 2011.
- RASPBERRYPI.ORG. “Raspberry Pi Zero W”. Disponível em: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-zero-w/>, 2020. Acesso em: 23 fevereiro.
- ROBOHUB. “Tree cavity inspection using drones”. Disponível em: <https://robohub.org/tree-cavity-inspection-using-drones/>, 2020. Acesso em: 30 jul.

- RUGGIERO, F., LIPPIELLO, V., OLLERO, A. “**Aerial Manipulation: A Literature Review**”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, v. 3, n. 3, pp. 1957–1964, July 2018. ISSN: 2377-3774. doi: 10.1109/LRA.2018.2808541.
- SON, J.-D., AHN, B.-H., HA, J.-M., et al.. “**An Availability of MEMS-Based Accelerometers and Current Sensors in Machinery Fault Diagnosis**”, *Measurement*, v. 94, 08 2016. doi: 10.1016/j.measurement.2016.08.035.
- SOPCIK, P. “**MEMS Vibration Monitoring: From Acceleration to Velocity**”. Disponível em: <https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/how-sensor-performance-enables-condition-based-monitoring-solutions.html>, 2019. Acesso em: 10 ago.
- SPARKFUN. “**I2C and SPI Protocol**”. Disponível em: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c/all>, 2013. Acesso em: 23 janeiro.
- SUNLU. “**PETG filament**”. Disponível em: <https://www.amazon.com/SUNLU-Filament-1-75mm-Printing-Printer/dp/B08FQM99SW>, 2021. Acesso em: 17 julho.
- SWATHY, L., ABRAHAM, L. “**Analysis of vibration and acoustic sensors for machine health monitoring and its wireless implementation for low cost space applications**”, *2014 1st International Conference on Computational Systems and Communications, ICCSC 2014*, pp. 80–85, 02 2015. doi: 10.1109/COMPSC.2014.7032625.
- TAVORA, B., PARK, H., ROMANO, M., et al.. “**Equilibrium-Based Force and Torque Control for an Aerial Manipulator to Interact with a Vertical Surface**”, *Robotica*, v. 38, pp. 1–23, 06 2019. doi: 10.1017/S0263574719000870.
- TEVEL. “**The best fruit pickers in the world, by FAR™** ”. Disponível em: <https://www.tevel-tech.com/>, 2021. Acesso em: 25 julho.
- TOGNON, M., YÜKSEL, B., BUONDONNO, G., et al.. “**Dynamic decentralized control for protocentric aerial manipulators**”, pp. 6375–6380, May 2017. ISSN: null. doi: 10.1109/ICRA.2017.7989753.
- TRUJILLO, M.Á., MARTÍNEZ-DE DIOS, J.R., MARTÍN, C., et al.. “**Novel Aerial Manipulator for Accurate and Robust Industrial NDT Contact Inspection: A New Tool for the Oil and Gas Inspection Industry**”, 2019.

- UBUY. “**Carbon Fiber Tube**”. Disponível em: <https://www.u-buy.vn/en/product/11A9U3G4-abester-roll-wrapped-carbon-fiber-tube-id-25mm-x-od-27mm-x-500mm>. 2021. Acesso em: 2 julho.
- USINAINFO. “**Eletroimã / Solenóide**”. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-modulos-arduino/eletroima-solenoid-20mm-25kg-2815.html>, 2020a. Acesso em: 20 janeiro.
- USINAINFO. “**Regulador de Tensão Ajustável MT3608 Auto Boost Step Up**”. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/regulador-de-tensao-ajustavel/regulador-de-tensao-ajustavel-mt3608-auto-boost-step-up-para-mais-25v-a-28>.html, 2020b. Acesso em: 12 fevereiro.
- VARANIS, M.SILVA, MERELES, A. “**MEMS accelerometers for mechanical vibrations analysis: a comprehensive review with applications**”, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1445-5>.
- VINEETHA, P., NATARAJAN, D. K., G.GIRIKUMAR, S. T. “**Induction motor fault detection and diagnosis by vibration analysis using MEMS accelerometer**”, pp. 1–6, 10 2013. doi: 10.1109/C2SPCA.2013.6749391.
- WEDDELL, A., MERRET, G., S.BARROW, et al.. “**VIBRATION-POWERED SENSING SYSTEM FOR ENGINE CONDITION MONITORING**”, 2012. doi: DOI:10.1049/cp.2012.0585.
- WEVOLVER. “**More And More Dangerous Tasks To Be Performed By Drones**”. Disponível em: <https://www.wevolver.com/article/more.and.more.dangerous.tasks.to.be.performed.by.drones>, 2020. Acesso em: 13 mar.
- WU, Z., HUANG, N. “**Ensemble Empirical Mode Decomposition: a Noise-Assisted Data Analysis Method**”, *Advances in Adaptive Data Analysis*, v. 1, pp. 1–41, 01 2009. doi: 10.1142/S1793536909000047.
- YAN, R., GAO, R., CHEN, X. “**Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications**”, *Signal Processing*, v. 96, pp. 1–15, 03 2014. doi: 10.1016/j.sigpro.2013.04.015.
- ZHENG, Y., H.LIN, DENG, Q., et al.. “**Machine Tool Vibration Fault Monitoring System Based on Internet of Things**”, 2015. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-46981-1_51.

ZHU, Y., JIANG, W., KONG, X., et al.. “**An Accurate Integral Method for Vibration Signal Based on Feature Information Extraction**”, *Shock and Vibration*, v. 2015, pp. 1–13, 02 2015. doi: 10.1155/2015/962793.